



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**ESTUDIO NO ESTACIONARIO DE CLIMA MEDIO DE
OLEAJE EN LA COSTA CENTRAL DE CHILE**

Mauricio Andrés Molina Pereira

Junio 2011

APROBACIÓN

ESTUDIO NO ESTACIONARIO DE CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN LA COSTA CENTRAL DE CHILE

Mauricio Andrés Molina Pereira

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
MANUEL CONTRERAS LOPEZ Profesor guía	_____	_____
SERGIO SALINAS MARCHANT Docente	_____	_____
MAURICIO REYES GALLARDO Docente	_____	_____

DECLARACIÓN

Este trabajo o alguna de sus partes no ha sido presentado 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 del título profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor cede los derechos legales a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos, sin implicar esto algún propósito comercial o de fines de lucro, lo cual no podrá ser hecha sin la autorización expresa del autor.

Mauricio Molina Pereira
Alumno

Manuel Contreras López
Profesor guía

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a:

*Mi Señor, que utilizó mi carrera para mostrarme su amor
y este proyecto para mostrarme su fidelidad.*

*Mis padres y hermano, que en todo momento me brindaron
su apoyo incondicional.*

Mi novia, que día a día me motivó a culminar de este proyecto.

*Mis compañeros de generación Pía, Bárbara, Eduardo (Polémico),
Juan Carlos, Iván (Místico), Patricio, Rodrigo, Cristian (Chico),
que en los momentos de aprendizaje me mostraron que
uno aprende y trabaja más y mejor cuando tiene
buenos amigos como compañeros.*

*Patricio Winckler, quien me inculcó a lo largo de la carrera la pasión por la
ingeniería marítima y principalmente por el oleaje; quien también me
confió sus ayudantías, correcciones y una que otra clase.*

*Manuel Contreras, que sobrepasando sus obligaciones académicas
me ayudó de gran manera en el desarrollo y principalmente en la
culminación de este documento*

*Y a todos mis compañeros de carrera, profesores, profesionales, amigos
y familiares quienes con sus comentarios, consultas e inquietudes
de manera directa e indirecta sirvieron de ayuda y
motivación para desarrollar este proyecto.*

Dedicado a:
Jesucristo, mi Señor y Salvador
Mauricio y Sandra, los responsables de lo que felizmente soy
José Patricio, mi compañero de crecimiento y aprendizaje
Shirley, el amor de mi vida

*Grandes son las obras del Señor
Estudiadas por los que en ellas se deleitan
Salmo 111:2 (NVI)*

CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
2	Objetivos y alcances	3
2.1	Objetivos.....	3
2.2	Alcances	3
3	Marco teórico.....	5
3.1	El oleaje	5
3.1.1	Definición del oleaje	5
3.1.2	Generación y Propagación del oleaje	6
3.1.2.1	Generación	6
3.1.2.2	Propagación oceánica: dispersión y clasificación	9
3.1.2.3	Profundidad relativa y propagación costera	10
3.1.3	Caracterización del oleaje	12
3.1.3.1	Registro de oleaje y el estado de mar	12
3.1.3.2	Análisis en el dominio del tiempo	12
3.1.3.3	Análisis en el dominio de la frecuencia	13
3.1.3.4	Estadística de oleaje.....	14
3.1.3.5	Clima Medio de oleaje	15
3.1.3.6	Clima Extremo de oleaje.....	16
3.1.4	Modelos de <i>hindcasting</i>	17
3.1.4.1	Fundamento teórico.....	17
3.1.4.2	Validación y representatividad.....	18
3.2	El oleaje en la costa central de Chile	19
3.2.1	Origen del oleaje de la costa central de Chile	19
3.2.1.1	Zonas de generación y tipología del oleaje	19
3.2.1.2	Fuente de la estadística.....	20
3.2.2	Clima medio de oleaje en la costa central de Chile (análisis tradicional)	24
3.3	El viento	31
3.3.1	Generación.....	31
3.3.2	Zonificación del viento.....	33
3.3.3	Viento local.....	34
3.3.4	Circulación Walker y surgencia.....	36
3.4	El fenómeno El Niño – Oscilación Sur (ENOS).....	39
3.4.1	Antecedentes del fenómeno	39
3.4.2	Descripción de ENOS	40
3.4.3	Caracterización de ENOS	43
3.4.4	Influencia de ENOS en el patrón de vientos	47
3.5	El Calentamiento Global.....	49

3.5.1	El efecto invernadero	49
3.5.2	Efecto ampliado de invernadero	50
3.5.3	Evidencia de calentamiento global	52
3.5.4	Proyecciones	54
3.5.5	Influencia del calentamiento global en el patrón de vientos	56
3.6	Metodología de análisis de oleaje no estacionario	57
3.6.1	Problemática del análisis tradicional.....	57
3.6.2	Hipótesis del oleaje no estacionario	58
3.6.2.1	Análisis estacionario insuficiente para caracterizar oleaje.....	58
3.6.2.2	Análisis se basa en el clima medio y se descarta el clima extremo ..	58
3.6.2.3	El oleaje puede ser representado por índices mensuales	58
3.6.2.4	La estadística es representativa solo del oleaje del Pacífico sur	59
3.6.2.5	Estadística de modelos <i>hindcasting</i> es válida para el estudio	59
3.6.2.6	Calentamiento Global se comporta como tendencia lineal.....	60
3.6.2.7	ENOS tiene comportamiento cíclico irregular	60
3.6.2.8	ENOS y Calentamiento Global, pueden ser independientes	60
3.6.2.9	El oleaje representado como modelo aditivo	61
3.6.3	El oleaje como modelo aditivo	61
3.6.4	Método para estimar influencia del Calentamiento Global en el Oleaje.....	63
3.6.5	Método para estimar influencia de ENOS en el Oleaje	64
3.6.6	Método de análisis de oleaje no estacionario.....	65
4	Resultados.....	69
4.1	Influencia del Calentamiento Global en el oleaje.....	69
4.2	Influencia de ENOS en el oleaje	73
4.2.1	Análisis de correlación entre los índices ENOS y parámetros de resumen	73
4.2.2	Influencia de ENOS en el oleaje utilizando índice SSTA Niño 3.4	75
4.3	Pronóstico de clima medio de oleaje con análisis no estacionario.....	81
5	Discusión	89
5.1	Discusión por Objetivos	89
5.1.1	Objetivo General: Desarrollo del estudio no estacionario de clima medio	89
5.1.2	Objetivo específico uno: Caracterización del clima medio	91
5.1.3	Objetivo específico dos: Influencia del calentamiento global en el oleaje.....	92
5.1.4	Objetivo específico tres: Influencia del ENOS en el oleaje.	94
5.1.5	Aplicación del estudio de oleaje no estacionario	98
5.2	Discusión aspectos metodológicos	101
5.2.1	Dependencia ENOS - Calentamiento Global y la validez del modelo aditivo .	101
5.2.2	Acerca de los estadígrafos que se emplean	101
5.2.3	Perfeccionamiento y usos futuros de la metodología.....	102
6	Conclusiones	103

7	Recomendaciones	107
8	Referencias	109
9	Anexos	111
9.1	Figuras	111
9.2	Tablas	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Definición de altura, periodo y dirección de una ola.....	5
Figura 2. Clasificación de ondas según su periodo.	6
Figura 3. Proceso de generación de una onda por presión de viento.	7
Figura 4. Formación de tipos de oleaje según características de generación.....	7
Figura 5. Crecimiento del oleaje por viento según duración (a) y longitud (a) de <i>fetch</i>	8
Figura 6. Dispersión direccional y radial del oleaje.	9
Figura 7. Oleaje tipo <i>Swell</i> (a) y <i>Sea</i> (b).	10
Figura 8. Profundidades relativas del oleaje.....	10
Figura 9. Descripción de fenómenos perturbadores del oleaje.	11
Figura 10. Registro de oleaje y su caracterización.	12
Figura 11. Descripción de teoría de superposición de ondas.....	13
Figura 12. Espectro de energía de oleaje.....	14
Figura 13. Herramientas gráficas y estadísticas que describen el clima medio de oleaje.	15
Figura 14. Ejemplo selección datos extremos de una serie (a) y ajuste de distribución (b).	16
Figura 15. Trazado de grilla para un modelo <i>hindcasting</i>	18
Figura 16. Propagación del <i>swell</i> norte y sur que llegan a la cuarta región (Latitud 31°S).....	19
Figura 17. Espectros típicos de la costa central de Chile.	20
Figura 18. Línea de tiempo de altimetría satelital utilizada y de oleaje disponible.....	21
Figura 19. Correlación entre altimetría satelital proyecto Topex y mediciones con boya (a) y los puntos con estadística de oleaje calibrada (b).	21
Figura 20. Ubicación de estadística disponible y representatividad latitudinal.....	22
Figura 21. Probabilidad de Ocurrencia y frecuencia relativa por parámetro y nodo.	25
Figura 22. Rosa altura significativa <i>versus</i> dirección <i>peak</i> y media.	29
Figura 23. Rosa periodo <i>peak versus</i> dirección <i>peak</i> y periodo medio <i>versus</i> dirección media.....	30
Figura 24. Esquemización de la circulación atmosférica global. Arriba: idealización de circulación en un planeta sin continentes. Abajo: vista de la circulación latitudinal.	32
Figura 25. Mapa de la velocidad media anual del viento y de la presión superficial en 1989.....	33
Figura 26. Posición del anticiclón del Pacífico sur (A) y las rutas de las depresiones (D) en Enero (a) y Julio (b).	34
Figura 27. Generación de los vientos entre el anticiclón y una depresión en el hemisferio sur.....	35
Figura 28. Evolución de <i>fetch</i> entre sistemas de alta y baja presión que genera oleaje local.	36
Figura 29. Acción de vientos alisios en el Pacífico ecuatorial.	37
Figura 30. Diagrama esquemático simplificado de la circulación atmosférica ecuatorial como la circulación de aire en una habitación cerrada.....	37
Figura 31. Ciclo de nutrientes en un sistema de surgencia costero idealizado (a) y principales regiones de surgencia costera del mundo con los sistemas de alta presión atmosférica que los influyen (b).	38
Figura 32. Modelo de propagación de ondas Kelvin y Rossby.....	41
Figura 33. Modelo de convección, temperatura y surgencia, en condición Niño, Media y Niña.	42
Figura 34. Cuadrantes que definen los índices ENOS de anomalía de temperatura.....	43
Figura 35. Variación de presión atmosférica entre Tahití y Darwin, que define al índice IOS.	44
Figura 36. Índices que describen ENOS, en rojo eventos Niño (fase cálida) y azul eventos Niña (fase fría).	45
Figura 37. Ocurrencia histórica mensual de ENOS según índice SSTA Niño 3.4 (60 años) con desviaciones estándar asociadas a cada mes.	46
Figura 38. Ocurrencia de eventos ENOS en el intervalo de estadística de oleaje disponible.	47
Figura 39. Diagrama Latitud-Tiempo de la anomalía de la componente zonal del viento (m/s)	48
Figura 40. Esquema descriptivo del efecto invernadero.....	49
Figura 41. Concentraciones atmosféricas mundiales de tres gases de efecto invernadero.	50
Figura 42. Balance anual de la energía en la Tierra.....	51

Figura 43. Temperatura media del planeta entre 1880 y 2000.	52
Figura 44. Derretimiento del glaciar Uspala (Argentina) de 1928 a 2004.	53
Figura 45. Derretimiento glaciar Viedma (Argentina) de 1930 a la actualidad.....	53
Figura 46. Evolución de la anomalía anual de la superficie de hielo en el hemisferio norte.	53
Figura 47. Escenarios de emisiones de GEI de 2000 a 2100 y proyecciones de la temperatura. ...	54
Figura 48. Cambios de temperatura superficial mundial proyectados para finales del siglo XXI (2090-2099) respecto al periodo 1980-1999 para el escenario A1B.....	55
Figura 49. Vientos y presiones medias entre septiembre y febrero para la condición base (a) y su diferencia respecto al escenario A2 (b).	56
Figura 50. Esquema de comparación de índice GLOTI con parámetros.....	63
Figura 51. Esquema determinación influencia de ENOS en el oleaje.	65
Figura 52. Diagrama cálculo de parámetro mensual incorporando influencia no estacionaria.	67
Figura 53. Diagrama de ejecución del estudio no estacionario.....	68
Figura 54. Tendencia del promedio mensual por parámetro (nodo 35°S) e índice GLOTI.	71
Figura 55. Tendencia de la desviación estándar mensual por parámetro (nodo 35°S) e índice GLOTI.	72
Figura 56. Comparación series índice SSTA Niño 3.4 con la anomalía del promedio mensual y su filtro triangular de 12 meses para cada parámetro.	78
Figura 57. Comparación series índice SSTA Niño 3.4 con la anomalía de la desviación estándar mensual y su filtro triangular de 12 meses para cada parámetro.	79
Figura 58. Dispersión entre anomalía mensual por parámetro y las fases de ENOS según índice SSTA Niño 3.4 en el Nodo 35°S.	80
Figura 59. Valor medio con banda de una desviación estándar para cada parámetro y nodo en la condición estacionaria y las proyectadas de 25 años para cada fase de ENOS.	87
Figura 60. Promedio y desviación estándar total, anual y mensual de la dirección <i>peak</i> en el nodo 35°S.	90
Figura 61. Influencia general de ENOS y Calentamiento Global en el oleaje.....	98
Figura 62. Diagrama de resultados del estudio no estacionario de clima medio de oleaje en la costa central de Chile.	100
Figura 63. Puntos de calibración del modelo ECMWF WAM en la costa central de Chile (nodos 31°S y 37°S), los <i>tracks</i> de altimetría satelital utilizados y los ajustes asociados.	111
Figura 64. Temperatura media del planeta con filtro triangular de 5 años entre 1880 y 2010 (arriba) y detalle del lapso de interés entre 1985 y 2007 con tendencia lineal (abajo).	112
Figura 65. Series de índices que describen ENOS, contemporánea a la estadística de oleaje.....	113
Figura 66. Comparación entre índices SSTA Niño 3.4 y GLOTI.....	114
Figura 67. Promedios por parámetro y nodo para los meses normales según SSTA Niño 3.4 y los números de meses normales considerados.	115

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tiempo (días) de propagación de una ola entre zona de generación y la costa central de Chile.	20
Tabla 2. Principales estadígrafos por parámetro y nodo.	26
Tabla 3. Correlación entre los 4 nodos para cada parámetro de oleaje.	27
Tabla 4. Correlaciones entre los índices ENOS.	46
Tabla 5. Frecuencia del <i>Swell</i> NW en cada nodo.	59
Tabla 6. Valores medios y variaciones anuales por parámetro δCG	69
Tabla 7. Variación de la media del parámetro en los 22 años de la estadística.	70
Tabla 8. Proporción entre variación de 22 años y rango de valores de la serie.	70
Tabla 9. Correlaciones entre los índices de ENOS y los promedios mensuales y desviaciones estándar mensuales para cada parámetro y nodo.	73
Tabla 10. Promedio de correlaciones absolutas por índices.	74
Tabla 11. Promedio correlaciones absolutas de fases Niño y Niña de ENOS para el índice SSTA Niño 3.4 según parámetro y nodo.	74
Tabla 12. Variación de un parámetro por unidad de índice de ENOS.	76
Tabla 13. Proporción de variaciones de parámetro por unidad de índice de ENOS y rango de valores de la serie mensual respectiva.	77
Tabla 14. Media de los efectos de ENOS ($\Delta ENOS$) en la estadística (a) y su proporción respecto al rango de la serie (b).	77
Tabla 15. Valores medios por parámetro y nodo de la estadística (P) y en condición estacionaria (P).	81
Tabla 16. Variaciones por Calentamiento Global ($\Delta CG *$) en horizonte de 25 años (a) y su proporción respecto a rango de la serie (b).	82
Tabla 17. Variaciones por condiciones extremas de ENOS ($\Delta ENOS *$) para fase Niño (a) y Niña (b) con sus proporciones respecto a rango de la serie (c y d) respectivamente.	83
Tabla 18. Proyecciones de parámetros ($P *$) en horizonte 25 años para las tres fases de ENOS en condiciones extremas.	84
Tabla 19. Variación respecto a condición estacionaria de la proyección de 25 años con Niño (a) y Niña (b) extremo y su proporción respecto a rango de la serie (c y d) respectivamente.	85
Tabla 20. Valores asociados a una probabilidad de ocurrencia para cada nodo y parámetro.	117
Tabla 21. Frecuencias relativas asociadas a cada parámetro y nodo.	118
Tabla 22. Tablas de frecuencia altura significativa <i>versus</i> periodo <i>peak</i> para todos los nodos.	119
Tabla 23. Tablas de frecuencia altura significativa <i>versus</i> periodo medio para todos los nodos.	120
Tabla 24. Tablas de frecuencia altura significativa <i>versus</i> dirección <i>peak</i> para todos los nodos.	121
Tabla 25. Tablas de frecuencia altura significativa <i>versus</i> dirección media para todos los nodos.	122
Tabla 26. Tablas de frecuencia dirección <i>peak versus</i> periodo <i>peak</i> para todos los nodos.	123
Tabla 27. Tablas de frecuencia dirección media <i>versus</i> periodo medio para todos los nodos.	124
Tabla 28. Valores máximos y mínimos de las series mensuales de cada parámetro (a) y diferencia entre máximos y mínimos (rango) de cada serie (b).	125

RESUMEN

El oleaje, fenómeno generado por el viento trascendente en la ingeniería marítima, es supuesto por simplicidad como estacionario, es decir, que las características presentes en una estadística no variarían en el tiempo, haciéndola representativa de la condición futura. Evidencias encontradas sobre las influencias de los fenómenos (no estacionarios) El Niño – Oscilación Sur (ENOS) y Calentamiento Global en los patrones de viento (Garreaud y Falvey 2008, Avaria *et al.* 2004) permiten suponer que el oleaje es en realidad no estacionario.

Esto conduce a buscar una metodología que permita incorporar las influencias de estos fenómenos en los estudios de clima medio de oleaje para obtener pronósticos con mayor certidumbre. Los resultados encontrados indican la presencia de variaciones en el oleaje relacionados con ambos fenómenos en los promedios y desviaciones estándar mensuales de los parámetros de altura significativa, periodo *peak*, periodo medio, dirección *peak* y dirección media en la estadística de 20 años de parámetros de resumen en 4 puntos de la costa central de Chile en las latitudes 31°S, 35°S, 37°S y 39°S (desde la IV a la XIV región exceptuando la V).

Se obtienen las condiciones base de oleaje a partir de un estudio de oleaje tradicional y luego se simulan las características del oleaje bajo tres escenarios de ENOS en el futuro: Niño extremo, normal y Niña extrema en el año 2031, usando el índice SSTA Niño 3.4. Se estima que las condiciones futuras (año 2031) del clima medio de oleaje en condición normal de ENOS presentarían variaciones de hasta +0,22 [m] en la altura de ola, hasta +0,7 [s] en los periodos y hasta -22,6° en las direcciones respecto a las condiciones medias actuales (8,7%, 5,8% y 9,5% respectivamente), mientras que en condiciones extremas de ENOS se presentarían variaciones de hasta +0,42 [m] en la altura, hasta +0,7 [s] en los periodos y hasta -28,17° en las direcciones (16,9%, 5,9% y 12,3% respectivamente).

ABSTRACT

In the conventional design of maritime works, wind waves are usually supposed to be statistically stationary, i.e. wave parameters are assumed to have a constant behavior in statistical sense, during the lifetime. However, recent studies (Garreaud & Falvey 2008, Avaria *et al.* 2004) indicate that large scale climate phenomena such as El Niño Southern Oscillation (ENSO) and Global Warming may affect winds and therefore the wave patterns.

A methodology incorporating long-term fluctuations of the mean wave climate is proposed herein. The methodology was applied to 20-year statistical wave parameters in 4 nodes off the central coast of Chile (31°S, 35°S, 37°S and 39°S). Results of the historical dataset indicate the presence of long term fluctuations in the relevant wave parameters (i.e. monthly averages and standard deviations of the significant height, peak period, mean period, peak direction and mean direction).

Once a model to characterize the long term fluctuations was obtained, 3 ENSO scenarios derived on the SSTA Niño 3.4 index were used to forecast the wave parameters in a 20 years horizon (2031): extreme Niño, normal and extreme Niña. These scenarios were compared to an estimation considering statistically stationary behavior of the data. The forecast indicated that mean wave climate in the normal ENSO conditions would present increments of 0.22 [m] in the wave height, 0.7 [s] in the periods and deviations of -22.6 in the directions when compared to the stationary model (8.7%, 5.8% and 9.5% respectively). In extreme ENSO conditions, the increments in significant height are of 0.42 [m] and of 0.7 [s] in periods. The direction change -28.17° (16.9% 5.9% and 12.3% respectively).

1 INTRODUCCIÓN

Desde que el hombre se aventura en el mar, ha debido encontrar la manera de sortear las condiciones que impone el oleaje. Desde los antiguos navegantes y pescadores hasta los modernos surfistas y turistas, el oleaje, por su imponencia, fuerza, belleza o constante presencia, ha sido fuente de interés, admiración y respeto. Asimismo, áreas del quehacer humano tan diversas como el desarrollo urbano, conflictos bélicos, conservación del medio ambiente, fuentes de energía, comercio, deportes, recreación y otros, se han interesado en el estudio y comprensión de este fenómeno, cuyos esfuerzos no tienen más de dos siglos de antigüedad.

En la actualidad, el oleaje convive con diversidad de actividades y estructuras relacionadas con el desarrollo de la sociedad en el ámbito económico (puertos, granjas de energía undimotriz, plantas petroleras, carreteras, etc.) y recreacional (marinas deportivas, paseos costeros, playas, acuarios, etc.). Sin embargo, para asegurar la permanencia y utilidad de dichas actividades y estructuras se deben considerar las condiciones de mayor frecuencia y de mayor magnitud (consideradas extremas). Así, las condiciones de oleaje de mayor frecuencia condicionarán el diseño operacional, mientras que las condiciones extremas definirán el diseño estructural. Para estos efectos se requieren estudios precisos en base a estadística de adecuada extensión.

Respecto a los estudios de oleaje, el autor ha tenido variadas experiencias en su desempeño académico y profesional, tanto en su calidad de ayudante de cátedra en las asignaturas de Mecánica de Olas e Hidráulica Marítima en la carrera de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso, como participante del Grupo de Ingeniería Civil Oceánica de la misma institución, estamento que ofrece servicios de consultoría en ingeniería marítima. Las principales participaciones son la realización del proyecto interno “Análisis de estadística de parámetros de resumen de 5 años en el nodo 33°S del proyecto Olas Chile II” en 2008 en calidad de ejecutor; el desarrollo del “Estudio de evaluación del potencial de energía de oleaje entre las IV y X regiones, Chile” para la empresa HydroChile S.A. en 2009 en calidad de coordinador del grupo de análisis estadístico; y el desarrollo del estudio “Efectos del cambio climático en las costas de Chile, informe de recopilación y análisis preliminar de antecedentes” desarrollado para CEPAL en 2009 en calidad de ejecutor del estudio de evolución de oleaje.

De estas experiencias se han obtenido antecedentes de la presencia de oscilaciones de baja frecuencia y de tendencias que escapan de los criterios considerados en los estudios de oleaje tradicionales, aspectos que motivan el desarrollo del presente proyecto

Cabe consignar que un estudio tradicional de oleaje considera por simplicidad que éste no varía en el tiempo, haciendo la estadística disponible representativa de la condición futura asociada a la vida útil del proyecto a desarrollar, es decir, se supone al oleaje como estacionario.

No obstante, el carácter global de los cambios producidos por los fenómenos (no estacionarios) Calentamiento Global y El Niño – Oscilación Sur (ENOS) hacen prever que influyan de manera significativa en los campos de vientos que generan el oleaje, haciéndolo no estacionario.

Por tal razón, en este trabajo se desarrolla un estudio de oleaje no estacionario que permite identificar las influencias que en él tienen ENOS y el Calentamiento Global, y con ello una estimación de la condición de oleaje futura en la costa Central de Chile a partir de la estadística de 20 años de parámetros de resumen disponible en cuatro puntos del país.

2 OBJETIVOS Y ALCANCES

2.1 OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto es proponer una metodología de estudio de oleaje que permita realizar pronósticos con menor incertidumbre al considerar las influencias de los fenómenos Calentamiento Global y El Niño - Oscilación Sur (ENOS).

Mientras que los objetivos específicos son:

1. Caracterizar el clima medio de oleaje en aguas profundas de la costa central de Chile.
2. Identificar la influencia de ENOS en el oleaje.
3. Identificar la influencia del Calentamiento Global en el oleaje.

2.2 ALCANCES

Se utiliza estadística de oleaje obtenida de un modelo de *hindcasting* global en los nodos de latitud 31°S, 35°S, 37°S y 39°S en la costa de Chile, desarrollado por Fugro OCEANOR y facilitados por HydroChile S.A.

Se utilizan solo los parámetros de resumen espectrales de oleaje correspondientes a altura significativa (H_s), periodo *peak* (T_p), periodo medio (T_m), dirección *peak* (Dir_p) y dirección media (Dir_m), sin considerarse la información de espectros.

El estudio se realiza solo en aguas profundas y para clima medio.

El oleaje se caracteriza mediante el uso de tablas de incidencia, rosas de incidencia, gráficos de frecuencia relativa y acumulada y los estadígrafos promedio mensual y desviación estándar mensual.

Se utiliza solo la estadística mensual de los índices SSTA Niño 3.4, SSTA Niño 3, SSTA Niño 4 y SSTA Niño 1+2, además del Índice de Oscilación sur (IOS), todos pertenecientes a NOAA.

Las posibles influencias del oleaje en la ingeniería marítima se describen de manera intuitiva en base a la experiencia del autor.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 EL OLEAJE

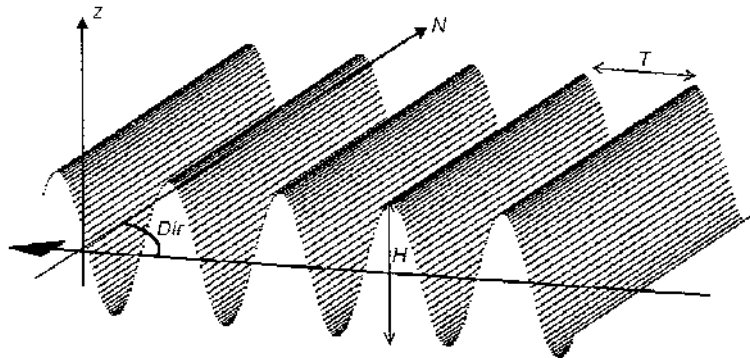
El oleaje es un fenómeno característico del comportamiento del océano. Su presencia obliga a considerar todos los resguardos posibles con tal de asegurar la operación y permanencia de cualquier obra marítima y/o costera en el tiempo, ya que al ser un fenómeno incontenible e ineliminable, el imperante diseñar cualquier facilidad en convivencia con este fenómeno.

En este capítulo se tratan todos aquellos aspectos que permitan lograr una comprensión cabal del oleaje, desde su generación, desarrollo y propagación, hasta las metodologías existentes para su caracterización.

3.1.1 DEFINICIÓN DEL OLEAJE

“El oleaje es un fenómeno que está determinado por la acción de las fuerzas de la naturaleza en cualquier superficie libre de agua, las cuales condicionan el tipo de ola que será inducida. La más obvia de estas fuerzas es la acción del viento sobre la superficie del mar”.

La definición de oleaje planteada por Silva (2005) encierra todas las posibilidades que puedan darse de este fenómeno, ya que cada fuerza perturbadora generará una condición de oleaje distinta, caracterizada por los parámetros, *altura* (H), *periodo* (T) y *dirección* (Dir). La primera está definida como la distancia vertical entre la cresta y el valle, la segunda señala el tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas o valles consecutivos por un mismo punto, mientras que la tercera señala la orientación con la que incide la trayectoria de la ola, tal como se presenta en la Figura 1.



**Figura 1. Definición de altura, periodo y dirección de una ola.
(Adaptado de UNICAN 2000)**

A partir de estos parámetros se derivan la *longitud* (L) y *celeridad* (C) de la onda, siendo la primera dependiente del periodo y la profundidad de la columna de agua según la *Teoría Lineal del Oleaje* (TLO) y la segunda definida como el cociente entre la longitud y el periodo (UNICAN 2000) de la forma:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \qquad C = \frac{L}{T}$$

En general el oleaje es clasificado por el periodo y las fuerzas generadoras y restauradoras, según el esquema presentado en la Figura 2. Se presentan en general ondas generadas por fuerzas meteorológicas como viento y cambios de presión; tectónicas como terremotos; y astronómicas como la influencia del sol y la luna. Diferenciando por periodo, de menor a mayor, se encuentran ondas capilares y de ultra-gravedad (menores a 1 [s]), ondas de gravedad conocida como oleaje (entre 1 y 30 [s]) y las de largo periodo, de infra-gravedad y transmareasles con periodos de 1 minuto a mas de 24 horas. De estas, el oleaje entre 1 y 30 [s] es el que concentra la mayor cantidad de energía en cuanto a la variabilidad de la superficie libre del mar (Silva 2005), y sobre el cual se desarrolla el presente trabajo.

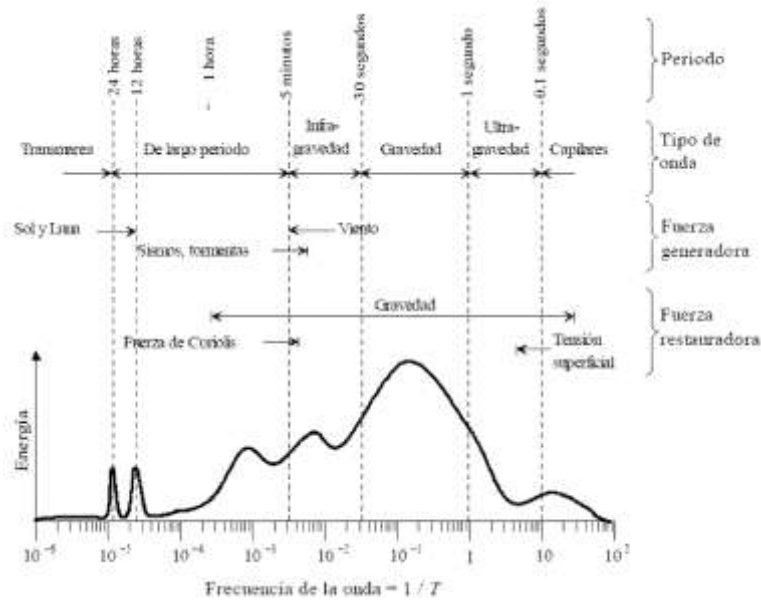


Figura 2. Clasificación de ondas según su periodo.
(Silva 2005, *op.cit*)

3.1.2 GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DEL OLAJE

3.1.2.1 Generación

Existen diversas teorías respecto a la forma en que el viento al interactuar con la superficie del mar produce las deformaciones necesarias para la formación del oleaje: Una es la suposición de un efecto friccional entre ambos fluidos y otra es la generación de campos irregulares de presión normal a la superficie del mar producto de la turbulencia del viento (Holthuijsen 2007), como la descrita en la vista superior de la Figura 3. No obstante, dado que no existe consenso en el método de deformación inicial de la superficie libre, no se discutirá este tema en el presenta trabajo.

Considerando la superficie marina deformada y el viento constante en magnitud y permanente en el tiempo, este en su desplazamiento ejerce presión positiva sobre una cara de la ola y negativa (succión) en la otra (Vista inferior de Figura 3), resultando un aporte energético que incrementa la altura, periodo y celeridad de la ola. En la medida que esta crece, ofrecerá mayor resistencia al avance del viento, por lo que las presiones inducidas aumentan, haciendo más eficiente el proceso de transferencia. Sin embargo, cada vez que la celeridad de la ola se acerque a la del viento esta razón irá disminuyendo hasta niveles poco significativos, alcanzando un desarrollo máximo para la condición de viento impuesta, denominándose *Oleaje Plenamente Desarrollado* (C, Figura 4)

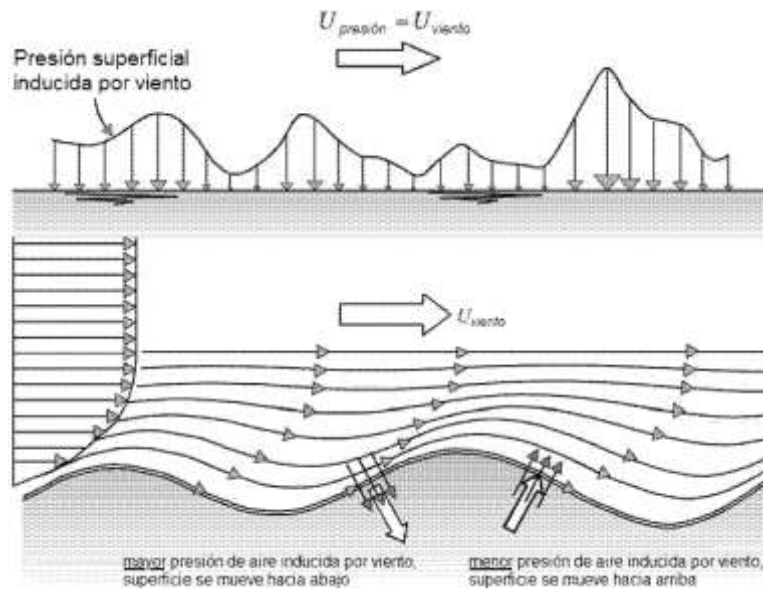


Figura 3. Proceso de generación de una onda por presión de viento.
(Adaptado de Holthuijsen 2007)

Sin embargo, la magnitud y dirección del viento no son constantes en el tiempo ni en el espacio, por lo que las características del oleaje pueden no alcanzar el desarrollo pleno dependiendo de las limitaciones del viento en cuanto a su duración, dirección y espacio de acción, este último denominado *fetch*. Así, el proceso de generación puede terminar en un *Oleaje Limitado por Duración* (A, Figura 4), cuando las condiciones de viento acaban repentinamente, o bien en un *Oleaje Limitado por fetch* (B, Figura 4) cuando por efecto de la propagación el oleaje abandona el campo de acción del viento (UNICAN 2000).

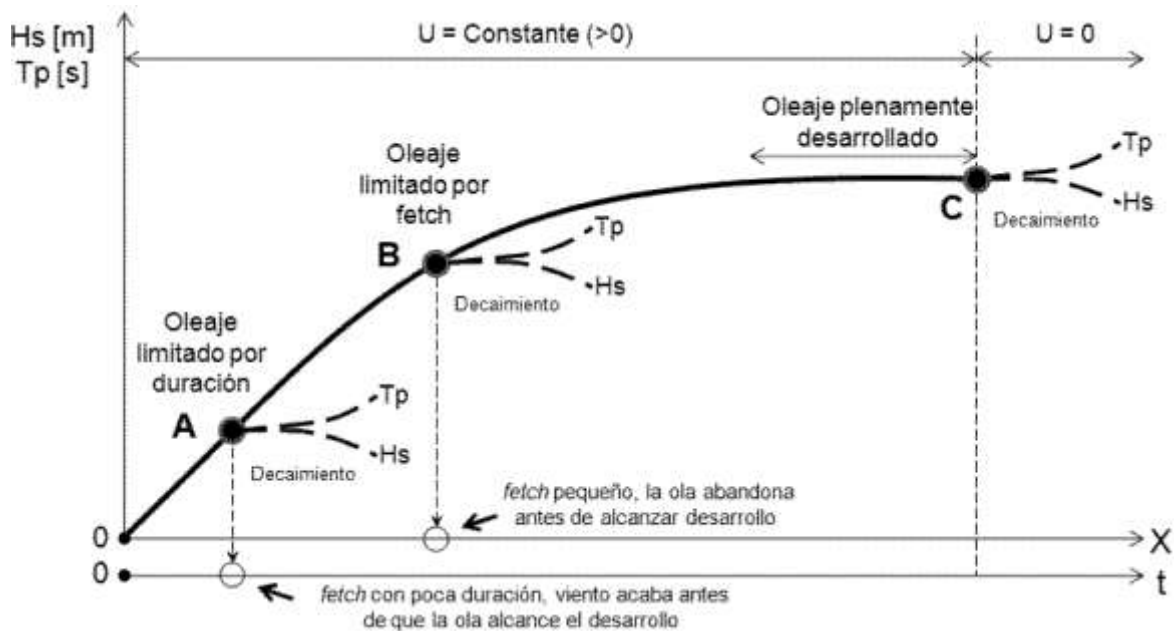


Figura 4. Formación de tipos de oleaje según características de generación.
(Elaboración Propia)

La estimación de los parámetros de altura significativa espectral (H_{m0}) y periodo *peak* espectral (T_p) (descritos en la sección 3.1.3.3) generados bajo cierta condición de duración y tamaño de *fetch* y velocidad de viento pueden ser realizada por las formulaciones propuestas por Hasselmann *et al* en 1973 (UNICAN 2000), para un determinado tamaño de *fetch* (X):

$$H_{m0} = 1.6 \cdot 10^{-3} \left(\frac{U^2}{g} \right) \left(\frac{gX}{U^2} \right)^{0.5} \quad T_p = 0.286 \left(\frac{U}{g} \right) \left(\frac{gX}{U^2} \right)^{0.33}$$

O para una determinada duración de *fetch* (t)

$$H_{m0} = 8.033 \cdot 10^{-5} \left(\frac{U^2}{g} \right) \left(\frac{gt}{U} \right)^{5/7} \quad T_p = 5.95 \cdot 10^{-2} \left(\frac{U}{g} \right) \left(\frac{gt}{U} \right)^{3/7}$$

Siendo U la velocidad del viento a 10 [m] de altura corregida de la forma:

$$U = 0.71 (U_{10})^{1.23}$$

Las formulación para un determinado tamaño de *fetch* considera implícitamente una duración superior al que tarda el oleaje en atravesar su extensión, generando un oleaje limitado por *fetch*, mientras que la formulación para una determinada duración considera un *fetch* lo suficientemente grande tal que el oleaje no salga de él antes de que el viento deje de actuar, generando un oleaje limitado por duración.

Para ambos casos se impone un valor máximo del parámetro, equivalente al oleaje plenamente desarrollado, definido por las ecuaciones:

$$H_{m0} = 0.243 \left(\frac{U^2}{g} \right) \quad T_p = 8.134 \left(\frac{U}{g} \right)$$

En el caso que se requiera conocer los parámetros de oleaje ante una condición de viento, conociendo el tamaño y duración del *fetch*, estos corresponderán al de menor valor entre ambos métodos, los cuales pueden ser obtenidos de las curvas mostradas en la Figura 5.

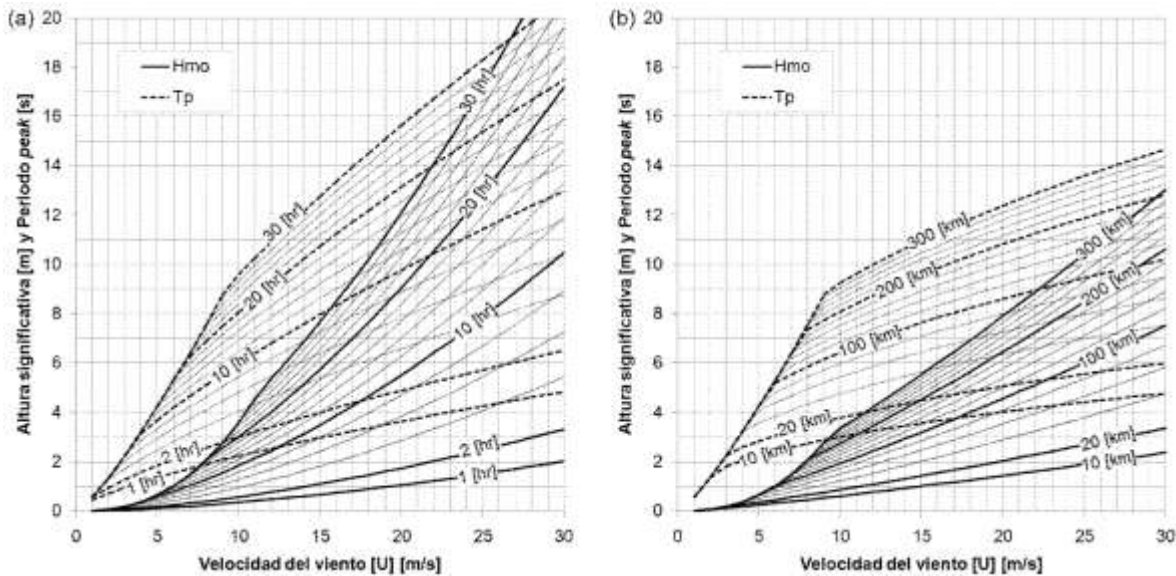


Figura 5. Crecimiento del oleaje por viento según duración (a) y longitud (a) de *fetch*. (Elaboración propia)

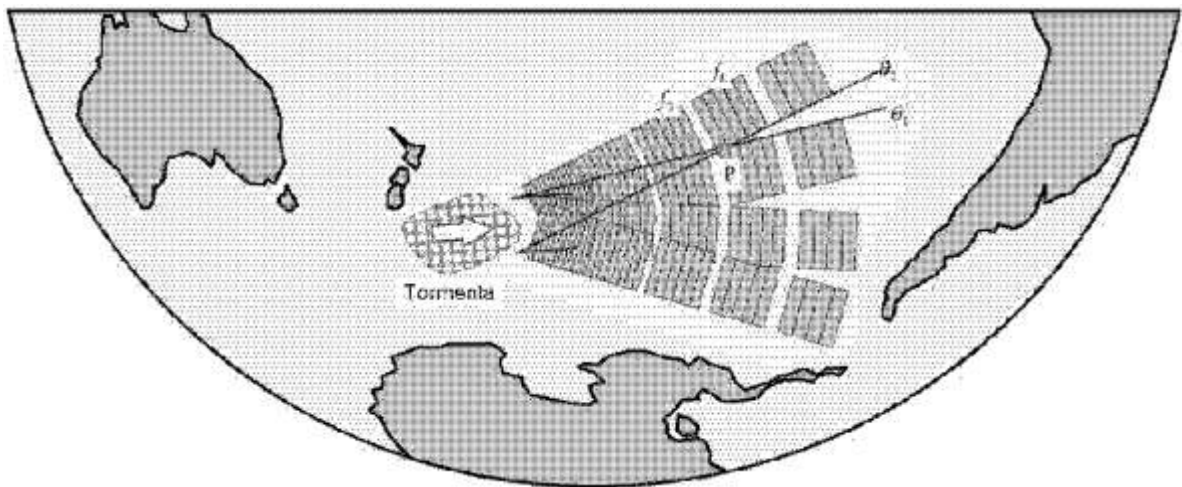
Resulta clave señalar que los parámetros determinados corresponden a un resumen o condición principal del oleaje generado (tratado en detalle en la sección 3.1.3.3), ya que el proceso de generación no es uniforme dada la presencia de rachas, cambios de dirección del viento y efectos de superposición de ondas, las que cambian las áreas individuales del oleaje en las que el viento actúa, por lo que el oleaje resultante tiene una alta diversidad de periodos, alturas y direcciones. Este oleaje altamente caótico y disperso es ordenado una vez que abandona la zona de generación por efecto de la propagación en el océano, aspecto que se trata a continuación.

3.1.2.2 Propagación oceánica: dispersión y clasificación

Una vez que el oleaje abandona la zona de generación, la propagación se realiza de manera distinta entre ondas dependiendo de las características que posean. Por un lado, al tener el oleaje variados periodos y celeridades, algunas ondas viajan más rápido que otras, generándose un ordenamiento del oleaje en la medida que se aleja de la zona de generación, el cual es denominado *dispersión radial*. Por otro lado, la *dispersión direccional* produce una separación de las ondas conforme se propagan en la dirección de salida desde la zona de generación.

Si se considera un punto de control en una zona alejada de la zona de generación (P), como el descrito en la Figura 6, se observarán los efectos de la dispersión radial y direccional, ya que las frecuencias del oleaje variarán de f_1 a f_2 en una ventana de tiempo, mientras que la dirección incidente solo se limitará al rango $\theta_1 - \theta_2$, produciendo un oleaje con un rango acotado de dirección de incidencia y de periodo, por lo que visualmente se advierte un oleaje muy ordenado y con ondas muy similares unas con otras.

Este efecto requiere de una extensión considerable para que se manifieste con claridad, lo cual puede ser cuantificado con relativa sencillez si se consideran las celeridades de dos ondas (calculadas con TLO, UNICAN 2000) que parten juntas con periodos de 6 [s] y 13 [s]. Estas requieren de 190 [km] aproximadamente para que lleguen con 3 horas de diferencia (considerando la duración de un estado de mar, ver sección 3.1.3.1), por lo que en una extensión menor, del orden de 100 [km] (radio de 50 [km]), las características del oleaje son relativamente equivalentes.



**Figura 6. Dispersión direccional y radial del oleaje.
(Adaptado de Holthuijsen 2007)**

Considerando lo anterior, se observarán dos tipos de oleaje dependiendo de la distancia en que se encuentre el observador de la zona de generación. El *Mar de Viento* o *Sea* (Figura 7b) observado en las cercanías de la zona de generación, característicamente caótico, con variadas direcciones, periodos y alturas; y el observado en un punto distante, ordenado por la dispersión radial y direccional, denominado *Mar de Fondo* o *Swell* (Figura 7a, Silva 2005).

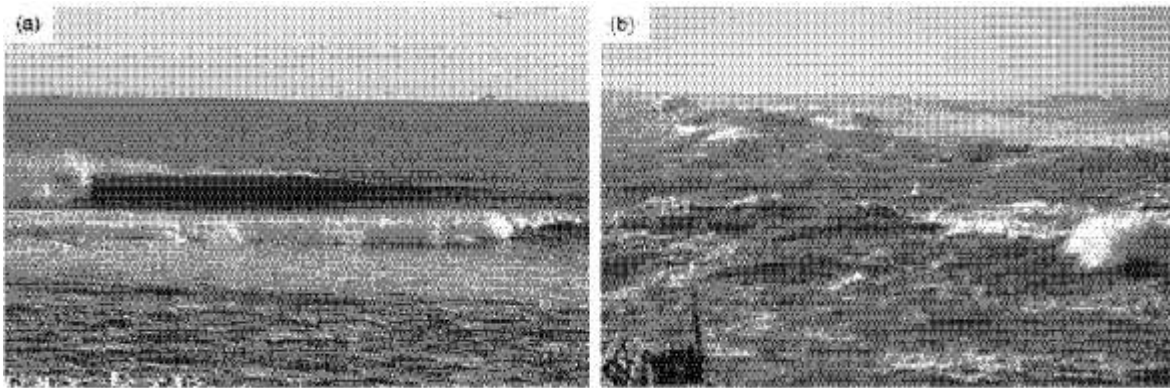


Figura 7. Oleaje tipo Swell (a) y Sea (b).
(Silva 2005)

3.1.2.3 Profundidad relativa y propagación costera

En la medida que el oleaje se aproxima a la costa, sufre perturbaciones debido a que interactúa con el fondo (Figura 8). Dado que la profundidad de inicio de la perturbación es relativa a la longitud de la ola, se establece el término *profundidad relativa* como indicador del grado de perturbación de una ola, siendo equivalente al cociente entre la profundidad de la columna de agua y la longitud de ola (d/L). La profundidad relativa $d/L = 0.5$ es el límite en el cual una profundidad relativa menor indica oleaje perturbado y mayor a este valor indica oleaje no perturbado o en condición de *aguas profundas*. En la zona de oleaje perturbado, se genera la separación entre la condición de *aguas intermedias* y *aguas someras*, separados por la profundidad relativa $d/L = 0.05$ debido a que en la última los desplazamientos orbitales en la columna de agua son uniformes en la vertical, mientras que la primera es una zona de transición (UNICAN 2000).

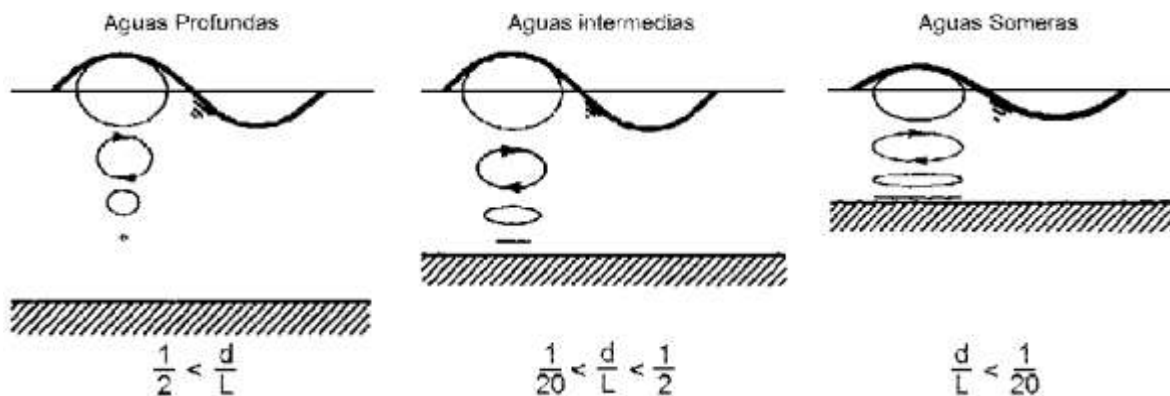


Figura 8. Profundidades relativas del oleaje.
(Adaptado de UNICAN 2000)

Las perturbaciones del oleaje por interacción con fondo son estudiadas por diversos autores, presentándose algunos fenómenos como el *asomeramiento*, *refracción*, *difracción* y *reflexión*.

El *asomeramiento* o *shoaling* corresponde al proceso por el cual el oleaje comienza a deformarse por la interacción con el fondo. Destaca en este proceso la disminución de la longitud y celeridad de la ola conforme lo hace la profundidad, provocando con ello el peraltamiento de la ola o bien el incremento de la altura. Es posible visualizar exclusivamente este fenómeno cuando la dirección de incidencia del oleaje es ortogonal a los veriles.

La tridimensionalidad del fenómeno implica que en la mayoría de los casos la dirección de incidencia del oleaje no coincide con la ortogonal de los veriles de fondo, provocando un giro del frente de ola tendiente a disminuir dicho ángulo. Este fenómeno, conocido como refracción, induce en el oleaje disminuciones de la altura y variaciones de la dirección de incidencia del oleaje conforme se acerca a la costa. Este fenómeno es imposible de visualizar de manera exclusiva en el oleaje, ya que siempre se manifiesta junto al asomeramiento, dados los cambios de profundidad en la propagación.

Cuando en la trayectoria del oleaje surge la presencia de obstáculos como rocas, salientes o penínsulas, se manifiestan la difracción y la reflexión. El primero corresponde al proceso por el cual el oleaje transfiere energía de manera lateral a la zona de sombra producida por el obstáculo, reduciendo notoriamente la altura de ola, mientras que el segundo corresponde a la porción de oleaje, que luego de impactar el obstáculo, retorna en otra dirección. La apreciación exclusiva de ambos fenómenos se produce en condición de propagación sin cambio de profundidad (fondo horizontal), pero, a pesar de que ambos siempre se manifiestan juntos, generalmente estos no se superponen, sino que actúan en sectores diferentes.

Todos estos fenómenos (Figura 9) han sido representados por ecuaciones y modelos numéricos que permiten obtener la condición de oleaje en cualquier punto de la trayectoria del oleaje hasta la costa (para mayor detalle de los fenómenos y las formulaciones involucradas se recomienda revisar UNICAN 2000 y Goda 2000).

No obstante lo anterior, las perturbaciones por fondo u obstáculos dan al oleaje una baja representatividad espacial, ya que cada sector costero tiene características físico-batimétricas muy diferentes. Por el contrario, un oleaje en la zona de aguas profundas no sufre mayor variación que la inducida por el ordenamiento de frecuencias y dirección, la que puede considerarse despreciable en un radio del orden de 50 km según lo revisado en la sección 3.1.2.2.

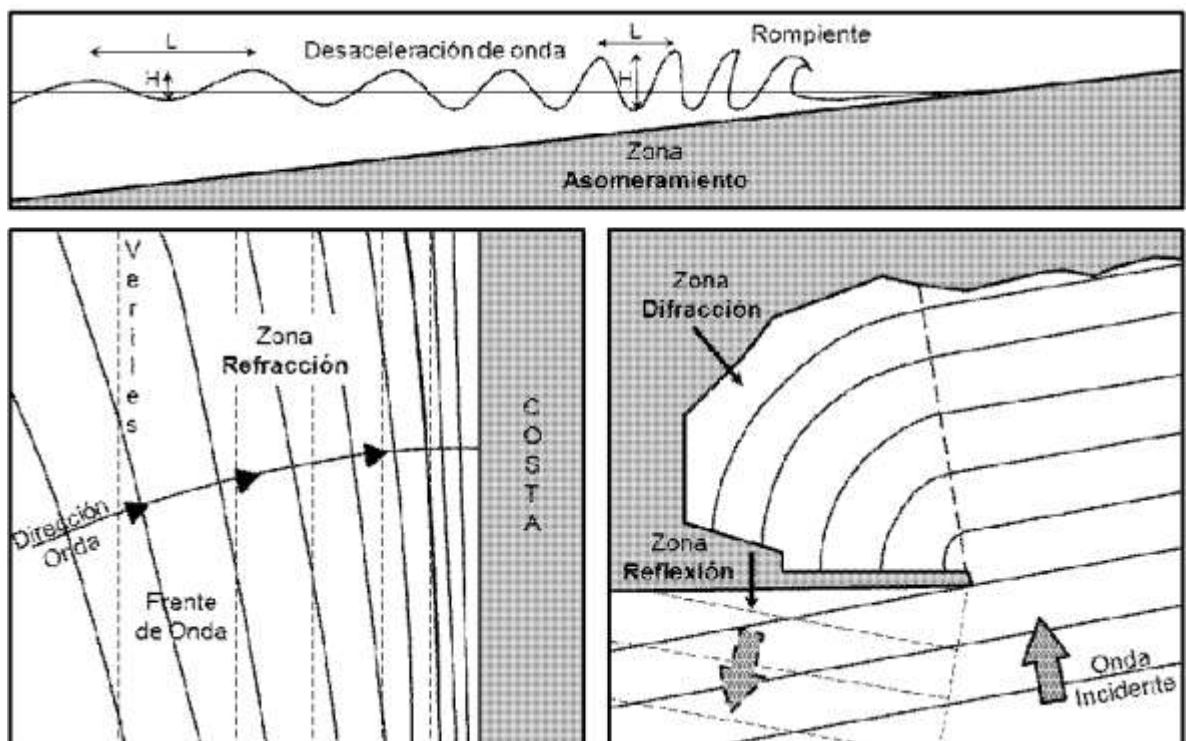


Figura 9. Descripción de fenómenos perturbadores del oleaje.
(Adaptado de Holthuijsen 2007)

3.1.3 CARACTERIZACIÓN DEL OLAJE

3.1.3.1 Registro de oleaje y el estado de mar

La caracterización del oleaje se realiza a través de mediciones de las desnivelaciones de la superficie del mar, las cuales pueden ser obtenidas por medidores de resistencia, equipos acústicos o sensores de presión (Silva 2005) utilizando una frecuencia de muestreo generalmente de 2 [Hz]. Sin embargo, dada la limitada capacidad y energía que poseen los instrumentos de medición, no es practicable el registro permanente de las desnivelaciones en el tiempo, ya que se requiere que su permanencia en terreno sea la máxima posible para disminuir los costos asociados a la extracción y reposición. Realizando un pequeño cálculo, un instrumento con una frecuencia de muestreo de la desnivelación de 2 [Hz], al cabo de 1 día deberá almacenar 172800 datos y al mes más de 5 millones. Dado lo anterior, resulta altamente conveniente el uso de alguna metodología que permita realizar registros de menor duración representativos de ciertos intervalos de tiempo bajo ciertas suposiciones, lo que a la postre incrementa la permanencia del instrumento en terreno.

Para tal efecto se define un intervalo de tiempo denominado *Estado de Mar*, el cual se supone *estacionario* y *ergódico*, esto es, las desnivelaciones en dicho intervalo tienen media y varianza constante (estadística uniforme) y que cualquier sub intervalo es representativo del intervalo total.

En el caso de Chile el estado de mar está definido según la publicación N° 3201 del SHOA (2005) con una duración de 3 horas y los registros de muestreo con duración no menor a 18 minutos. Con esto, la cantidad de información almacenada en un mes con registro permanente, se alcanza en 10 meses considerando el uso del estado de mar, implicando un ahorro del 90% de la memoria.

La definición del estado de mar permite caracterizar el oleaje como series de tiempo con datos cada tres horas, los cuales son obtenidos del registro de desnivelaciones de cada estado de mar mediante un *Análisis en el dominio del tiempo* o un *Análisis en el dominio de la frecuencia*, métodos que son descritos a continuación.

3.1.3.2 Análisis en el dominio del tiempo

Esta metodología considera analizar, del registro, las desnivelaciones que se producen en el tiempo definiendo secuencialmente la presencia de olas, obteniéndose la altura como la diferencia entre las desnivelaciones de la cresta y el valle, mientras que el periodo se obtiene del conteo de datos de desnivelaciones de la ola multiplicado por la frecuencia de muestreo (ver Figura 10). Este proceso permite obtener el listado de las olas presentes en la extensión del registro en su orden secuencial, a partir del cual se realizan ajustes de distribución por parámetro, los que finalmente caracterizan el estado de mar.

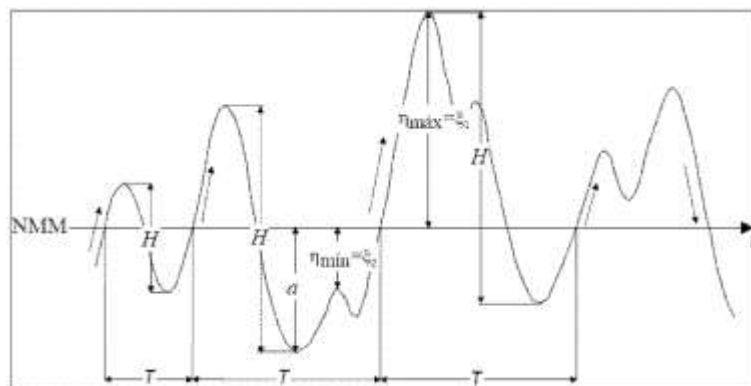


Figura 10. Registro de oleaje y su caracterización.
(Silva 2005)

Algunos de los parámetros usados son las alturas media, cuadrática media, significativa y máxima; y los periodos medio, máximo, significativo, etc. (Revisar Silva 2005 y Liu & Frigaard 2001).

Esta metodología ofrece un gran avance en cuanto a la descripción de oleaje con ahorro de información, sin embargo produce pérdida de información importante como la naturaleza del oleaje medido así como su dispersión direccional y frecuencial dentro del estado de mar. Esta información puede ser mantenida aun reduciendo la cantidad de información que tiene un registro, mediante la descripción espectral del oleaje.

3.1.3.3 Análisis en el dominio de la frecuencia

El principio que opera en esta metodología es el supuesto de que un registro de oleaje es consecuencia de la superposición de varias ondas que tienen una amplitud, periodo y dirección constante, tal como lo muestra la Figura 11:

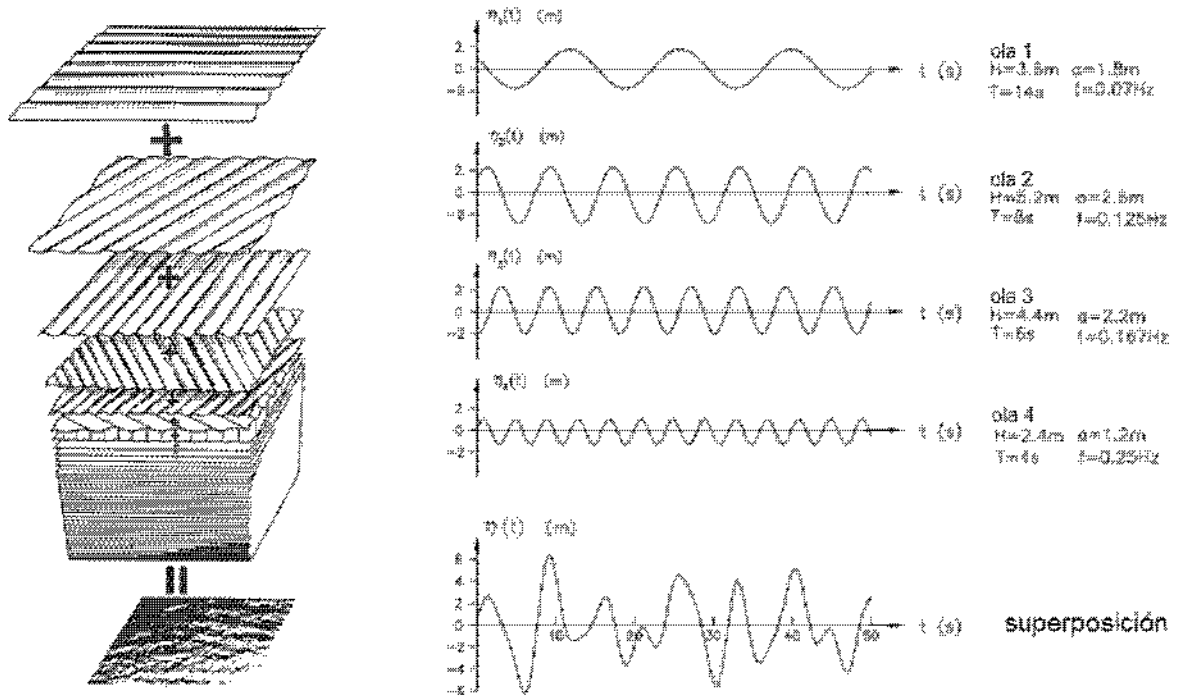


Figura 11. Descripción de teoría de superposición de ondas.
(Adaptado de Ochi 1998 y Liu & Frigaard 2001)

El desafío que plantea esta metodología es la identificación de cada una de las ondas a partir de las desnivelaciones del registro, sin embargo el análisis por series de Fourier permite sobrellevar esta labor. En el análisis posterior, el tradicional uso de la altura (H) y periodo (T) de ola es reemplazado por el uso de la energía (E) y frecuencia (f) de cada onda que son función de las primeras según la forma:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad f = \frac{1}{T}$$

De esta forma se realiza el ordenamiento de las ondas en un gráfico tridimensional teniendo por abscisas la frecuencia y dirección y por ordenada la energía, conformando el denominado *espectro de energía*, como el presentado en la Figura 12.

La descripción espectral de oleaje permite identificar las componentes de oleaje presentes en un estado de mar, compuesto por *sea* y *swell*. Este detalle de información permite contar con un buen balance entre volumen y detalle de información, lo que constituye una buena ventaja sobre la caracterización en el dominio de la frecuencia, que privilegia el bajo volumen de información por sobre el detalle ofrecido.

Ahora bien, tal como en el análisis en el dominio del tiempo, también es posible caracterizar el estado de mar a partir de parámetros de resumen espectrales, los cuales pueden representar el estado de mar completo o bien pueden ser separados por las componentes energéticas presentes en el espectro como *sea* o *swell*. Con todo, los parámetros utilizados describen la energía de la componente de interés a través de la altura significativa espectral (H_{m0}), el punto de mayor energía del espectro mediante el periodo *peak* (T_p) y dirección *peak* (Dir_p) o bien la medianía energética del espectro mediante el periodo medio (T_m) y dirección media (Dir_m). (Para mayor información revisar Silva 2005 y Liu & Frigaard 2001).

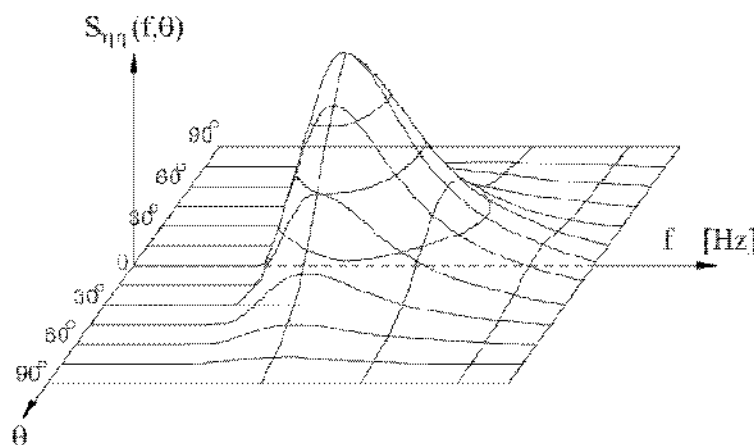


Figura 12. Espectro de energía de oleaje.
(Liu & Frigaard 2001)

3.1.3.4 Estadística de oleaje

Un estudio de oleaje tiene por finalidad conocer los valores típicos que alcanza este fenómeno en un lugar de interés, y estos valores tienen que ver con las condiciones medias o de mayor ocurrencia en el tiempo y las severas o extremas, que tienen baja ocurrencia. Ambos son denominados *oleaje reinante* y *oleaje dominante* respectivamente (UNICAN 2000).

Esta caracterización es realizada a partir de la estadística de oleaje obtenida de los estados de mar, la cual puede estar representada por parámetros de resumen o espectros. Sin embargo, es necesario que la estadística tenga una extensión tal que permita identificar tanto ciclos mensuales, anuales y/o interanuales como una serie de tormentas significativas que permitan prever una situación extrema futura en el lugar de interés. Al respecto, la publicación N° 3201 del SHOA establece que la duración mínima de la estadística para caracterizar adecuadamente el oleaje es de 20 años.

Sin embargo, resulta muy dificultoso poder contar con estadística de tal extensión (particularmente en Chile), ya que por un lado el bajo número de instrumentos disponibles hace difícil que se encuentre uno disponible precisamente en el lugar de estudio, y por otro, al ser estos relativamente nuevos los registros no son lo suficientemente extensos.

Dada esta complicación, se desarrollan modelos de escala global que estiman el oleaje a partir de estadística de viento (fenómeno mejor representado espacial y temporalmente) obteniendo así las condiciones de oleaje contemporánea a esta en distintos puntos del globo en la condición de aguas

profundas. Estos modelos se denominan modelos de *hindcasting* de oleaje, y se tratan con mayor detalle en el capítulo 3.1.4.

De esta forma, al contar con estadística de larga duración en aguas profundas, basta realizar una propagación por métodos de gabinete o computacionales hasta el lugar de interés, para realizar luego los estudios que caractericen los oleajes reinante y dominante mediante el estudio de clima medio y clima extremo respectivamente.

3.1.3.5 Clima Medio de oleaje

El clima medio de oleaje tiene por fin describir la condición característica que presenta el oleaje en un lugar de interés. En este proceso se describe tanto el comportamiento que presenta cualquiera de los parámetros seleccionados así como su ocurrencia conjunta con otro parámetro.

En el análisis individual por parámetro se busca identificar la distribución de valores que alcanza el parámetro, el rango de mayor frecuencia, además de los máximos y mínimos. Para este efecto se confeccionan gráficos de frecuencia relativa y acumulada, este último también llamado *probabilidad de no excedencia* (Figura 13a).

En el análisis de ocurrencia conjunta entre parámetro se busca encontrar la distribución conjunta, tanto en sus valores más frecuentes así como en el rango de valores de un parámetro en el que otro parámetro presenta sus valores máximos. Recurrentemente para estos efectos son utilizadas la tabla y rosa de incidencia (Figura 13b y Figura 13c respectivamente).

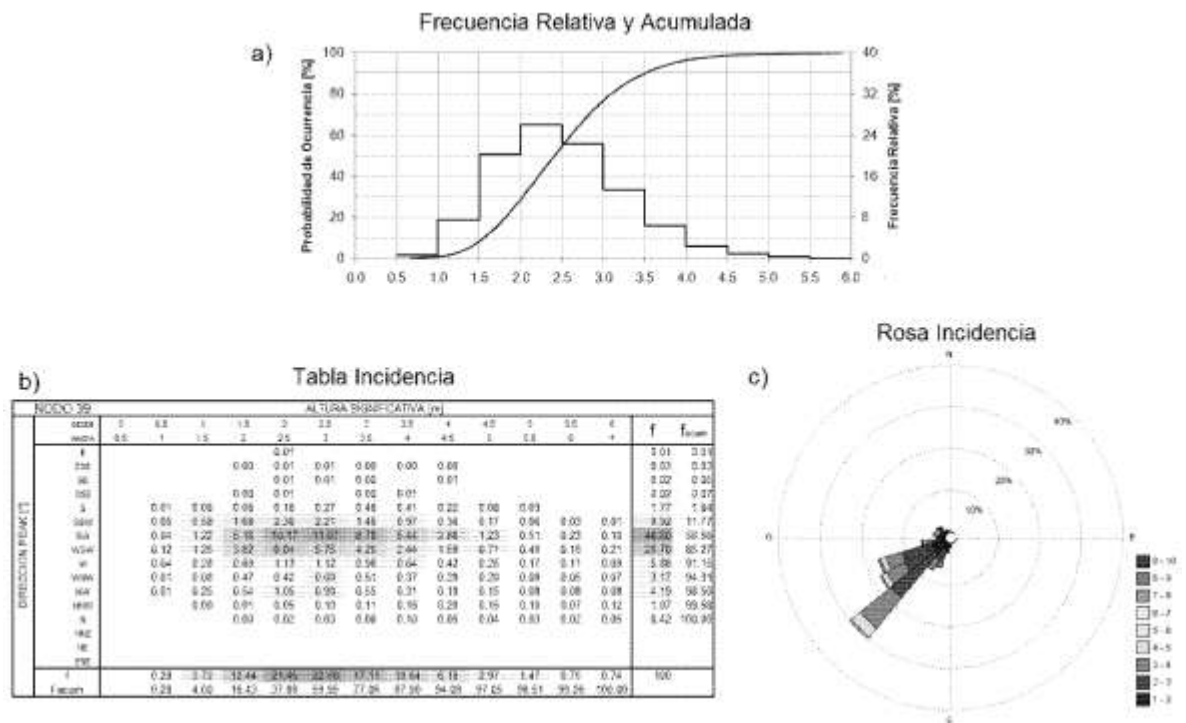


Figura 13. Herramientas gráficas y estadísticas que describen el clima medio de oleaje. (Elaboración Propia)

3.1.3.6 Clima Extremo de oleaje

El clima extremo de oleaje tiene por objetivo prever las condiciones de mayor energía que este pueda presentar en algún horizonte esperado, normalmente en el largo plazo. El proceso consiste en seleccionar los eventos de oleaje de mayor energía de una estadística y ajustarle una función de distribución que permita estimar el valor más probable de energía que alcanzará el oleaje asociado a una probabilidad de ocurrencia.

Las condiciones de mayor energía (extremas) se presentan en pocas ocasiones en el año, y están asociadas a la presencia de temporales de viento, por lo que las condiciones de oleaje comienzan a crecer desde las condiciones medias hasta un punto de máxima energía, decreciendo luego a las condiciones de oleaje medio cuando el temporal finaliza. Así, se considerará un evento a aquella condición de oleaje que parte del clima medio, alcanza el máximo y finaliza volviendo al clima medio. Este proceso por lo general dura del orden de un par de días y son más frecuentes en época invernal. La ocurrencia de temporales simultáneos o el refortalecimiento de uno a punto de desaparecer provoca en ciertas circunstancias que un evento posea dos o más puntos máximos. No obstante, para cualquier caso un evento se caracteriza por el estado de mar de mayor energía.

En la actualidad son utilizados dos métodos de selección de datos, los valores *máximos anuales* y los *valores sobre un umbral*. El primero consiste en tomar solamente aquellos máximos por año mientras que el segundo define un valor límite y selecciona todos aquellos eventos cuyo máximo supere ese límite (ver Figura 14a). La ventaja de la selección de máximos anuales es la representatividad de la muestra sobre el universo, asegurando la uniformidad de la frecuencia entre los datos, sin embargo desprecia los eventos secundarios de un año que puede tener mayor energía que el máximo de otro año (en Figura 14a, diferencia entre año 4 y 5) no asegurando los máximos valores presentes en la estadística. Por el contrario la selección de valores sobre un umbral asegura el uso de los mayores eventos presentes en la estadística, pero no asegura la uniformidad en la frecuencia de la muestra (en Figura 14a, el año 5 no aporta estadística).

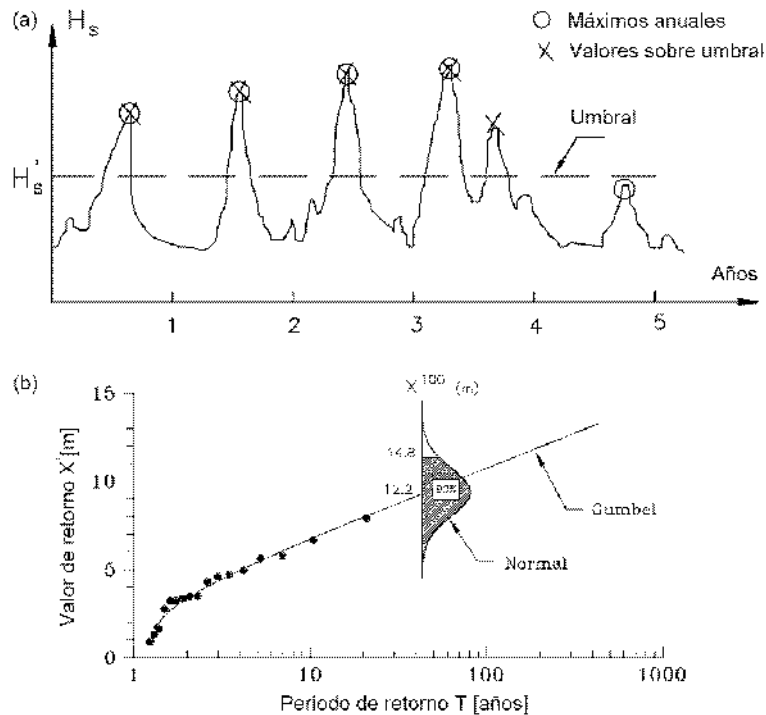


Figura 14. Ejemplo selección datos extremos de una serie (a) y ajuste de distribución (b).
(Adaptado de Liu & Frigaard 2001)

La estadística de valores máximos se ordena de mayor a menor y se le asignan probabilidades según la cantidad de datos obtenidos y la posición relativa de cada uno. Finalmente se realiza el ajuste de una función de distribución linealizada a los datos para obtener las constantes que mejor ajustan dicha función a los datos extremos. Dado que la función de distribución depende de la probabilidad del valor extremal, la probabilidad es asociada al periodo de tiempo más probable en el cual ocurra 1 evento de esas características, el cual es denominado *periodo de retorno*. De esta forma, la función ajustada indica el valor extremo más probable para el periodo de retorno escogido, punto en el cual se puede ajustar una distribución normal que describa una banda de confianza de interés, tal como se describe en la Figura 14b.

Para mayor detalle del proceso y las funciones de distribución involucradas se recomienda utilizar el libro “*Generation and analysis of random waves*” de Liu & Frigaard (2001).

3.1.4 MODELOS DE *HINDCASTING*

Un estudio de oleaje requiere contar con estadística extensa que permita identificar tanto ciclos como eventos extremos. Sin embargo, por lo general el lugar de interés no dispone de estadística, y los que sí, no poseen la extensión generalmente requerida (20 años o más). Esto se debe a que el estudio del fenómeno oleaje comienza recién desde la II guerra mundial (Silva 2005), por lo que la instrumentación requerida para su estudio es de reciente desarrollo, alto costo y escasa, concentrándose solamente en la cercanía de grandes puertos y zonas urbanas. Por el contrario, el viento es un fenómeno que ha sido estudiado desde los antiguos navegantes hasta la aeronáutica moderna, por lo que se dispone de información más detallada espacial y temporalmente.

Dada esta condición, y considerando la función del viento en la generación del oleaje, se han desarrollado estudios y modelos numéricos que utilizan la extensa estadística de viento para reproducir el oleaje generado por éste en el océano, siendo estos modelos validados por las mediciones de oleaje más cortas existentes. De esta forma es posible contar con estadística de oleaje en lugares y periodos en los que no existen mediciones. Este proceso de reconstrucción hacia al pasado se conoce como *Hindcasting de oleaje*.

3.1.4.1 Fundamento teórico

El desarrollo de estos modelos tiene como eje fundamental la consideración del oleaje como la sumatoria de varias ondas distintas entre sí con periodo, amplitud, fase y dirección constante (Visto en el capítulo 3.1.3.3). Esto implica que el modelo debe ser capaz de determinar cada una de estas componentes, en las que el espectro de energía $E(f, \theta)$ se considera que varía en el tiempo y el espacio ($E(f, \theta; x, y, t)$), implicando un transporte de energía (P) dependiente de la celeridad de grupo (c_g , UNICAN 2000), de la forma:

$$P = c_g E$$

La determinación de las componentes del oleaje se realiza utilizando un enfoque Euleriano consistente en la confección de una grilla en la zona de estudio (como el de la Figura 15), que dependiendo de la extensión puede ser descrita como un sistema cartesiano o bien uno latitud-longitud. El proceso consiste en evaluar la condición de oleaje existente en un nodo de interés, los aportes por propagación de los nodos contiguos y los aportes o disipación de energía producto del viento y la propagación del oleaje en dicho nodo. Todo esto se encuentra descrito por la ecuación:

$$\frac{\partial E(f, \theta; x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} E(f, \theta; x, y, t)}{\partial y} = S(f, \theta; x, y, z)$$

En donde en la primera componente del lado izquierdo de la ecuación corresponde a la evolución local del espectro en el tiempo, el segundo y tercero corresponden a la variación de oleaje por efectos de propagación en el eje x e y respectivamente, mientras que la componente del lado

derecho corresponde al denominado *término fuente*, que contiene todos los fenómenos que aportan o disipan energía del oleaje, descrito de la forma:

$$S(f, \theta; x, y, z) = S_r + S_{ff} + S_v + S_{nl} + S_{wc}$$

Los fenómenos contenidos en el término fuente son la disipación por rotura (S_r), la fricción de fondo (S_{ff}), el aporte del viento al oleaje (S_v), las transferencias no lineales entre componentes (S_{nl}) y la disipación por los *white-capping* (S_{wc}) que es el desmoronamiento de la cresta por efecto del viento (Svendsen 2006).

Si se considera que los modelos de *hindcasting* requeridos son en aguas profundas, se desechan la disipación por rotura y la fricción por fondo (S_r y S_{ff}), mientras que la celeridad de grupo bajo esta condición no depende de la posición, por lo que son constantes que salen de la derivación parcial, resultando la ecuación base de estos modelos:

$$\frac{\partial E(f, \theta; x, y, t)}{\partial t} + c_{g,x} \frac{\partial E(f, \theta; x, y, t)}{\partial x} + c_{g,y} \frac{\partial E(f, \theta; x, y, t)}{\partial y} = S_v + S_{nl} + S_{wc}$$

Dado que los fenómenos incluidos en el término fuente aún no se encuentran totalmente representados por la teoría, la aproximación empleada para resolverla indica el nivel de avance y precisión del modelo, siendo clasificados de primera, segunda y tercera generación, cuyas implicancias pueden ser revisadas con detalle en Holthuijsen 2007.

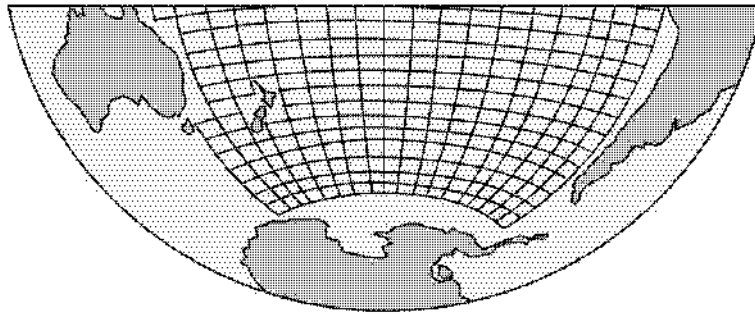


Figura 15. Trazado de grilla para un modelo *hindcasting*.

3.1.4.2 Validación y representatividad

La validez de los resultados obtenidos por los modelos de *hindcasting* es verificada mediante la comparación con series de mediciones en terreno en un punto y duración equivalente, las cuales pueden ser directas o indirectas. De esta última destaca la medición con altimetría satelital, que tiene por ventaja caracterizar grandes extensiones del océano, pero con baja representatividad temporal (2 mediciones diarias) y una menor precisión a la obtenida por métodos directos.

La validación en general consiste en realizar la comparación gráfica de ambas series por cada parámetro, además de los estadígrafos comunes utilizados en estos casos como el promedio, la desviación estándar y la correlación, y la comparación de las distribuciones presentadas por las frecuencias relativas y acumuladas.

El proceso de validación en aguas profundas requiere solo de algunos puntos de control en el dominio del modelo, ya que en la medida que dos puntos a una distancia aceptable y sin la presencia de obstáculos geográficos entre ellos se validen, no existen argumentos suficientes para suponer que otro punto cualquiera entre ellos no tendrá la misma condición de validez.

De esta forma, el modelo validado permite contar con estadística de oleaje confiable en puntos sin información histórica y con una extensión temporal y espacial adecuada.

3.2 EL OLEAJE EN LA COSTA CENTRAL DE CHILE

3.2.1 ORIGEN DEL OLEAJE DE LA COSTA CENTRAL DE CHILE

3.2.1.1 Zonas de generación y tipología del oleaje

En general, las principales zonas de generación de oleaje en el planeta se encuentran en torno a los 60° de latitud del hemisferio norte y sur, zona denominada *frente polar* (ver sub capítulo 3.3.2), en donde se presentan vientos que van de oeste a este. Ambas zonas son capaces de generar oleaje que se propaga por toda la extensión del océano Pacífico, llegando a las costas de Chile como oleaje tipo *swell* por efectos de la propagación (ver sección 3.1.2.2). Dado el ángulo de incidencia, se denominan *swell NW* (noroeste) y *swell SW* (suroeste) si provienen del hemisferio Norte y Sur respectivamente (ver Figura 16). Dada la cercanía con la zona de generación, el *swell SW* es el que domina la costa chilena todo el año, mientras que el *swell NW* se manifiesta principalmente en verano (invierno en la zona de generación) con baja altura y largo periodo.

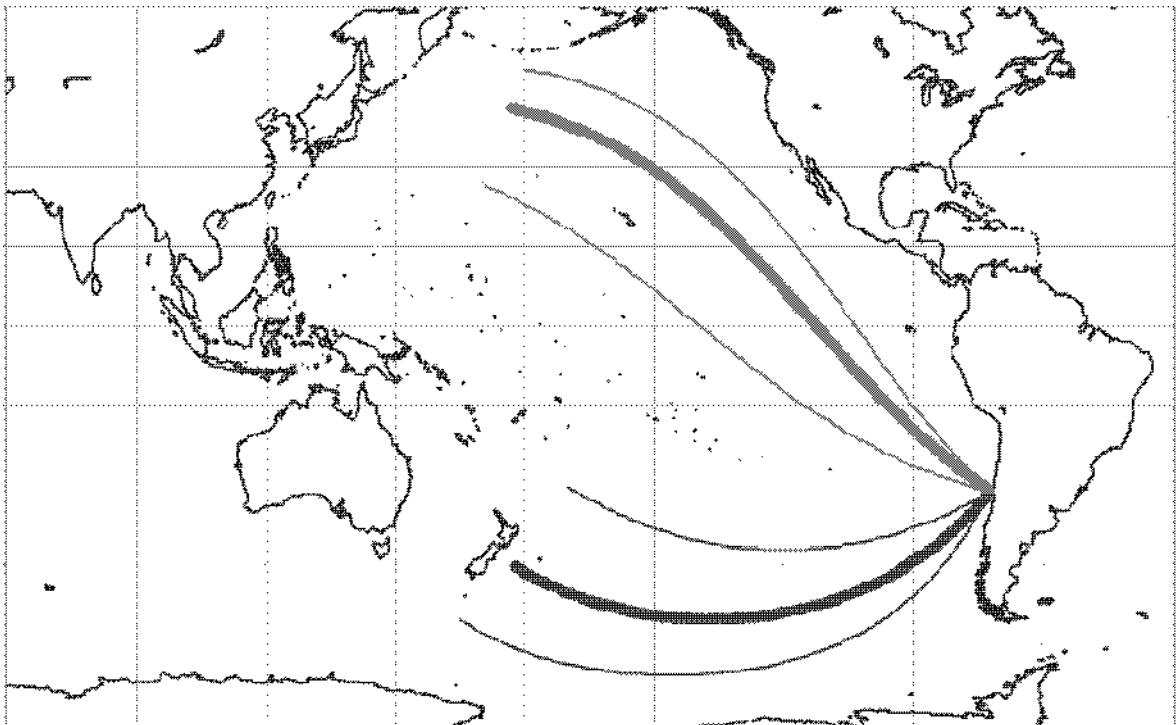


Figura 16. Propagación del swell norte y sur que llegan a la cuarta región (Latitud 31°S)
Se indica valor medio (línea gruesa) y percentiles 5% y 95% (línea fina).
(OCEANOR 2008a)

Los tiempos relacionados con la propagación del oleaje desde la zona de generación al punto de medición en la costa central de Chile pueden ser estimados a partir de la distancia y la celeridad de la onda, equivalente a $C = gT/2\pi$ si se considera la teoría lineal del oleaje (UNICAN 2000), donde se consideran cuatro puntos asociados a las distancias máximas y mínimas desde Chile a las zonas de generación por hemisferio y 3 periodos característicos. Los tiempos calculados se presentan en la Tabla 1, donde se consideraron las distancias a los extremos occidental y oriental de los frentes polares Ártico (cercano a Rusia y Estados Unidos respectivamente) y Antártico (cercano a Nueva Zelandia y Chile respectivamente) para los periodos 10 [s], 14 [s] y 18 [s]. El

oleaje generado en el hemisferio norte toma entre cuatro y casi nueve días en llegar a la costa central de Chile, mientras que el generado en el hemisferio sur, le toma de poco menos de uno a casi seis días.

Tabla 1. Tiempo (días) de propagación de una ola entre zona de generación y la costa central de Chile.

Zona de generación	Distancia media [km]	Periodo característico		
		10	14	18
		[s]	[s]	[s]
Extremo occidental del frente polar Ártico	12 000	8.9	6.4	4.9
Extremo oriental del frente polar Ártico	10 000	7.4	5.3	4.1
Extremo occidental del frente polar Antártico	8 000	5.9	4.2	3.3
Extremo oriental del frente polar Antártico	2 000	1.5	1.1	0.8

Además de lo anterior, se manifiesta también en la costa central de Chile el oleaje tipo *sea* generado por las depresiones que se desplazan hacia el norte desde el frente polar antártico en las cercanías de la costa de Chile (ver capítulo 3.3.3). Estos eventos ocurren característicamente en invierno con una intensidad significativa, mientras que en verano la intensidad y frecuencia decae. En ciertos eventos, el *sea* generado tiene mayor importancia que el *swell* SW, sin embargo su duración depende de la que alcance el sistema frontal, el cual por lo general es de algunos días.

La Figura 17 presenta tres espectros característicos tomados de información espectral del nodo 35°S (ver Figura 20), los cuales describen la existencia de las tres componentes que configuran el oleaje típico chileno. Destaca la presencia permanente del *swell* SW, que recurrentemente es acompañado con oleaje de generación local (*sea*) siendo más relevante en época invernal, mientras que en época estival suelen aparecer componentes energéticos relevantes provenientes del hemisferio norte (*swell* NW) que se encuentra en invierno.

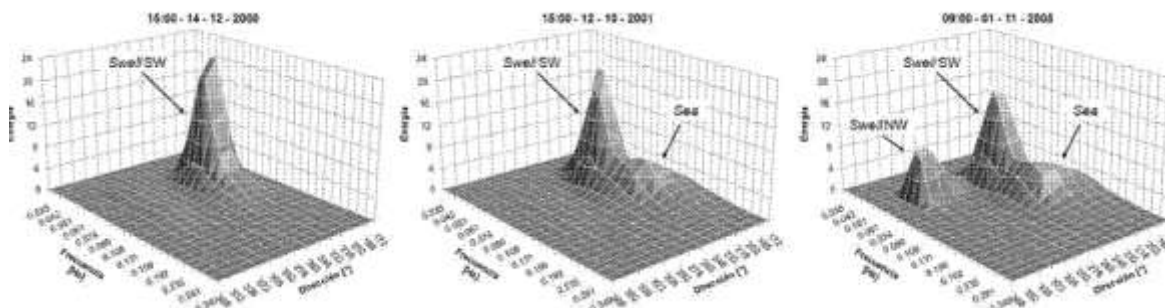


Figura 17. Espectros típicos de la costa central de Chile.
(Elaboración propia)

3.2.1.2 Fuente de la estadística

La estadística utilizada en el desarrollo de este proyecto ha sido facilitada gentilmente por la empresa HydroChile S.A. en el marco del convenio suscrito con la carrera de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso, Chile.

La estadística en cuestión fue adquirida por HydroChile S.A. a la empresa Fugro OCEANOR de Noruega, en el marco del proyecto “Estudio de evaluación del potencial de energía de oleaje entre las IV y X regiones, Chile” desarrollado por el Grupo de Ingeniería Civil Oceánica el año 2009.

La estadística de oleaje fue obtenida del modelo de *Hindcasting* WAM (*Wave Model*) ejecutado por el Centro Europeo para el pronóstico del tiempo en el mediano plazo (ECMWF por sus siglas en

inglés). La data consiste en 20 años (efectivos) de espectros fusionados a partir de dos modelos WAM: el ERA-40 y el *modelo operacional*.

El modelo ERA-40 (Ecmwf ReAnalysis 40 años) es un modelo WAM que utiliza la información de altimetría satelital de baja calidad y que presenta un deterioro de la misma en los 18 meses comprendidos entre diciembre de 1991 y mayo de 1993. Para ofrecer una estadística de la mayor calidad posible, la empresa OCEANOR ha decidido eliminar dos años completos de estadística entre mayo de 1991 y junio de 1993, finalizando este modelo el 28 de junio de 1998.

Por otro lado, el modelo operacional es un modelo WAM que utiliza más de 20 campañas de mediciones satelitales (ver Figura 18) y cuyo modelo se encuentra en constante perfeccionamiento (OCEANOR 2008a).



Figura 18. Línea de tiempo de altimetría satelital utilizada y de oleaje disponible. (OCEANOR 2008a)

En general la altimetría satelital presenta niveles aceptables de representatividad del oleaje en cuanto a la altura (ver Figura 19a), en donde la comparación es realizada con mediciones de altimetría a menos de 100 kilómetros y con desfase menor a 1 hora respecto a las mediciones realizadas con una boya.

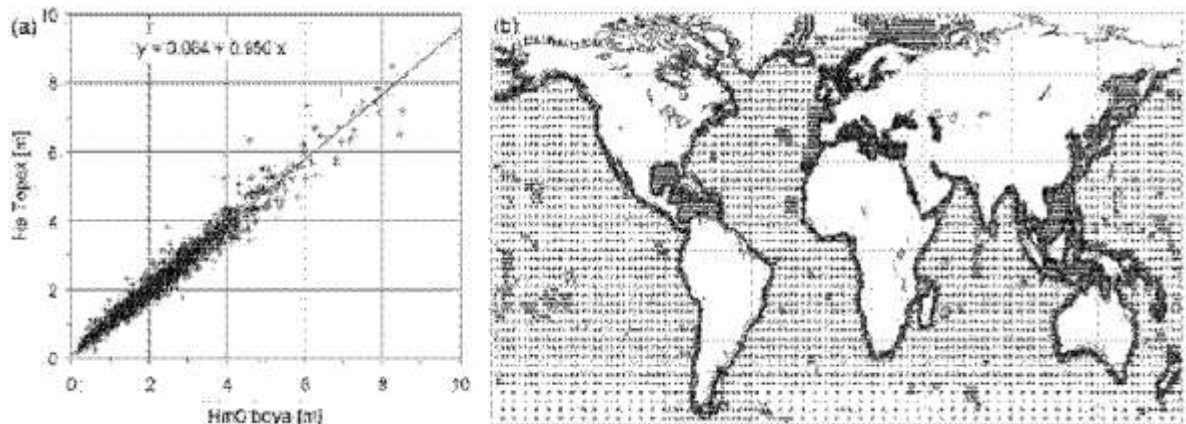


Figura 19. Correlación entre altimetría satelital proyecto Topex y mediciones con boya (a) y los puntos con estadística de oleaje calibrada (b). (OCEANOR 2008b)

Sin embargo, la altimetría satelital no es capaz de representar bien la dirección y periodo del oleaje, lo que implica una desventaja en comparación a la validación de un modelo con mediciones de una boya direccional, pero tiene la ventaja de tener mayor representatividad espacial, al abarcar prácticamente todo el globo.

El modelo ECMWF WAM estima el oleaje en la mayor parte del planeta, con puntos equiespaciados en el océano y con mayor resolución en las zonas costeras, según se muestra en la Figura 19b.

De este modelo se dispone de un set de 20 años de parámetros de resumen espectral y 6 años de espectro bidimensional (frecuencia y dirección) de oleaje en 4 puntos en aguas profundas cercanos a la costa central de Chile, denominados *nodos* y cuyas coordenadas son:

1. Nodo 31°S, ubicación 31°S 72°W.
2. Nodo 35°S, ubicación 35°S 73°W.
3. Nodo 37°S, ubicación 37°S 74.5°W.
4. Nodo 39°S, ubicación 39°S 74.5°W.

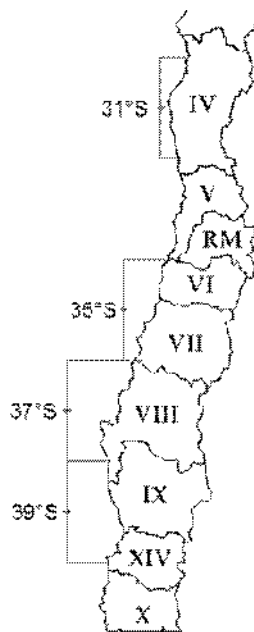


Figura 20. Ubicación de estadística disponible y representatividad latitudinal.
(Elaboración propia)

Dada la disponibilidad de la estadística se considera que los nodos tienen una representatividad latitudinal de 2° (alrededor de 222 [km]), aún cuando se ha determinado una distancia de 100 [km] como aceptable (según lo descrito en la sección 3.1.2.2). Con todo, el nodo 31°S es representante de gran parte de la IV región de Coquimbo, entre Tongoy y Los Vilos, mientras que la V región de Valparaíso es abarcada por la información del nodo 33°S que no se encuentra disponible en el presente estudio. El nodo 35°S representa la totalidad de las regiones VI del general libertador Bernardo O'Higgins y VII del Maule, mientras que el 37°S abarca la mayor parte de la costa de la VIII región del Biobío hasta la costa de Contulmo. El nodo 39°S, por último, abarca la porción sur de la VIII región, las regiones IX de la Araucanía y XIV de los Ríos hasta la punta Galera.

OCEANOR (2008a) realizó un estudio de calibración en las latitudes 31°S y 37°S, cuya descripción se presenta en la Figura 63 Anexo 9.1, y en donde destaca la alta correlación entre los valores de altura significativa espectral del modelo ECMWF WAM y la altimetría satelital empleada al ajustarse la regresión lineal.

La estadística de parámetros de resumen se extiende desde 1985 hasta 2006, presentando un *gap* (discontinuidad) entre 31 de mayo de 1991 y el 1 de junio de 1993. Los parámetros que presenta son altura significativa (H_{m0}), periodo *peak* (T_p), periodo medio (T_m), dirección *peak* (Dir_p), dirección media (Dir_m), periodo energético (T_{-10}) y periodo de cruces por cero (T_{02}), tanto para el estado de mar completo como para el *swell* y *sea*, cuya separación es el periodo 8 [s].

La información espectral se extiende entre el 20 de noviembre de 2000 y el 31 de diciembre de 2006 y los espectros se encuentran discretizados en 24 direcciones y 30 frecuencias.

De la información disponible en el presente estudio, solo se utilizarán los 20 años de parámetros de resumen de altura significativa (H_{mo}), periodo *peak* (T_p), periodo medio (T_m), dirección *peak* (Dir_p) y dirección media (Dir_m) por estado de mar, en los 4 nodos.

La utilización de dos periodos y dos direcciones radica en que al ser estos parámetros representantes de información espectral (más completa), se busca caracterizar de buena forma el estado de mar, ya que la información asociada al *peak* permite identificar solo la componente energética más importante, mientras que los parámetros medios también permiten considerar aquellas componentes energéticas que pueden ser relevantes, pero menores a la componente principal. Así, si los valores *peak* y medios son similares, se presenta un estado de mar con una única componente de energía (las demás son despreciables), mientras que si los valores *peak* y medios tienen diferencias entre sí, esto es señal de la presencia de una o más componentes energéticas, menores a la principal, pero importantes.

Para facilitar el tratamiento de la estadística, se ha dispuesto modificar las direcciones que sean menores a 90° sumándoles 360° . Esto evita generar perturbaciones en los estadígrafos y las series debidas al punto de origen de las mediciones. Con todo, las direcciones son menores a 400° .

A continuación se presenta el estudio de clima medio asociado a los parámetros seleccionados.

3.2.2 CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN LA COSTA CENTRAL DE CHILE (ANÁLISIS TRADICIONAL)

Para describir las características del oleaje, se confeccionaron curvas de probabilidad de ocurrencia y de frecuencia relativa por parámetro y nodo presentados en la Figura 21, Tabla 20 y Tabla 21 del Anexo 9.2. Además, se estimaron los principales estadígrafos por nodo y parámetro presentados en la Tabla 2, junto con la correlación entre nodos por parámetros en la Tabla 3.

La altura significativa (H_s) presenta valores mayoritariamente entre 1 y 4 metros (sobre el 90% del tiempo), con valores típicos entre 2 y 3 [m] (sobre el 45% de los casos). En cuanto a los valores máximos, las alturas se encuentran el 98% del tiempo por debajo de los 5 [m], llegando en ocasiones a superar los 8 [m] entre la VI y VIII región y los 9 [m] en la IX y XIV región. Por el contrario, el 98% del tiempo estas no bajan de 1 [m], alcanzando mínimos cercanos a 0.5 [m].

Latitudinalmente, la altura aumenta hacia el sur, manteniéndose este comportamiento en el valor medio (de 2.48 [m] a 2.89 [m]), en la desviación estándar (de 0.76 [m] a 0.96 [m]), en los mínimos, máximos y percentiles (ver Tabla 2). Esto último, se presenta en la frecuencia relativa, donde todos los nodos poseen una frecuencia muy similar de alturas entre 2.5 [m] y 3.0 [m], pero en las alturas mayores a este rango la frecuencia aumenta con la latitud, mientras que las alturas menores a 2.5 [m] la frecuencia es mayor hacia el norte. Aspecto que también se evidencia en la probabilidad de ocurrencia (frecuencia acumulada). No obstante, destaca de ambas curvas la gran similitud entre las distribuciones de los nodos 37°S y 39°S, generándose leves diferencias solo a partir del percentil 75.

Para el caso del periodo, la consideración del parámetro *peak* (T_p) y medio (T_m) manifiesta una clara diferencia en los valores alcanzados, siendo esto indicio de la presencia en Chile de estados de mar con más de una componente energética (característicamente bimodales), según lo descrito en el capítulo 3.2.1.1.

El periodo *peak* (T_p) presenta valores entre 10 [s] y 16 [s] cerca del 85% del tiempo, siendo sus valores típicos entre 12 [s] y 14 [s] (presente en torno al 45% de los casos). La estadística no supera los 16.4 [s] el 98% del tiempo, sin embargo hay periodos que casi alcanzan los 24 [s]. Por el contrario, se presentan valores mínimos superiores a 5 [s], siendo el 98% de los casos superiores a 7.4 [s].

En su comportamiento latitudinal, el periodo *peak* se presenta relativamente uniforme en la zona de estudio, siendo los valores medios entre 12.43 [s] y 12.56 [s]. Esto se advierte al observar la distribución de la probabilidad de ocurrencia, donde la diferencia máxima alcanzada entre nodos es de 0.96 [s]. Debido a lo anterior no se observa una relación directa con la latitud, sin embargo en general los periodos son mayores hacia el norte.

En cuanto a la frecuencia relativa, se observa que el nodo 31°S presenta las mayores frecuencias en periodos menores a 10 [s] y mayores a 13 [s], mientras que pasa a ser el menor entre estos periodos, lo que explica que la desviación estándar sea mayor hacia al norte, mientras que en latitudes mayores, el periodo *peak* presenta una uniformidad mayor. Con todo, las mayores diferencias porcentuales en la frecuencia relativa no superan el 4%.

En el caso del periodo medio, los valores mayoritariamente fluctúan entre 6 [s] y 12 [s] (cerca del 96% de los casos), teniendo frecuencias muy similares los rangos entre 7 [s] y 11 [s] con 20% promedio. En general, solo el 2% de los casos supera los 12 [s] llegando a valores máximos cercanos a 15 [s] y un caso que llega a los 20 [s] en el nodo 37°S. En contraposición, los valores mínimos llegan en torno a los 5 [s], siendo el 98% de la estadística superior a 6.3 [s].

Los valores medios latitudinales fluctúan entre 8.93 [s] en el nodo 31°S y 9.21 [s] en el nodo 39°S, respetando un incremento del periodo hacia el sur, tal como se manifiesta en las distribuciones de la probabilidad de ocurrencia, no obstante, al igual que en el periodo *peak*, las diferencias latitudinales son pequeñas.

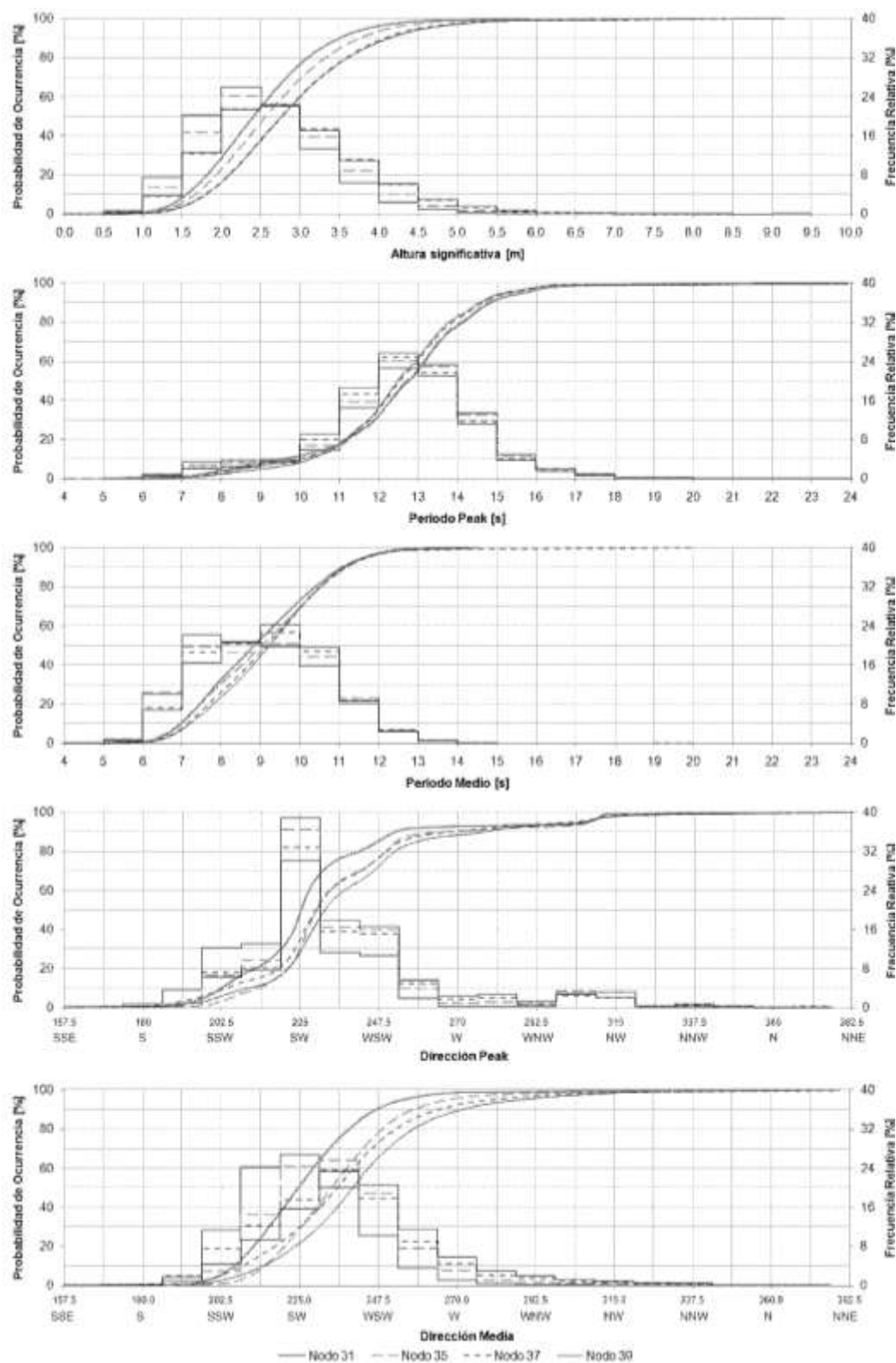


Figura 21. Probabilidad de Ocurrencia y frecuencia relativa por parámetro y nodo.
(Elaboración propia)

Tabla 2. Principales estadígrafos por parámetro y nodo.

Parámetro	Nodo	Media	σ	Min	Percentiles								Max
					P ₅	P ₁₀	P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅	P ₉₀	P ₉₅		
H _s [m]	31°S	2.48	0.765	0.67	1.37	1.55	1.92	2.41	2.95	3.50	3.85	5.89	
	35°S	2.65	0.829	0.54	1.45	1.66	2.05	2.56	3.16	3.76	4.12	8.04	
	37°S	2.86	0.912	0.06	1.56	1.79	2.21	2.76	3.40	4.07	4.51	8.47	
	39°S	2.89	0.959	0.51	1.56	1.79	2.21	2.76	3.43	4.14	4.62	9.16	
T _p [s]	31°S	12.54	2.090	5.36	8.25	9.52	11.55	12.76	13.78	14.83	15.67	23.94	
	35°S	12.56	2.003	4.99	8.47	10.02	11.59	12.70	13.73	14.77	15.63	23.94	
	37°S	12.43	1.929	5.06	8.47	10.02	11.44	12.52	13.57	14.63	15.29	23.94	
	39°S	12.43	1.836	5.44	8.98	10.23	11.43	12.48	13.53	14.58	15.19	23.94	
T _m [s]	31°S	8.93	1.572	5.19	6.63	6.96	7.65	8.82	10.09	11.07	11.62	14.53	
	35°S	9.04	1.619	5.07	6.58	6.94	7.70	9.02	10.25	11.17	11.68	14.31	
	37°S	9.15	1.528	5.02	6.78	7.14	7.93	9.15	10.26	11.15	11.67	19.96	
	39°S	9.21	1.485	4.92	6.83	7.20	8.07	9.23	10.27	11.12	11.65	14.29	
Dir _p [°]	31°S	229.4	26.239	163.7	197.3	202.5	216.5	225.2	234.8	252.1	306.3	362.9	
	35°S	236.9	26.222	174.0	204.9	213.0	223.4	229.6	246.0	264.1	307.8	369.3	
	37°S	234.9	28.041	158.5	195.4	203.4	221.6	229.3	246.1	267.3	303.4	376.9	
	39°S	238.7	28.833	97.0	200.3	209.5	223.6	231.8	248.8	277.4	306.5	400.5	
Dir _m [°]	31°S	226.0	16.855	183.3	202.0	206.3	214.1	224.5	236.1	246.7	254.1	349.9	
	35°S	235.9	18.610	186.9	210.8	214.9	223.1	234.1	245.6	257.3	266.8	359.7	
	37°S	237.0	23.630	166.4	202.2	208.6	221.6	235.7	248.7	264.7	279.0	379.2	
	39°S	242.4	24.520	132.5	207.2	214.4	227.2	240.2	253.6	271.7	288.6	379.6	

En cuanto a las direcciones, se presentan distintos comportamientos entre las distribuciones de los valores *peak* y medio, no obstante, no se manifiestan diferencias significativas en los valores alcanzados.

En el caso de la dirección *peak* (D_p), los valores fluctúan principalmente entre las marcas de clase SSW y WSW (entre 196° y 253° respectivamente) con frecuencia cercana al 75%, sin embargo presenta una clara concentración en la marca de clase SW (entre 219.5° y 230.5°) que va de 30% a 39% de los casos. En cuanto a los extremos, la estadística va desde los 160° a los 380° (20°), sin embargo solo el 2% de la estadística es inferior a 190° y el 98% menor a 315°. Con todo, la desviación estándar va de 26° a 29° en la zona de estudio.

Latitudinalmente, la dirección *peak* crece en su valor medio hacia el sur con valores entre 229° y 239°. En cuanto a la distribución de frecuencia relativa, las asociadas a las direcciones menores a la SW (inclusive) aumentan hacia el norte, contrario a lo que ocurre en las direcciones mayores al SW.

A pesar de tener baja frecuencia, las direcciones en torno al NW presentan un incremento respecto a las otras direcciones del cuadrante. Esto evidencia la presencia de componentes energéticas de distintas direcciones, ya sea mediante el *swell* NW o del sea. Esto último también se manifiesta en la distribución de la probabilidad de ocurrencia.

Para la dirección media (D_m), casi la totalidad se encuentra en el tercer cuadrante (cerca del 92%), donde los valores van entre 160° y 380°, con un 2% mayor a 300° y 98% mayor 200°. Latitudinalmente la dirección media tiene valor medio que aumenta hacia el sur partiendo de 226° en el nodo 31°S a 242° en el nodo 39°S. Comportamiento similar presenta la desviación estándar con valores entre 16° y 24°.

La marcada regularidad entre los nodos para la frecuencia relativa y la probabilidad de ocurrencia manifestada en los parámetros anteriores se pierde en la dirección media, presentándose diferencias mayores a 35% en una dirección. En este caso, en los nodos de menor latitud las

mayores frecuencias en torno al SW se acercan a la dirección sur (S), mientras que en los nodos de mayor latitud las mayores frecuencias en torno al SW se acercan a la dirección oeste (W).

En general, el comportamiento de los parámetros describe en baja latitudes predominan en el oleaje las alturas bajas y las direcciones hacia el sur, mientras que en altas latitudes predominan las alturas mayores y las direcciones hacia el oeste. En el caso del periodo, no se presentan diferencias importantes entre los nodos considerados.

Para evaluar de mejor forma la relación entre las series de parámetros de los cuatro nodos, se ha estimado la correlación en las distintas combinaciones, presentados en la Tabla 3, donde en general se observa que para dos nodos la correlación aumenta hacia el sur, mientras que la correlación disminuye en la medida que se distancian los nodos que se evalúan. Para todos los parámetros, la mejor correlación se presenta entre los nodos 37°S y 39°S (llegando a 0.96 en la dirección media), seguida de la existente entre el nodo 31°S y 35°S. Las peores se presentan entre los nodos 31°S y 39°S, 31°S y 37°S, y 35°S y 39°S.

Tabla 3. Correlación entre los 4 nodos para cada parámetro de oleaje.

Altura significativa					Periodo Peak					Periodo Medio				
	31°S	35°S	37°S	39°S		31°S	35°S	37°S	39°S		31°S	35°S	37°S	39°S
31°S	1.00	0.86	0.55	0.42	31°S	1.00	0.77	0.56	0.50	31°S	1.00	0.83	0.46	0.36
35°S	-	1.00	0.75	0.61	35°S	-	1.00	0.68	0.61	35°S	-	1.00	0.65	0.49
37°S	-	-	1.00	0.93	37°S	-	-	1.00	0.83	37°S	-	-	1.00	0.89
39°S	-	-	-	1.00	39°S	-	-	-	1.00	39°S	-	-	-	1.00

Dirección Peak					Dirección Media				
	31°S	35°S	37°S	39°S		31°S	35°S	37°S	39°S
31°S	1.00	0.76	0.51	0.45	31°S	1.00	0.89	0.63	0.56
35°S	-	1.00	0.62	0.55	35°S	-	1.00	0.79	0.71
37°S	-	-	1.00	0.84	37°S	-	-	1.00	0.96
39°S	-	-	-	1.00	39°S	-	-	-	1.00

Considerando que el oleaje es definido por tres parámetros principales, de los que a su vez, dos de ellos tiene una variante, se confeccionan rosas de oleaje y tablas de frecuencia para describir la ocurrencia conjunta típica entre estos parámetros en un estado de mar, las cuales se presentan en la Figura 22, Figura 23 y desde la Tabla 22 a la Tabla 27 en el Anexo 9.2 respectivamente.

Para efectos de facilitar la descripción de las interacciones, se realizan las tablas de frecuencia de la altura de ola con los dos periodos y dos direcciones, mientras que las relaciones entre periodo y dirección se realizan solo para los parámetros equivalentes, vale decir, periodo *peak* versus dirección *peak* y periodo medio versus dirección media, pudiendo presentarse como rosas solo las tablas de frecuencia que involucran alguna dirección.

En general se observa que las combinaciones de mayor frecuencia entre dos parámetros corresponden a los intervalos de mayor frecuencia de cada parámetro por sí solo.

Así, entre la altura significativa y el periodo *peak*, para todos los nodos, las mayores frecuencias se presentan en los intervalos de 2 [m] a 3 [m] y 12 [s] a 14 [s], representando cerca del 25% de los casos (ver Tabla 22 del Anexo 9.2), mientras que alrededor del 87% de los datos se presentan en los intervalos de 1 [m] a 4 [m] y 10 [s] a 16 [s]. Para las condiciones de mayor energía, las alturas superiores a 5 [m], que rondan el 1%, presentan periodos entre 8 [s] y 16 [s], mientras que los periodos superiores a 18 [s] (cerca del 0.5% de los casos), presentan alturas principalmente entre 1.5 [m] y 3 [m] en todos los nodos. Latitudinalmente, las frecuencias por intervalos pasan de concentrarse en una banda pequeña hacia el norte a dispersarse en una banda mayor hacia el sur.

Para la interacción entre la altura significativa y el periodo medio (ver Tabla 23), cerca del 90% de los casos se encuentran con alturas de 1 [m] a 4 [m] y periodos de 6 [s] a 12 [s], existiendo una alta

uniformidad en la frecuencia de los sub-intervalos, donde el mayor no supera el 10.63% (de 8 [s] a 10 [s] y de 2 [m] a 2.5 [m]). Los periodos que superan los 12 [s] (que representan cerca del 3%) presentan alturas principalmente entre 2 [m] y 4 [m] y donde menos del 0.3% supera los 5 [m], mientras que en el caso de las alturas que superan los 5 [m], los periodos se encuentran principalmente entre 8 [s] y 10 [s].

La altura significativa y la dirección *peak* (ver Tabla 24 y Figura 22) presentan una ocurrencia conjunta marcada principalmente por la alta frecuencia asociada a la marca de clase suroeste (SW) en todas las latitudes consideradas, llegando a 38.9% si se consideran 32 direcciones y a 54.8% si se consideran 16 en el nodo 31°S, presentando alturas principalmente entre 1.5 [m] y 3.5 [m]. La presencia de alturas mayores a 5 [m] pasan de ser casi exclusivamente de las direcciones SW y NW en el nodo 31°S a presentarse en todas las direcciones del tercer y cuarto cuadrante hacia el nodo 39°S.

En el caso de la convivencia de la altura significativa y dirección media (ver Tabla 25 y Figura 22), destaca la concentración de las direcciones en una banda de 45° que pasa de centrarse en los 225° en el nodo 31 a centrarse en torno a los 247° en el nodo 39°S, con alturas principalmente entre 2 [m] y 3 [m] (en torno al 40% de los casos). En cuanto a las alturas sobre 5 [m], la dirección media presenta un comportamiento similar al presentado en la dirección *peak*.

Para los parámetros *peak* (a saber dirección y periodo) los valores presentes en la Tabla 26 y en la Figura 23 indican una fuerte concentración en la dirección SW y la banda de periodo 12 [s] a 14 [s] que va de 26% en el nodo 39°S a 30.8% en el nodo 31°S. Se presenta además que los periodos superiores a 18 [s] vienen exclusivamente con direcciones en torno al SW y NW, marcando las zonas de generación en los frentes polares ártico y antártico.

En el caso de los parámetros medios (ver Tabla 27 y Figura 23), se presenta la mayoría de los datos entre los periodos 6 [s] y 12 [s] y las direcciones SSW y WSW en torno al 88% de los casos, con el rango 8 [s] a 10 [s] como el principal, ya que contiene cerca del 34% de los datos entre las direcciones SW y WSW. Los periodos mayores a 12 [s] se encuentran en su totalidad entre las direcciones SSW y WNW, pero principalmente entre SW y WSW.

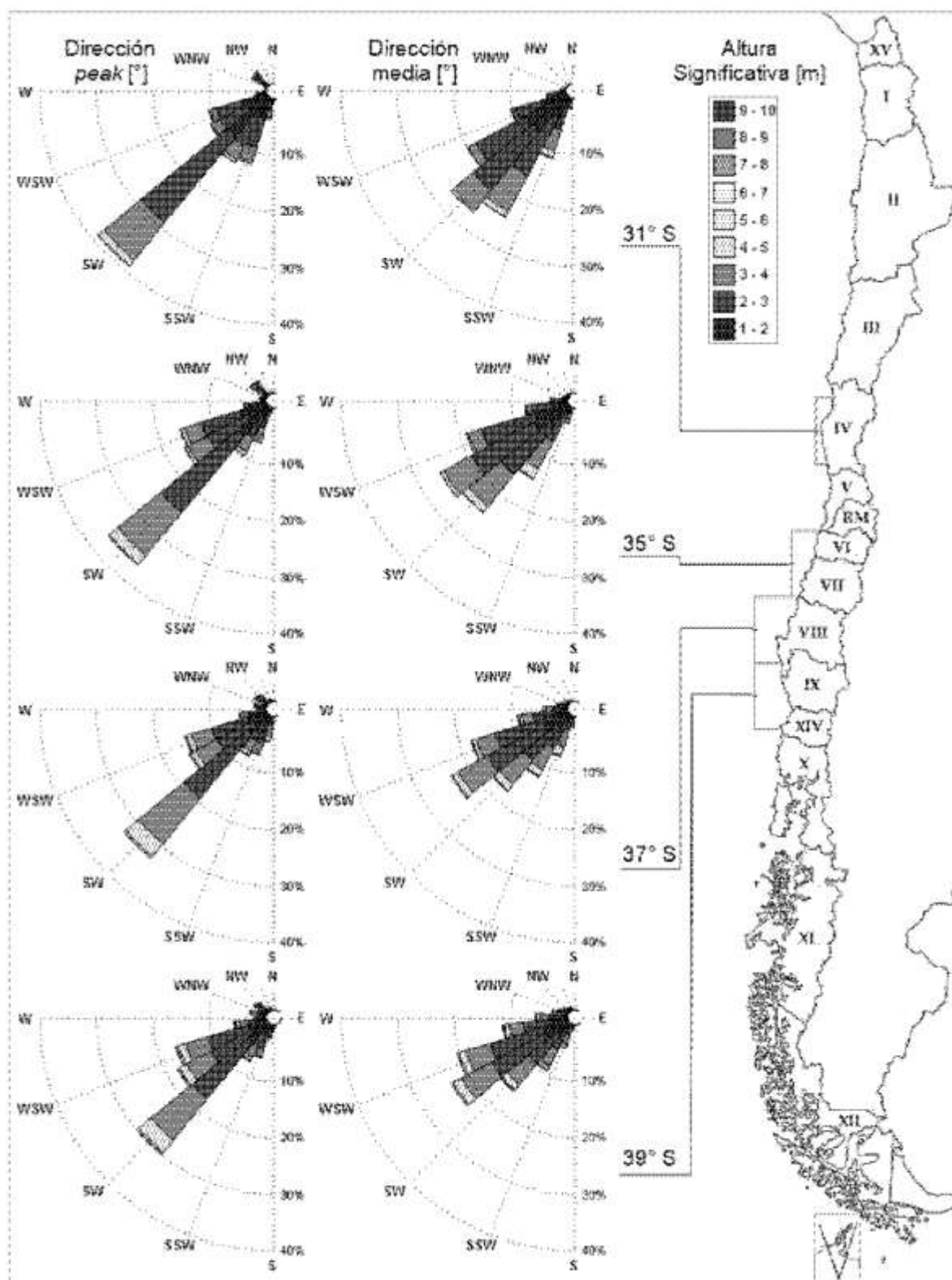


Figura 22. Rosa altura significativa *versus* dirección *peak* y media.
(Elaboración propia)

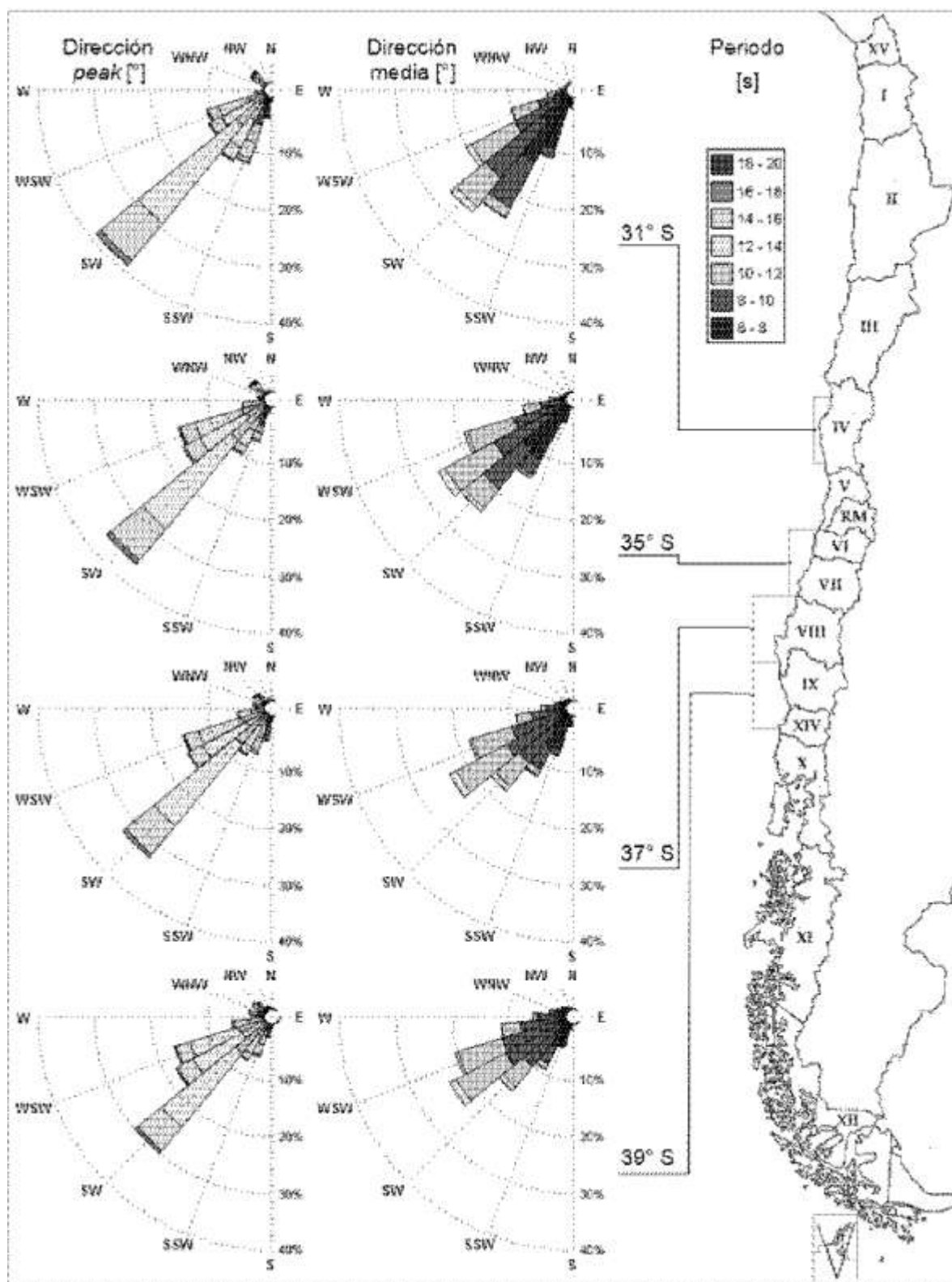


Figura 23. Rosa periodo *peak* versus dirección *peak* y periodo medio versus dirección media (Elaboración propia)

3.3 EL VIENTO

Para conocer y evaluar las condiciones de oleaje observadas o esperadas de cualquier lugar, es necesario conocer claramente su fuente generadora. Una descripción general del viento permite identificar las principales zonas de generación, sean estas locales o distantes, del oleaje que llega a las costas de Chile, logrando de esta forma verificar la confiabilidad de cualquier estadística disponible.

3.3.1 GENERACIÓN

La descripción de la generación del viento parte por comprender los mecanismos de circulación atmosférica planetaria, la cual se describe preliminarmente para un caso idealizado de un planeta sin continentes ni inclinación respecto del sol, el cual está representado en la Figura 24.

Analizando en primer lugar el comportamiento latitudinal de las masas de aire (vista inferior Figura 24), la ortogonalidad de la incidencia de la energía solar en el ecuador terrestre, provoca en este sector una franja de alta temperatura que propicia una alta evaporación y el incremento de la temperatura del aire superficial disminuyendo así su densidad. Estas masas de aire superficial cálidas y húmedas, al ser menos densas que las de altura, se elevan por convección provocando zonas lluviosas. En el proceso de ascenso el aire pierde temperatura y humedad, aumentando su densidad, que al ser similar a la existente a una determinada altitud detiene la ascensión.

Debido a que es un sistema en el que constantemente llega la radiación solar, en la medida que las masas de aire ascienden, nuevas masas llegan al ecuador por la superficie, provenientes del Norte y del Sur, mientras que en altura, las masas que perdieron humedad y temperatura divergen hacia los polos. Estas últimas, en la medida que se desplazan a mayores latitudes, continúan perdiendo calor y son cada vez más secas, alcanzando un punto en el que se vuelven más densas que las masas de aire superficiales, por lo que descienden en los 30° de latitud aproximadamente, divergiendo en la superficie hacia el polo y el ecuador, cerrando así un ciclo que se denomina *Celda de Hadley* (Stewart 2006, Fuenzalida 1983).

En el extremo opuesto, el polo es el lugar de la tierra donde tiene la menor radiación solar dada su incidencia tangencial a la superficie, por lo que en esta zona prima un ambiente extremadamente frío. Esto provoca que las masas de aire desciendan por el proceso de enfriamiento e incremento de la densidad, generando divergencia superficial en el polo hacia el ecuador. Nuevamente al ser un sistema de constante enfriamiento, convergen en altura masas de aire provenientes de latitudes menores, mientras que en superficie las masas de aire frío que divergen hacia el ecuador se encuentran con las masas de aire cálido provenientes de la divergencia superficial generada en torno a los 30° de latitud. Este encuentro de masas de aire frío con cálidos en torno a los 60° de latitud forman el denominado *Frente Polar*, característico por generar frentes de mal tiempo. En este sector, las masas de aire cálido se elevan por sobre las masas de aire frío, provocando el enfriamiento de las mismas, generando una nueva zona de divergencia en altura que permite el cierre de un ciclo denominado *Celda Polar*.

La circulación descrita zonifica también la presión atmosférica, presentándose baja en las zonas de ascenso (ecuador y latitud 60°) y altas en las zonas de descenso (polo y latitud 30°).

La incorporación de la rotación de la tierra al sistema de circulación latitudinal permite realizar la descripción longitudinal de la circulación. En este sentido, si se considera que la tierra tiene una forma relativamente esférica y que posee un periodo de rotación constante en torno a su eje que sigue la regla de la mano derecha apuntando el pulgar hacia el norte, es posible notar que la trayectoria descrita en el espacio por una partícula situada en la superficie de la tierra es distinta dependiendo de la latitud en la que se encuentre. Así una partícula ubicada cercana al ecuador describirá como trayectoria una circunferencia de radio mucho mayor que la descrita por una partícula situada cerca de un polo, lo que implica que la celeridad de una partícula cercana al ecuador es mucho mayor que la celeridad que tiene una partícula cercana al polo, dado que en ambos casos recorren su trayectoria en el mismo tiempo.

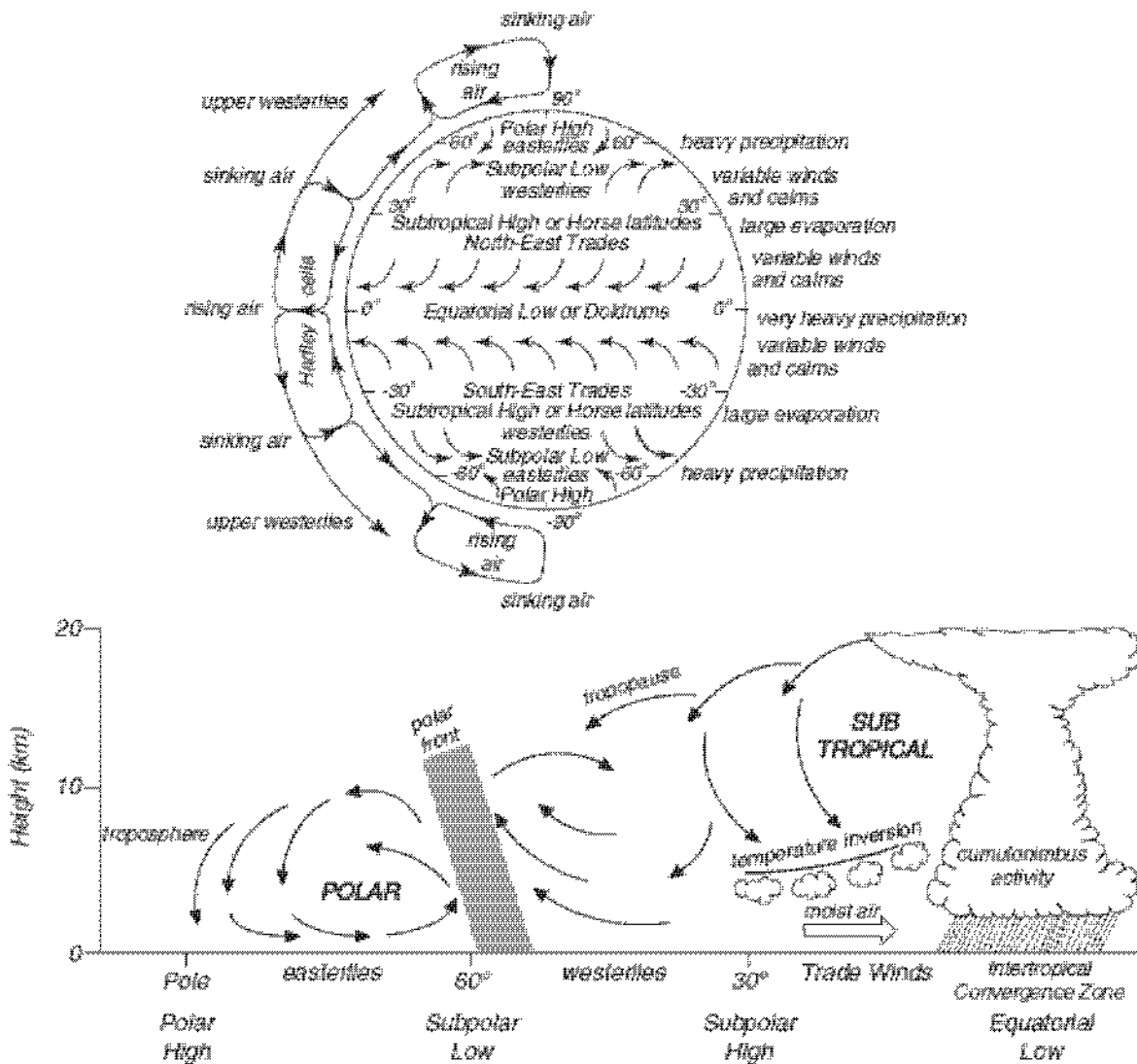


Figura 24. Esquematzación de la circulación atmosférica global. Arriba: idealización de circulación en un planeta sin continentes. Abajo: vista de la circulación latitudinal. (Stewart 2006)

Generalizando es posible afirmar que una partícula tiene una máxima velocidad en el ecuador y que esta disminuye en la medida que aumenta la latitud, siendo cero en el polo.

Si se considera un grupo de partículas que se colocan de manera instantánea en la superficie terrestre, la inercia propia de cada partícula y el fenómeno antes descrito, es posible afirmar que por efecto de la rotación de la tierra cada partícula responderá con un desplazamiento relativo opuesto al sentido de la rotación y cuya magnitud dependerá de la latitud de cada partícula individual, observándose que aquellas partículas que se encuentran hacia el ecuador sufrirán un desplazamiento mayor que aquellas que se encuentran hacia el polo. Si a lo último se agrega que las partículas inicialmente se encontraban describiendo una trayectoria respecto a la superficie de la tierra, se observará un desvío en la trayectoria que irá hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur, este fenómeno es denominado *efecto de Coriolis*.

El efecto de Coriolis se encuentra descrito por la ecuación:

$$f = 2\vec{\Omega} \times \vec{V}$$

Donde:

f : Efecto de Coriolis.

$\vec{\Omega}$: Tasa de rotación de la tierra.

\vec{V} : Velocidad.

De esta forma, si se considera el efecto de Coriolis producido por la rotación de la tierra en la circulación atmosférica latitudinal descrita con anterioridad, se observa que las masas de aire que viajan hacia el ecuador desde los 30° de latitud, correspondiente a la Celda de Hadley, sufren un desvío hacia el oeste al igual que las masas de aire que se desplazan en superficie desde el polo al frente polar en torno a los 60° en la celda polar, sin embargo, esta última tiene velocidades menores debido a latitud. En el caso de las masas de aire que se desplazan entre los 30° y 60°, estas describen trayectorias que se desvían hacia el este (Stewart 2006).

Este planteamiento idealizado sobre el proceso de circulación atmosférico permite identificar tres bandas de vientos predominantes, la de vientos ecuatoriales que van de este a oeste denominados *vientos Alisios* y las dos bandas de viento de los frentes polares que van de oeste a este.

3.3.2 ZONIFICACIÓN DEL VIENTO

La descripción detallada en el capítulo anterior considera el supuesto de la ausencia de continentes, aspecto que tiene efectos en la circulación atmosférica, pero que su desprecio de igual forma constituye un ejercicio representativo de las condiciones reales presentes en la atmósfera terrestre, de lo cual da cuenta la Figura 25 que presenta la velocidad y dirección de viento y presión promedio para el globo en el año 1989.

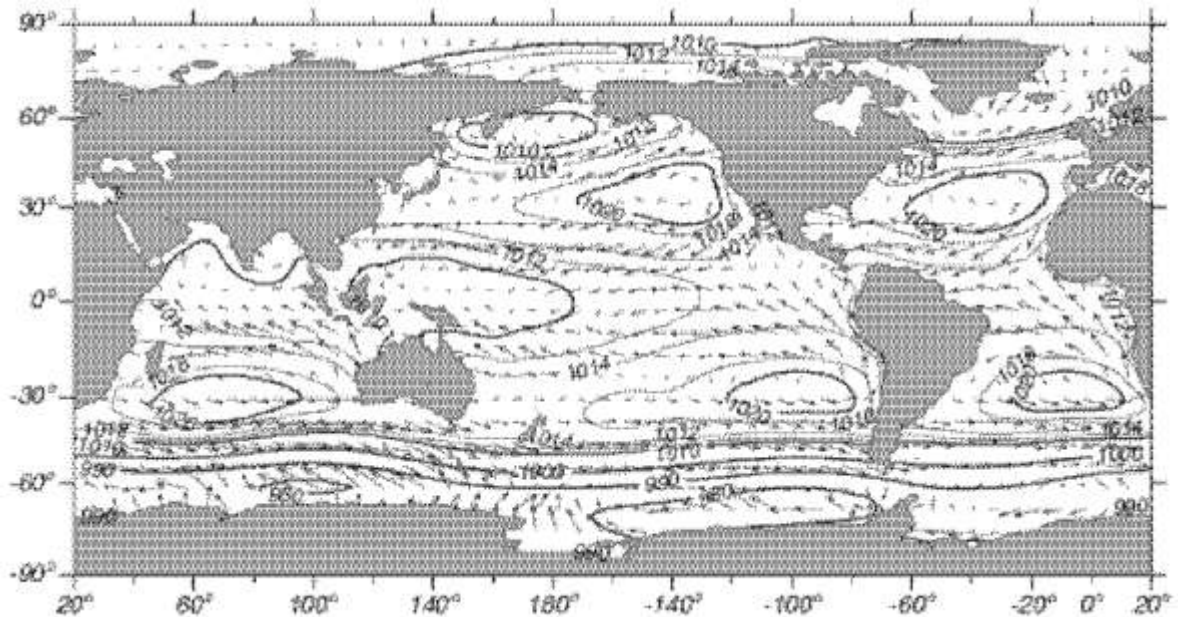


Figura 25. Mapa de la velocidad media anual del viento y de la presión superficial en 1989. (Stewart 2006)

De esta figura se observa claramente la banda de vientos descrita para el frente polar antártico, el que se debe a la ausencia de masas de tierra que discontinúen la circulación más allá del cono sudamericano, pero que por la presencia del continente antártico, esta banda se desplaza unos grados al norte que la presentada por la situación idealizada. En el hemisferio opuesto, la banda de vientos del frente polar Ártico queda limitada a dos bandas estrechas en el Pacífico y Atlántico. Por último, se presenta de manera discontinua la banda de vientos ecuatoriales, denominado vientos alisios, presentándose en los océanos Índico, Pacífico y Atlántico.

La circulación atmosférica presentada con las 3 bandas de viento (alisios ecuatorial y dos frentes polares) caracterizadas por la presencia de baja presión atmosférica, demarcan también 2 zonas en las que se manifiestan sistemas de alta presión, que debido al efecto de Coriolis, sufren una rotación en torno a su centro, en el sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio norte (*ciclón*) y contra las manecillas del reloj en el hemisferio sur (*anticiclón*), mientras que los sistemas de baja presión (*depresión*) manifiestan un sentido contrario por hemisferio.

La interacción entre los sistemas de alta presión presentes en latitudes subtropicales y los de baja presión generados en los frentes polares produce una tercera fuente de vientos importantes de carácter local, el que se trata con detalle a continuación.

3.3.3 VIENTO LOCAL

En el Pacífico sudoriental destaca la permanente presencia de un anticiclón que longitudinalmente tiene un bajo desplazamiento por la resistencia ofrecida por la cordillera de los Andes, mientras que latitudinalmente tiene un desplazamiento relativo a la posición del sol, que en verano se desplaza hacia el sur y en invierno hacia el ecuador (Schneider SF). Por otro lado, en el frente polar antártico destaca la generación permanente de sistemas de bajas presiones (depresiones), menores en tamaño y más veloces que los sistemas de alta presión. En las cercanías de la costa chilena, la interacción entre ambos presenta en verano al anticiclón posicionado en gran parte del territorio chileno que bloquea la aproximación de las depresiones que se desplazan longitudinalmente a la altura de la Patagonia (Ver Figura 26 izquierda). En invierno en cambio, la inclinación de la tierra induce al anticiclón a desplazarse hacia el norte por la posición relativa del sol, facilitando con ello el ingreso a latitudes menores de las depresiones, las cuales están asociadas a la presencia de lluvias y vientos.

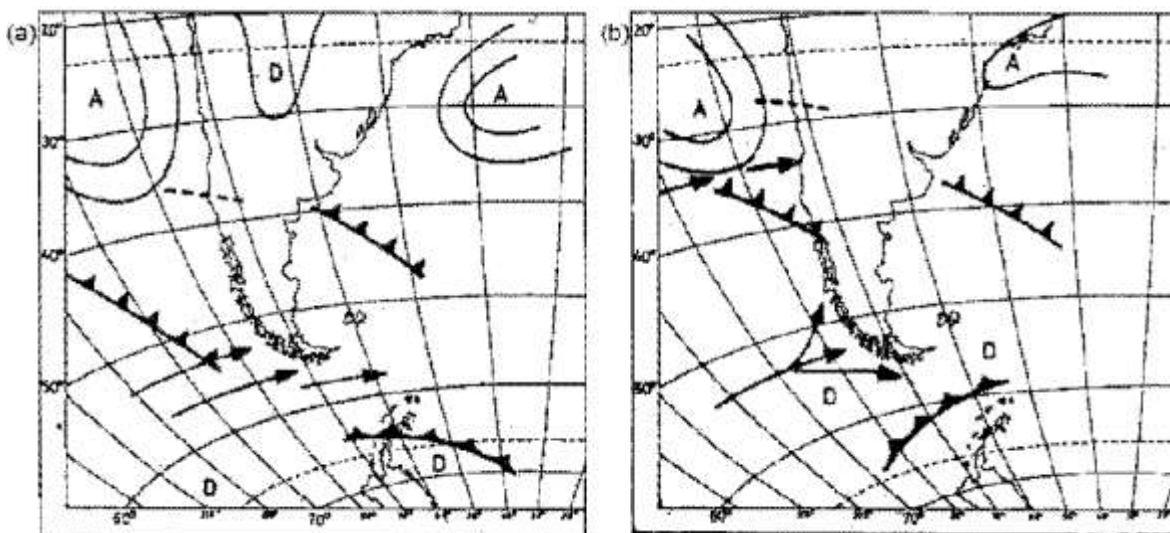


Figura 26. Posición del anticiclón del Pacífico sur (A) y las rutas de las depresiones (D) en Enero (a) y Julio (b). (Schneider SF)

La proximidad del anticiclón y una depresión, genera un gradiente de presión que induce un desplazamiento de masas de aire desde la zona de alta a la de baja, que a una gran escala y retirado de la superficie (roce despreciable), denominado *viento geostrófico* (Houghton 1992, Fuenzalida 1983). La rotación inducida por Coriolis en el anticiclón (vista en el sub capítulo 3.3.2), induce también en la depresión una rotación en el sentido horario en el hemisferio sur, produciendo en ambos un sistema similar a un par de engranajes (ver Figura 27). La velocidad del viento geostrófico generado (V_g) puede ser obtenido por la ecuación:

$$fV_g \wedge k = \frac{1}{\rho} \nabla p$$

Donde:

f : Efecto de Coriolis.

k : El vector unitario.

ρ : La densidad del aire a la altitud correspondiente.

∇p : El cambio de presión (asumido en una distancia horizontal).

Este modelo simplificado considera un sistema sin rozamiento superficial que funciona bien a alturas superiores a 1 [km] (aproximadamente) y que describe que el viento va paralelo a las isobaras en sentido horario en los centros de bajas presiones y anti horario en los de alta presión, por lo que su identificación en cuanto a sentido y magnitud es fácilmente deducible de una carta de superficie o mapa isobárico. Como referencia se puede considerar el cálculo del viento geostrófico en la latitud 30° ($\phi = 30^\circ$), donde se tiene que $\sin\phi = 0.5$ y que Coriolis $f = 7.29 \times 10^{-5}$. Si se evalúa un gradiente de presión $\nabla p = 0.2$ [kpa] en una extensión de 100 [km], la velocidad de equilibrio es 23.8 [m/s].

En el caso de la determinación del viento al nivel superficial, el rozamiento generado induce una desviación de la dirección respecto al sentido de las isobaras, ya que esta fuerza actúa en el sentido opuesto (ver Figura 27). Sin embargo, este aspecto no se revisará con detalle en este trabajo dado el carácter descriptivo del capítulo, por lo que se recomienda al lector revisar la referencia Houghton (1992) para una visión más precisa del fenómeno.

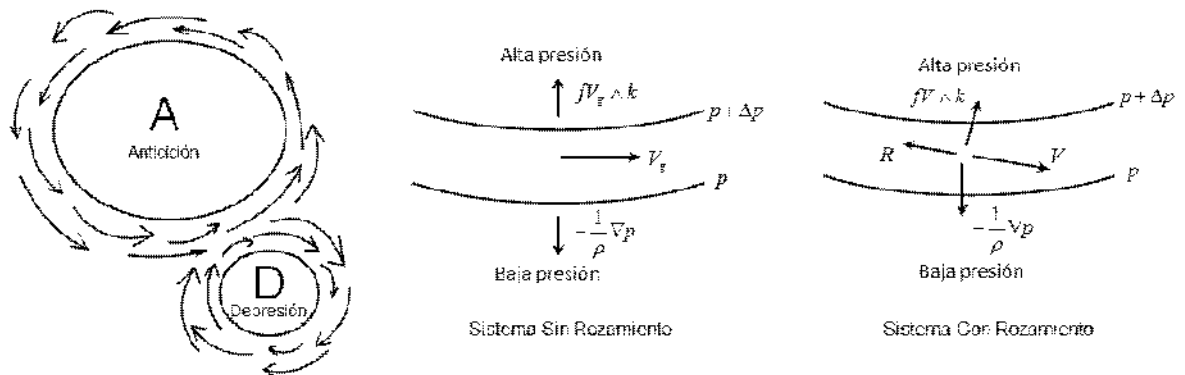


Figura 27. Generación de los vientos entre el anticiclón y una depresión en el hemisferio sur. (Adaptado de Houghton 1992)

La presencia de estos vientos se identifica de las cartas de superficie en la concentración de las isóbaras entre el anticiclón y una depresión, lo que configura un *fetch*. Dado que la depresión tiene una gran movilidad, el *fetch* generado sufre tanto un desplazamiento como una variación direccional, tal como se muestra en la Figura 28 donde se exponen dos cartas de superficie

correspondientes al 14 y 16 de julio de 1967, que describen la evolución de estos sistemas en el tiempo.

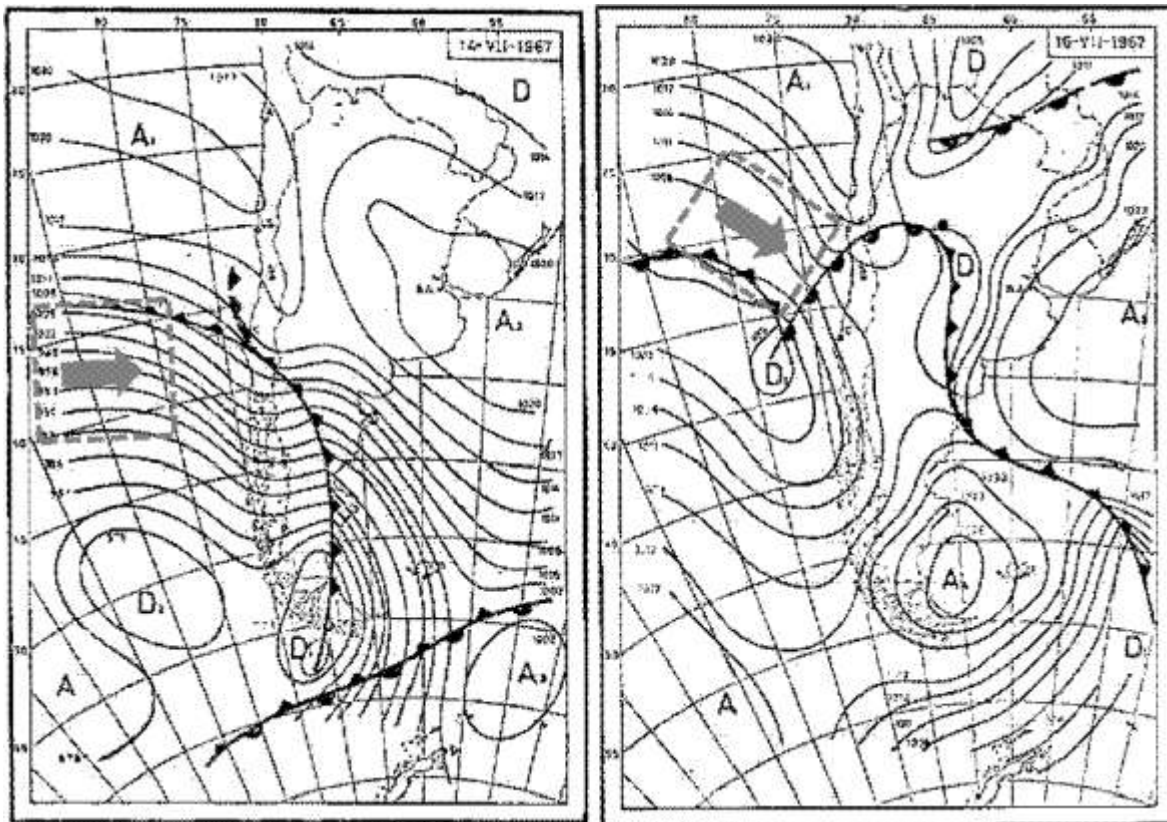


Figura 28. Evolución de *fetch* entre sistemas de alta y baja presión que genera oleaje local. (Adaptado de Schneider SF)

3.3.4 CIRCULACIÓN WALKER Y SURGENCIA

Los vientos alisios descritos en el capítulo 3.3.1 mediante el modelo idealizado de la circulación atmosférica tienen una marcada presencia en todos los océanos que cubren el ecuador, sin embargo, cobran mayor relevancia en el océano Pacífico dado que es el de mayor extensión ecuatorial. Aquí los vientos alisios empujan por esfuerzos tangenciales a la capa superficial del océano calentada por la radiación solar hacia el oeste. Esto provoca un apilamiento de aguas cálidas en las cercanías de Oceanía y un afloramiento de aguas frías provenientes del fondo en las cercanías de América. El apilamiento produce un incremento del nivel del mar en el Pacífico ecuatorial occidental y una disminución del mismo en el Pacífico ecuatorial oriental, esto descrito en la Figura 29.

La zona occidental del Pacífico ecuatorial, al tener una temperatura mayor debido al apilamiento de aguas cálidas, propicia una alta evaporación y temperatura de las masas de aire superficiales, las cuales ascienden creándose una zona de bajas presiones y altas precipitaciones. Este ascenso produce un transporte de las masas de aire en altura hacia el oriente, las cuales descienden frente a la costa Sudamericana, generándose una zona de altas presiones y seca. Este patrón de circulación atmosférica es denominado *Circulación de Walker*, el cual puede ser descrito por el comportamiento de circulación de una habitación en la cual en un extremo se encuentra una estufa y en la otra una ventana (ver esquema presentado en Figura 30).

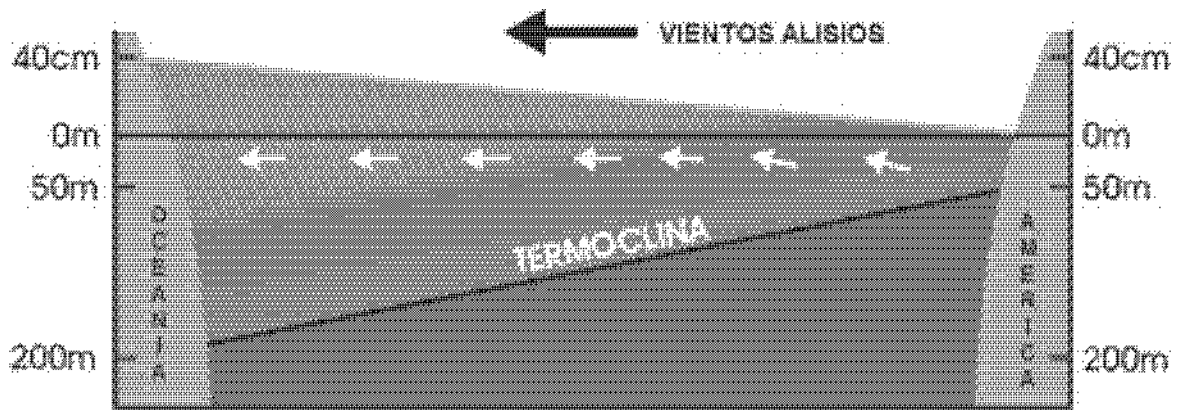


Figura 29. Acción de vientos alisios en el Pacífico ecuatorial.
(Adaptado de Avaria et al. 2004)

Por otro lado, al producirse un apilamiento de agua en la zona occidental del sistema, se produce una corriente submarina de oeste a este que transporta aguas frías ricas en nutrientes a la zona superficial del Pacífico oriental, denominado zona de *Surgencia* (Glantz 1998, Figura 31a).

Es tal la importancia de las zonas de surgencia que estas tienen mayor producción pesquera que el resto del globo aún cuando representa el 0.1% de la superficie de los océanos. Además, debido a las bajas temperaturas de estas masas de agua, los procesos formadores de lluvia son suprimidos, siendo influenciados por sistemas de altas presiones, por lo que la surgencia se presenta junto a zonas costeras áridas. La Figura 31b presenta las principales zonas de surgencia del mundo y los sistemas de alta presión que los influyen.

En conclusión, debido al proceso de surgencia y de la circulación de Walker, la región de Oceanía ecuatorial es característicamente lluviosa por ser dominada por un sistema de baja presión y de aguas cálidas con baja producción pesquera, teniendo un nivel del mar más elevado que el presentado en la costa sudamericana del Pacífico ecuatorial oriental, característicamente seca por la influencia de un sistema de alta presión de aguas frías pero de alta producción pesquera por causa de la surgencia.

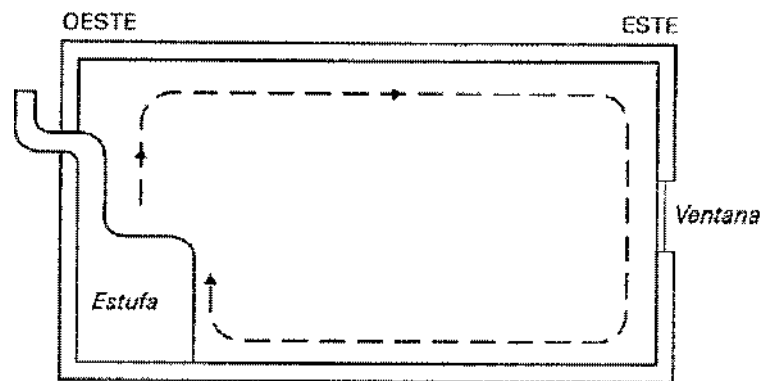


Figura 30. Diagrama esquemático simplificado de la circulación atmosférica ecuatorial como la circulación de aire en una habitación cerrada.
(Glantz 1998)

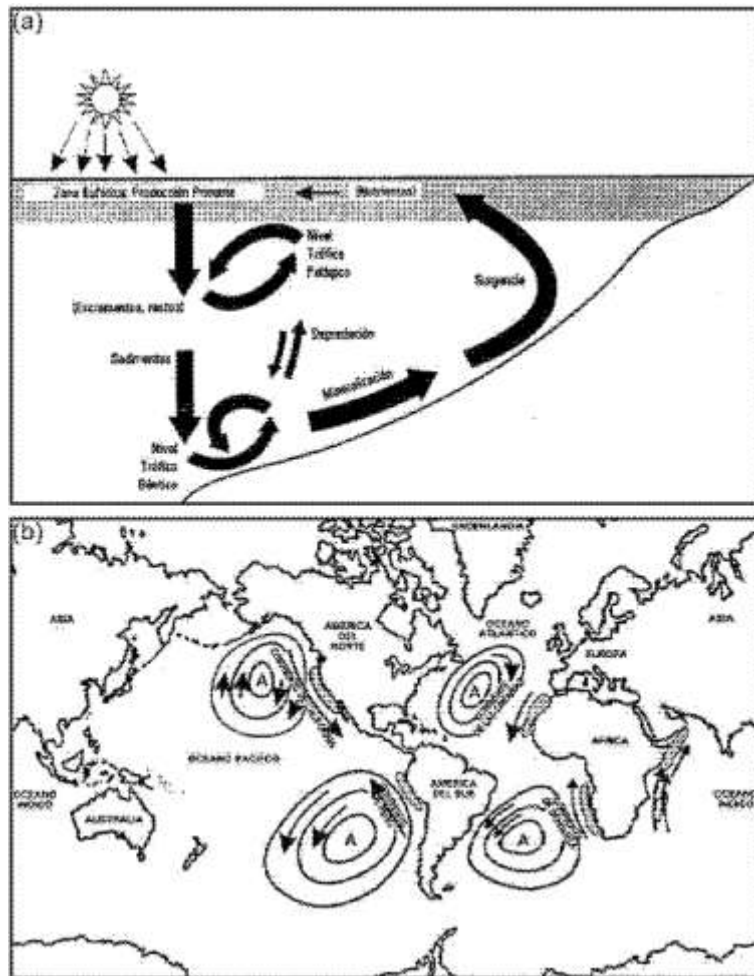


Figura 31. Ciclo de nutrientes en un sistema de surgencia costero idealizado (a) y principales regiones de surgencia costera del mundo con los sistemas de alta presión atmosférica que los influncian (b).
(Glantz 1998)

3.4 EL FENÓMENO EL NIÑO – OSCILACIÓN SUR (ENOS)

3.4.1 ANTECEDENTES DEL FENÓMENO

Hacia fines del siglo XIX en la costa de Perú se observaba una extraña corriente de aguas cálidas proveniente del norte y que ocurría característicamente a finales de año en torno a navidad. La primera publicación registrada respecto a este fenómeno fue la declaración realizada por el capitán naval peruano Camilo Carrillo en la reunión de la Sociedad Geográfica en Lima en 1892 (citado en Glantz 1998) el cual señala:

“Los marineros peruanos desde el Puerto de Paíta al Norte del Perú, quienes frecuentemente navegaban a lo largo de la costa en pequeñas embarcaciones, ya sea al norte o al sur de Paíta, nombraron a esta corriente “El Niño”, sin duda, debido a que es la más notable y sentida después de Navidad”

El interés por este fenómeno se remonta a los inicios del siglo XIX, donde se observaba la extraña mortandad de aves guaneras como cormoranes, alcatraces y pelícanos. Para ese entonces, la extracción de guano constituía una creciente industria en Perú, ya que tenía mucha utilidad como fertilizante agrícola. La razón de la mortandad de las aves era que la corriente de El Niño disminuía la surgencia e incrementaba la temperatura del agua, esto provoca por una parte la disminución en el dinamismo biológico del sector (disminuyendo la disponibilidad de alimento para los peces) y por otro la profundización de la capa de agua habitable por la anchoveta, dispersando su concentración. De esta forma, la mortalidad aumentaba por causa de la disminución en la disponibilidad de alimento.

La aparición de fertilizantes sintéticos a mediados del siglo XX disminuyó la demanda del guano, por lo que el estudio de El Niño comienza a decaer. Sin embargo a mediados de la década del 60', Perú se convierte en uno de los principales países pesqueros, por lo que reinicia el interés de investigar las causas de esta corriente dado que afectaba los volúmenes de pesca.

Entre los resultados arrojados por las distintas investigaciones realizadas en Perú, destaca la sugerencia de la relación entre las lluvias excesivamente densas y las inundaciones en la ciudad costera de Piura, al norte del país con la corriente costera cálida de El Niño realizada por el geógrafo Víctor Eguiguren en el año 1895, aspecto que en definitiva constituye la evidencia de mayor notoriedad en la costa pacífica sudamericana respecto al desarrollo de este fenómeno.

Al otro lado del océano Pacífico, también a finales del siglo XIX se estudiaban en India y Australia los posibles causas de las sequías que allí se presentaban cada cierto tiempo, las cuales provocaban un alto impacto debido a las severas hambrunas que causaban. Dado que India es una zona altamente lluviosa, el fenómeno era denominado como *falla en los monzones*.

Dentro de los investigadores que trataron de explicar este fenómeno mediante algún proceso atmosférico destaca Gilbert Walker quien en 1924 identificó que se producían variaciones en las presiones atmosféricas de distintos lugares en la cuenca del Pacífico, en donde, las características bajas presiones de la zona India-Australia aumentaban a la vez que disminuían en la polinesia francesa, zona característicamente de altas presiones. Este proceso que coincidía con la falla de los monzones fue denominado por Walker como la *Oscilación Sur*.

Al mismo tiempo Walker, que tenía una fuerte base matemática, intentó correlacionar este fenómeno con alteraciones en las precipitaciones de lugares como el subcontinente Índico, África y Sudamérica obteniendo buenos resultados, lo que sentó la idea de que este era un fenómeno de efecto global (Glantz 1998 y Werlinger 2004)

A mediados de la década del 60' el científico Jacob Bjerknes retoma los estudios realizados por Walker e identifica los mecanismos físicos que relacionaban a El Niño con la Oscilación Sur correspondiente a un sistema de circulación ecuatorial que relaciona las variaciones de presiones y los cambios en la temperatura superficial del mar, al cual denomina *Circulación de Walker*.

A partir de ese episodio nace una nueva nomenclatura para denominar a este fenómeno, la cual es *El Niño – Oscilación Sur (ENOS)*.

3.4.2 DESCRIPCIÓN DE ENOS

La condición normal del Pacífico ecuatorial descrito mediante la circulación de Walker y la surgencia se fundamenta en la acción de los vientos alisios. En un evento El Niño, los vientos alisios se debilitan pudiendo desaparecer o eventualmente cambiar de dirección, esto provoca una corriente superficial de aguas cálidas que va de oeste a este que se propaga hasta llegar al límite oriental en la costa sudamericana. El debilitamiento de los vientos alisios produce también un debilitamiento de la surgencia que implica una disminución de la actividad biológica asociada al menor afloramiento de nutrientes. Dado que las masas de aguas calientes se desplazan al Pacífico ecuatorial central, también lo hace el sistema de convección atmosférica, generando precipitaciones sobre lo normal en la costa americana y bajo lo normal en la costa oceánica (ver Figura 33, superior). De esta forma se explica la falla en los monzones en las cercanías de Indonesia y las precipitaciones excesivas en Ecuador, Perú y Chile. La corriente de El Niño, por otro lado, corresponde a divergencia hacia los polos de la corriente de aguas cálidas al momento de llegar a la costa americana, y que relativamente para Perú proviene del norte, tal como lo describían los marineros a fines del siglo XIX.

No obstante lo anterior, se desconocen las causas por las que los vientos alisios se debilitan y la masa de agua cálida se desplaza al oriente. Un planteamiento respecto a la generación del fenómeno la establece Klaus Wyrtki (referido en Glantz 1998), el cual propone:

“La masa cálida del Pacífico occidental aumenta lentamente en tamaño y profundidad, debido a que la circulación oceánica no es capaz de eliminar todo el calor acumulado desde esta área. A medida que aumenta la masa cálida la convección atmosférica comienza a moverse al este, hacia el Pacífico central, y los vientos asociados originan la onda Kelvin ecuatorial. Esta onda mueve el calor hacia el este [a lo largo del ecuador] y hacia los polos [a lo largo del límite oriental] y, de este modo elimina el calor del área de la masa cálida. Este proceso de relajamiento del calor determina la longitud de un ciclo El Niño”.

El proceso que describe Wyrtki utilizando la onda Kelvin como medio de desplazamiento de las masas de agua cálidas hacia el este y luego a los polos queda representado en la Figura 32, donde el desplazamiento de las aguas cálidas por la onda Kelvin se encuentra con la costa sudamericana provocando por un lado la divergencia de la onda hacia los polos a lo largo de la costa y por otro la generación de una onda reflejada de menor celeridad, denominada onda Rossby. La onda costera generada por la divergencia transporta las masas de agua cálida, en el caso del hemisferio sur, por las costas de Ecuador, Perú y Chile, conformándose así la corriente descrita por los marineros peruanos a fines del siglo XIX, la que relativamente a Perú llega desde el norte. El desplazamiento hacia los polos supone una pérdida de la temperatura de las masas de agua en la medida que aumenta la latitud, generándose de esa forma un sumidero de emergencia de la energía del planeta contenida por el Pacífico. Por otro lado, la onda Rossby se transforma en la fuerza restauradora del sistema, marcando de esta forma la decadencia del fenómeno y el retorno a la condición normal.

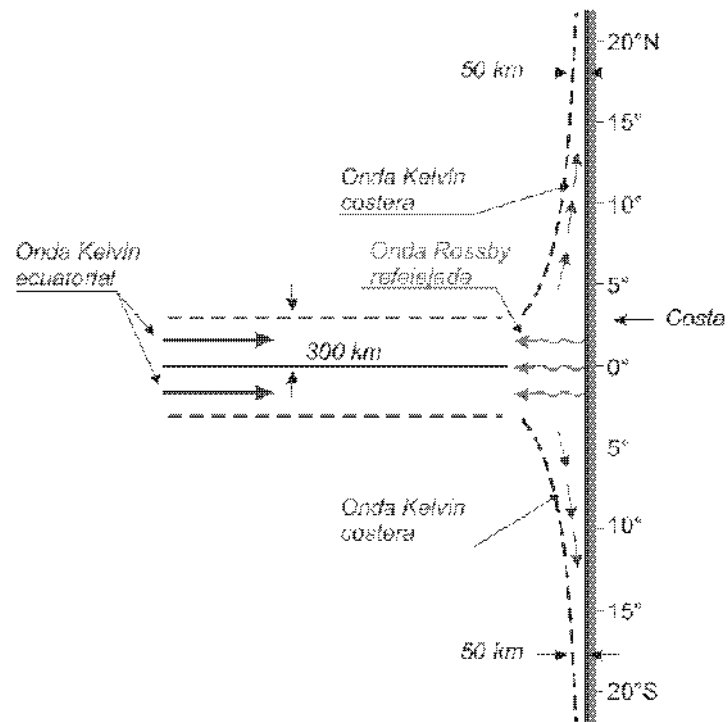


Figura 32. Modelo de propagación de ondas Kelvin y Rossby.
(Avaria *et al.* 2004)

Se ha descubierto que este fenómeno desarrollado en el Pacífico tiene efectos de escala global tal como lo propuso Walker a principios del siglo XX, ya que simultáneamente con el desarrollo de El Niño de 1982-83, por ejemplo, ocurrían sequías en lugares como México, Centro-América, norte y sur de África, la península ibérica, sur de India, Australia, Filipinas y la Micronesia, mientras que se producían inundaciones en el sur de Brasil, sur de China, Estados Unidos y Europa Occidental (Glantz 1998).

A raíz de la relación que se da entre ENOS y otros fenómenos ocurridos a distancia se describe un término que comenzó a utilizarse con frecuencia hace pocos años, las denominadas *Teleconexiones*.

Otro aspecto muy relevante a considerar es que ENOS es un fenómeno cíclico, es decir, posee una fase positiva y una negativa, la fase positiva es la que fue descrita con anterioridad y que es denominada El Niño, sin embargo la fase negativa tiene otras implicancias en el sistema de circulación oceánica y atmosférica, la cual es denominada *La Niña*.

La Niña provoca la intensificación de los vientos alisios, generando un incremento en el apilamiento de agua cálida en el Pacífico ecuatorial occidental y con ello el aumento de la surgencia. Esto implica lluvias con mayor intensidad en las cercanías de Indonesia y severidad de la sequía en la costa sudamericana. La descripción de las condiciones Niño, Niña y Normal se presentan en la Figura 33

Dado que El Niño produce el aumento de la temperatura superficial del mar en la costa sudamericana se le llama *fase cálida* de ENOS, mientras que a La Niña se le llama *fase fría* de ENOS, porque la disminuye.

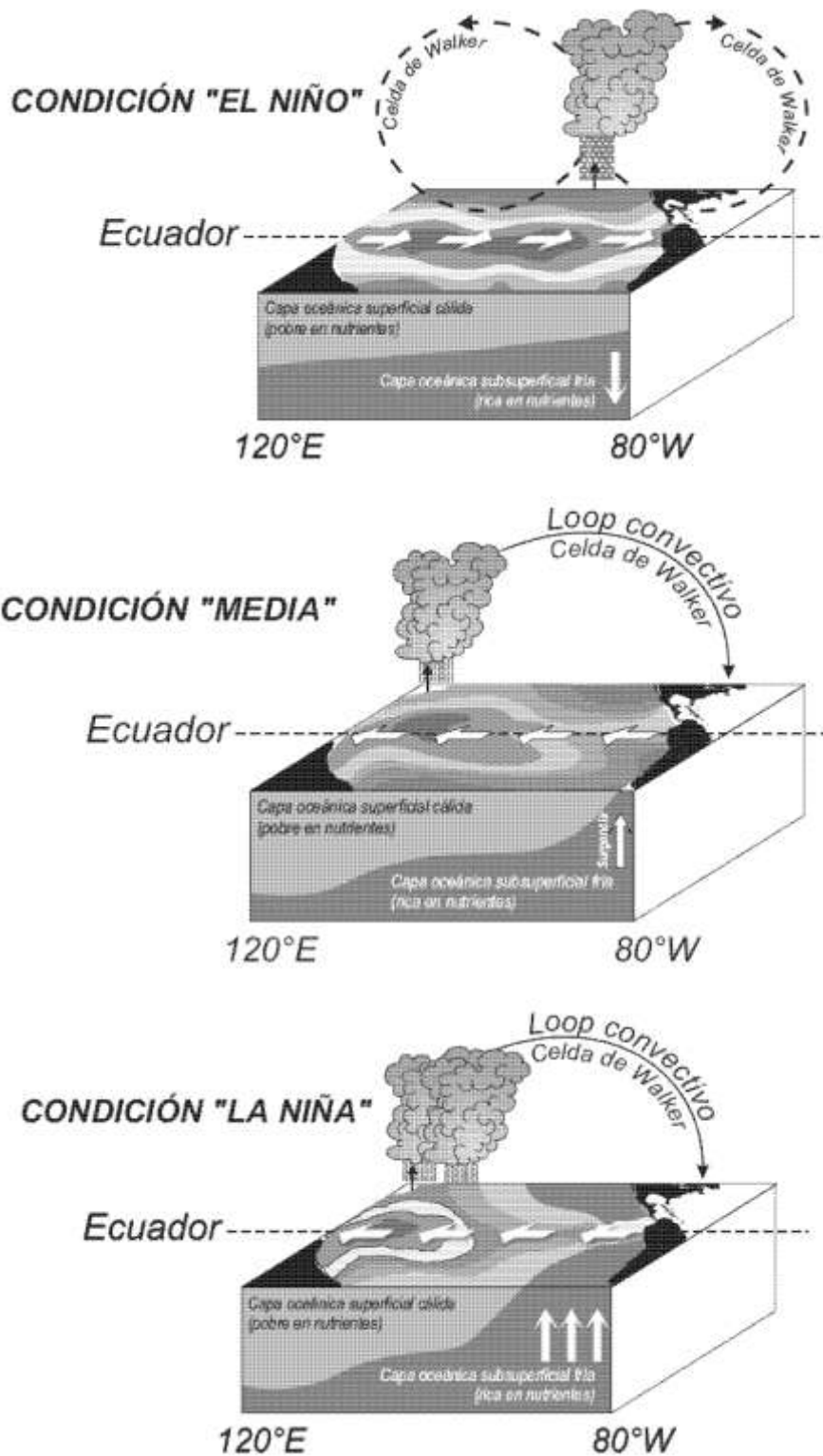


Figura 33. Modelo de convección, temperatura y surgencia, en condición Niño, Media y Niña. (Avaria et al. 2004)

3.4.3 CARACTERIZACIÓN DE ENOS

Dado que ENOS se caracteriza por variaciones de la temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial, resulta apropiado representar el fenómeno mediante la variación de la temperatura en el tiempo en un punto determinado.

La variación de la temperatura puede entenderse como la diferencia entre la medición y el valor típico para la época del año en que se mide, lo que se denomina *anomalía*. La denominación de este tipo de índices corresponde a SSTA (*Sea Surface Temperature Anomaly*).

En cuanto al intervalo de medición se considera el promedio mensual, esto por un lado debido a la baja celeridad del fenómeno y por el otro lado debido a que resulta más sencillo caracterizar el valor típico de una época del año cuando ésta es cercana al orden de las estaciones del año.

Considerando que ENOS es un fenómeno de gran escala la medición en un punto no resultaría apropiada debido a que pueden existir fenómenos particulares y locales que alteren su valor, por lo que se utilizan las mediciones de temperatura en el tiempo de un cuadrante, el cual debe ser lo suficientemente grande para que quede representado completamente el fenómeno, pero lo suficientemente pequeño para que las variaciones sean uniformes en todo su extensión. Al respecto se propusieron 4 regiones, denominadas *Niño 3* (5°N-5°S y 90°W-150°W), *Niño 4* (5°N-5°S y 150°W-160°E), *Niño 1+2* (0°N-10°S y 80°W-90°W) y *Niño 3.4* (5°N-5°S y 120°W-170°W).

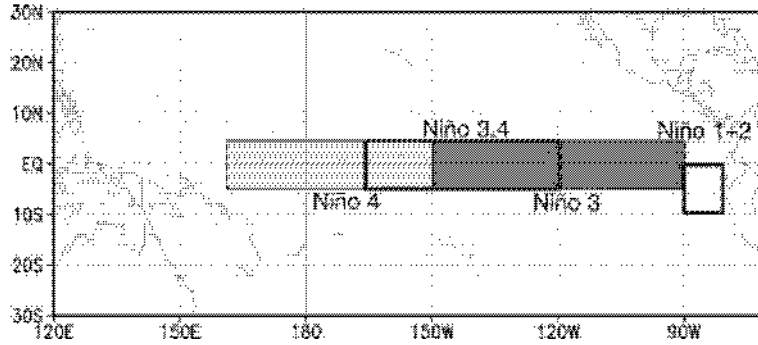


Figura 34. Cuadrantes que definen los índices ENOS de anomalía de temperatura. (NOAA 2010)

De esta forma un evento Niño se caracteriza mediante un *índice* que corresponde a una serie de tiempo de anomalías de la temperatura en un cuadrante, siendo Niño cuando el índice supera un valor umbral positivo (fase cálida) y Niña cuando sea menor que un umbral negativo (fase fría), considerándose normal cuando se encuentra entre los umbrales. En general para estos índices se consideran los umbrales 0.5°C y -0.5°C como límites entre la condición Niño y Niña con la Normal.

Por otro lado, la existencia de la Oscilación Sur descrita en el capítulo 3.4.1 permite contar con un índice que no depende de la temperatura superficial, sino que de las variaciones de presiones presentadas en dos puntos del Pacífico y que es denominado *Índice de Oscilación Sur (IOS)*. Los puntos corresponden a *Darwin* en el Noroeste de Australia y *Tahití* en la Polinesia Francesa. La relevancia de estos dos lugares radica en que una pertenece a una región de bajas presiones (Darwin) y otra a una de altas presiones (Tahití) y que además las variaciones de presiones para ambos lugares son coincidentes e inversas, tal como se muestra en la Figura 35.

La metodología de estimación de este índice propuesta por NOAA (2010) está descrita como:

$$\sigma_{Tahiti} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (SLP_i - \overline{SLP})^2}{N}} \quad \sigma_{Darwin} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (SLP_i - \overline{SLP})^2}{N}}$$

$$St_{Tahiti} = \frac{SLP - \overline{SLP}}{\sigma_{Tahiti}} \quad St_{Darwin} = \frac{SLP - \overline{SLP}}{\sigma_{Darwin}}$$

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (St_{Tahiti_i} - St_{Darwin_i})^2}{N}}$$

$$IOS = \frac{St_{Tahiti} - St_{Darwin}}{\sigma_M}$$

Donde

- SLP : La presión media mensual al nivel del mar del mes analizado.
 \overline{SLP} : El promedio de las presiones medias mensuales para el mes analizado.
 N : El número de meses de la estadística.
 σ_{Tahiti} : La desviación estándar de las anomalías de presión en Tahití.
 σ_{Darwin} : La desviación estándar de las anomalías de presión en Darwin.
 St_{Tahiti} : Parámetro estandarizado de Tahití.
 St_{Darwin} : Parámetro estandarizado de Darwin.
 σ_M : Desviación estándar mensual.
 IOS : El Índice de Oscilación Sur.

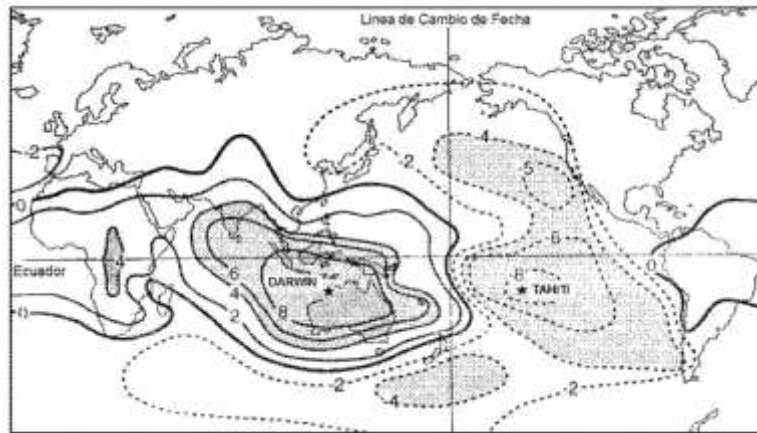


Figura 35. Variación de presión atmosférica entre Tahití y Darwin, que define al índice IOS. (Glantz 1998)

Un índice negativo corresponde a un evento Niño y un índice positivo corresponde a un evento Niña, a la inversa de los índices de anomalía de temperatura superficial del mar. Los umbrales considerados para este índice son 1 y -1, siendo la condición normal cuando el índice se encuentra entre los umbrales.

La estadística de índices que caracterizan ENOS, tanto SSTA como IOS, ha sido obtenida del sitio web de la National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA 2010). La extensión de dicha estadística va de 1950 a 2010 para los SSTA, mientras que para IOS la estadística va de 1951 a 2010, y que se representan como series de tiempo en paralelo en la Figura 36, donde la fase cálida se presenta en rojo y la fase fría en azul.

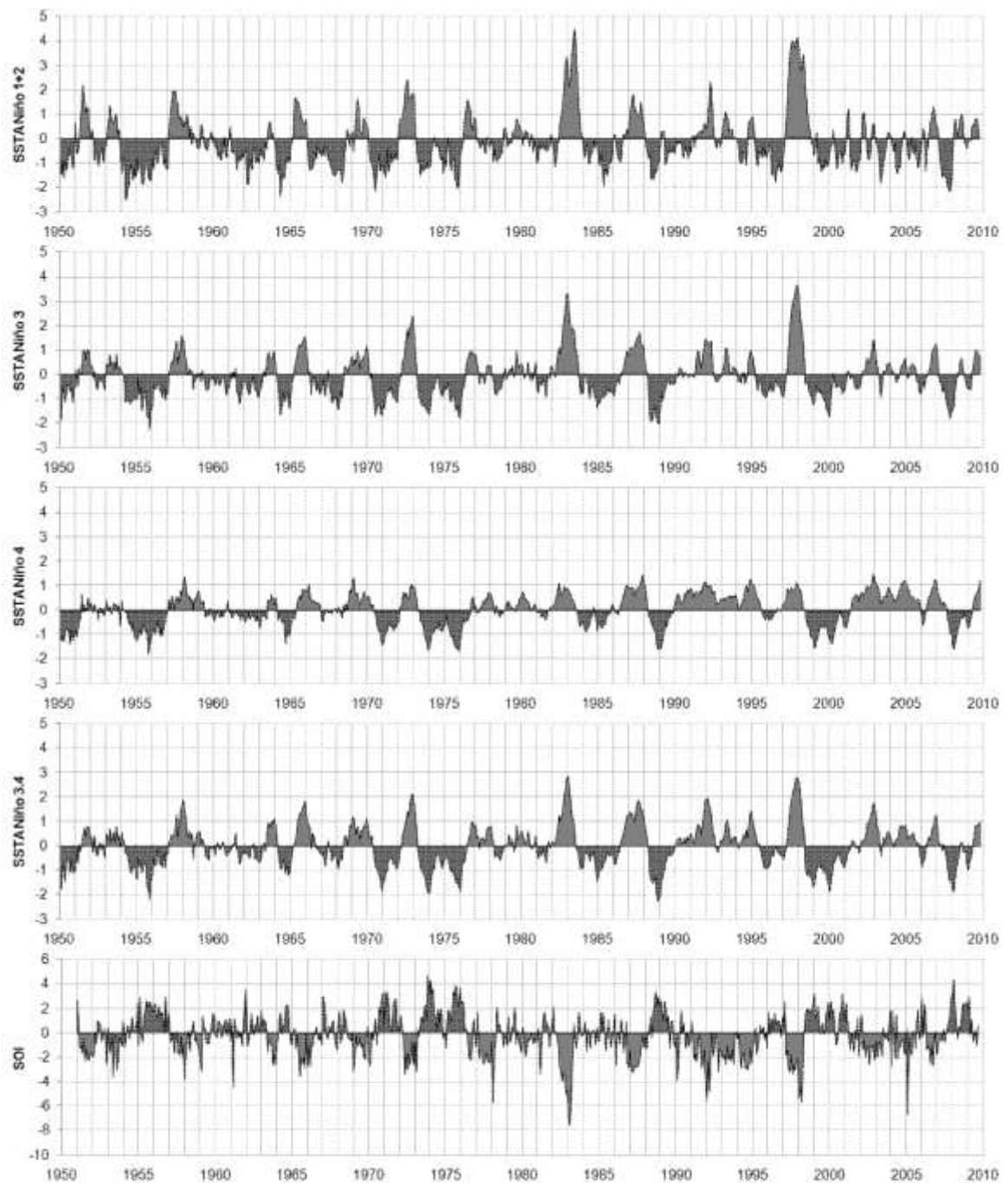


Figura 36. Índices que describen ENOS, (en SSTA) positivo eventos Niño (fase cálida) y negativo eventos Niña (fase fría) (en SOI a la inversa).

Se observa una gran similitud entre las series en cuanto a la descripción de un evento Niño como Niña, presentándose solo de manera inversa la serie de IOS.

En cuanto a las características del fenómeno, destaca la irregularidad en la frecuencia, duración y magnitud que tienen sus fases, no obstante, siempre después de un evento niño ocurre una Niña, lo que permite definir al fenómeno como *Cíclico Irregular*.

Entre las diferencias presentadas entre Niño y Niña, destaca la mayor intensidad del primero, frente a la mayor duración del segundo en la mayoría de los casos.

Los eventos Niño más importantes ocurridos en la longitud estadística se desarrollaron en los años 1982-83 y 1997-98, mientras que los eventos Niña de mayor duración se presentaron en los años 1954-57, 1973-76 y 1998-2001.

En general es posible señalar que cada uno de los índices tiene la capacidad de identificar la ocurrencia de un evento ENOS, ya que se aprecia entre cada serie de índices mensuales una buena correlación, los que se presentan en la Tabla 4. Destaca que las mejores correlaciones entre índices corresponden a los presentados por el Niño 3.4 con los Niño 3 y Niño 4, donde la primera corresponde a un área que abarca parte de las dos siguiente.

Tabla 4. Correlaciones entre los índices ENOS.

	Niño 1+2	Niño 3	Niño 4	Niño 3.4	IOS
Niño 1+2	1	0.817	0.456	0.644	-0.475
Niño 3		1	0.722	0.938	-0.638
Niño 4			1	0.873	-0.668
Niño 3.4				1	-0.706
IOS					1

Si se retoma el origen del nombre *corriente de El Niño*, se considera la ocurrencia de dicho fenómeno cercano a la navidad (*El Niño* por *El niño Jesús*), vale decir que la ocurrencia de la fase cálida del fenómeno se da principalmente en esta época. La Figura 37 ratifica lo anterior, ya que al graficar el índice SSTA Niño 3.4 con respecto al mes de ocurrencia se observa que los mayores valores del índice alcanzados en los 60 años de estadística disponible han ocurrido entre diciembre y enero, sin embargo los eventos Niña también alcanzan su mayor expresión en esta época del año, aspecto relevante para algún tipo de diseño que considere eventos extremos de ENOS. También es destacable que en general el trimestre abril-mayo-junio tiene la condición normal para este fenómeno.

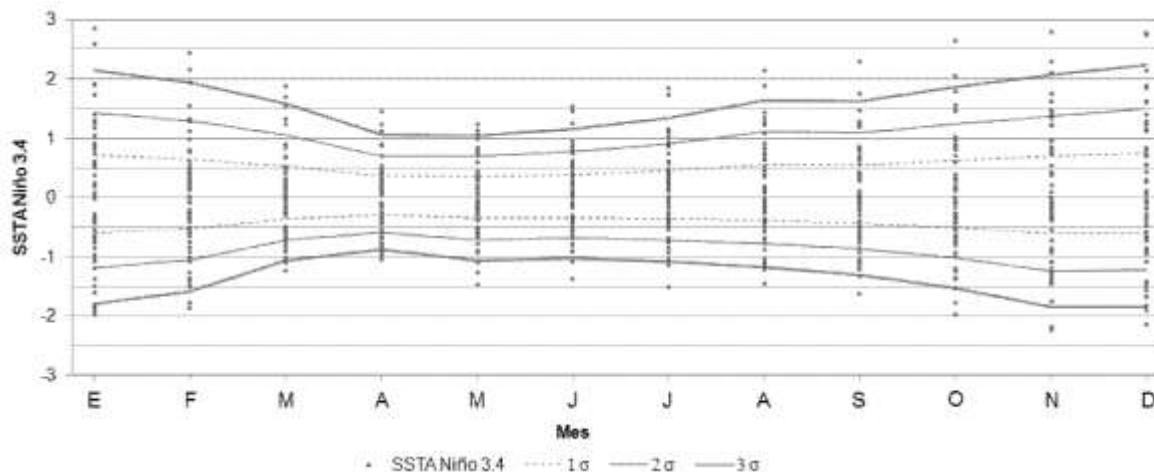


Figura 37. Ocurrencia histórica mensual de ENOS según índice SSTA Niño 3.4 (60 años) con desviaciones estándar asociadas a cada mes.

Considerando que para efectos de este estudio se utilizará estadística de oleaje que va desde 1985 a 2006, la Figura 38 presenta la evolución del índice SSTA Niño 3.4 en dicho periodo, donde destaca la presencia de uno de los eventos Niño de mayor intensidad presentados en la estadística original (1997-98) además de otros tres eventos de mediana intensidad y tres de menor intensidad.

En cuanto a los eventos Niña, se presentan dos de mediana intensidad (1988-89 y 1998-2001) además de tres de menor intensidad

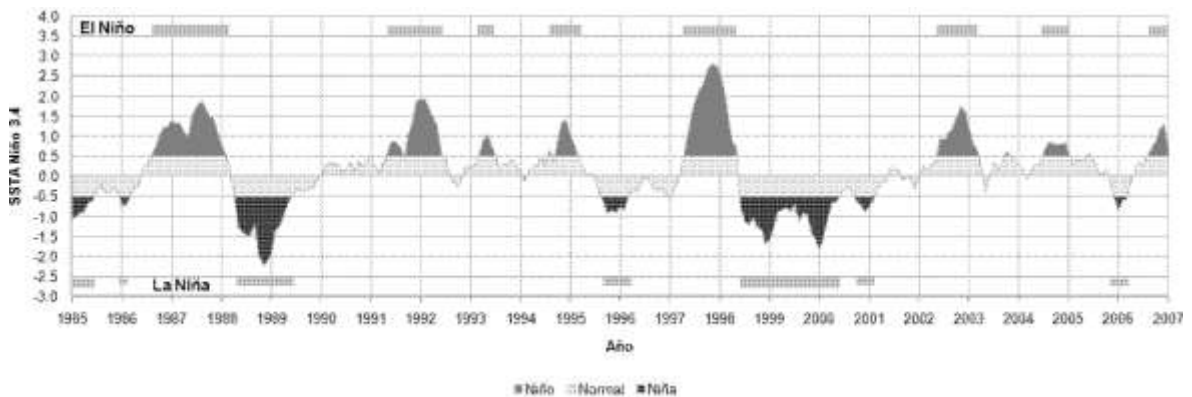


Figura 38. Ocurrencia de eventos ENOS en el intervalo de estadística de oleaje disponible.

3.4.4 INFLUENCIA DE ENOS EN EL PATRÓN DE VIENTOS

Considerando que el fenómeno ENOS tiene una escala global y que su desarrollo implica eminentemente variaciones en las condiciones de circulación atmosféricas, se realiza a continuación un breve estudio sobre los efectos de ENOS en la componente latitudinal de la circulación atmosférica, tal que permita visualizar posibles efectos de este fenómeno en las zonas de generación de oleaje. Dado además que es del interés de este estudio conocer dichos efectos en la costa central de Chile, se presenta en la Figura 39 un diagrama latitud tiempo de la anomalía de la componente zonal del viento en 200 [hPa] (equivalente al plano horizontal a 11.8 [km] de altura aproximadamente), correspondiente al promedio longitudinal entre 160°W y 90°W en el hemisferio sur, abarcando el desarrollo del evento Niño de 1997-98 y la fase Niña que lo secunda, ambos descritos por la serie del índice SSTA Niño 3.4 presentado simultáneamente para efectos de comparación.

Allí se observan los efectos de la fase cálida de ENOS consistente en una disminución en la intensidad de los vientos alisios (descrito en el capítulo 3.4.2) y un incremento en la magnitud de los vientos entre los 20° y 30° de latitud sur, no observándose variaciones significativas en latitudes mayores, sin embargo con la presencia de la fase fría (Niña) los vientos alisios (en torno al ecuador) retoman las intensidades características a la vez que se produce una notable disminución en la intensidad de los vientos entre los 20° y 30° de latitud sur. Más al sur, se manifiesta un incremento en la intensidad de los vientos entre los 40° y 60°, y un decremento entre los 60° y 80°.

En general, se presentan cuatro bandas de interacción de ENOS con los patrones de viento, ecuatorial hasta 10°S, 20°S a 30°S, 40°S a 60°S y 60°S a 80°S, en donde para todos los casos, las variaciones son bien representadas con el índice SSTA Niño 3.4.

Las bandas ecuatoriales y 40°S-60°S presentan anomalías con valores relacionados de manera inversa con el valor del índice ENOS, siendo la primera altamente sensible a la fase cálida y la segunda a la fase fría. Por el contrario, las anomalías de viento de las bandas 10°S-20°S y 60°S-80°S presentan una relación directa con los valores del índice SSTA Niño 3.4, con intensificaciones en evento Niño y disminuciones en evento Niña, siendo la primera banda altamente sensible a las variaciones de ENOS, mientras que la segunda, representante del frente polar antártico, presenta variaciones de menor magnitud.

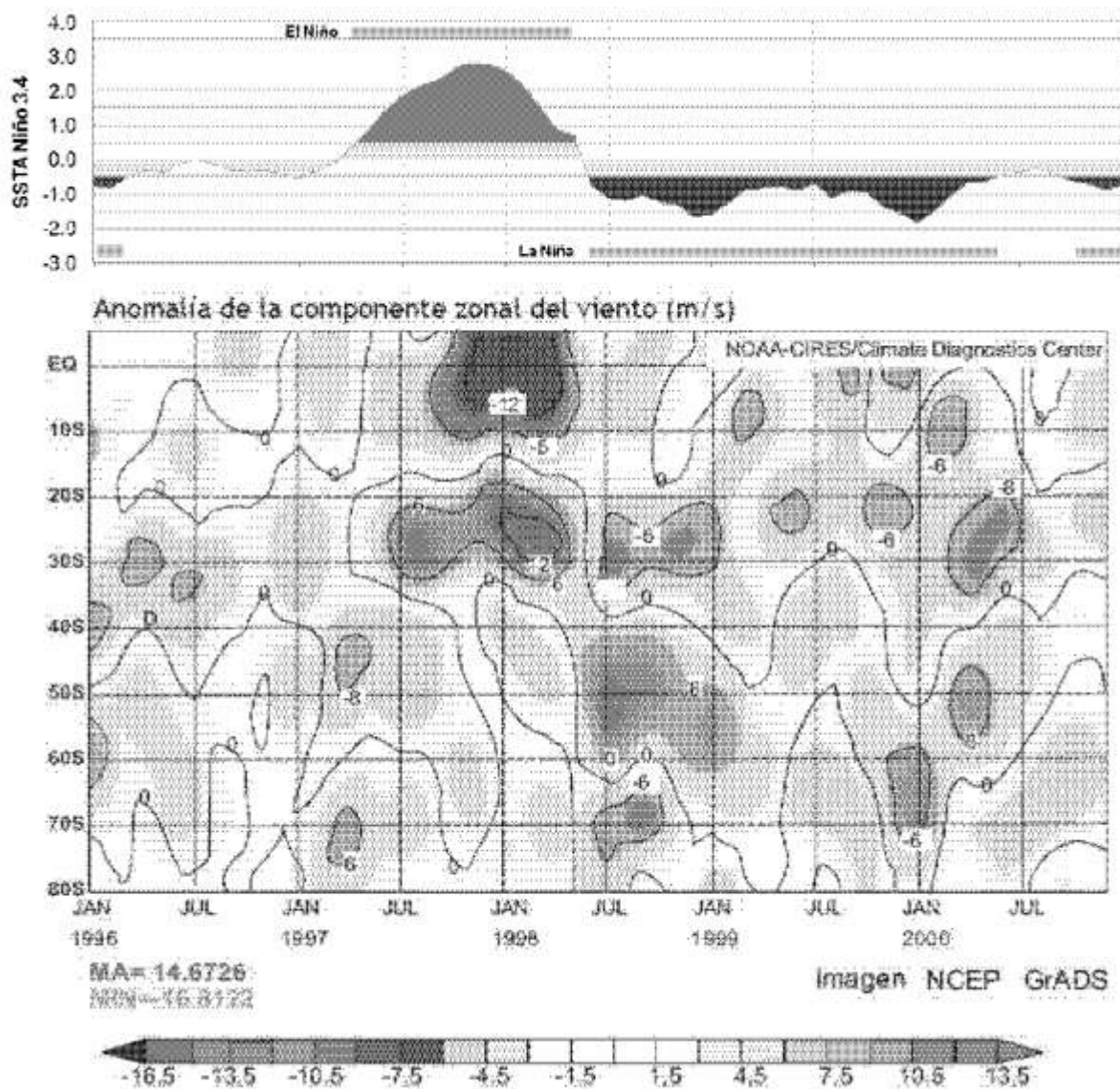


Figura 39. Diagrama Latitud-Tiempo de la anomalía de la componente zonal del viento (m/s) en 200 [hPa] promediado entre 160°W y 90°W (abajo), con serie del índice SSTA Niño 3.4 (arriba) para el intervalo de tiempo correspondiente.
(Adaptado de Avaria *et al.* 2004)

3.5 EL CALENTAMIENTO GLOBAL

En el último tiempo ha cobrado gran relevancia el cuidado del medio ambiente, acuñándose en algunas oportunidades el concepto del desarrollo sustentable, que dentro de otros aspectos consiste en la eliminación o disminución de la contaminación producida por los procesos industriales en una macro escala y de las actividades cotidianas de cada individuo en una micro escala. El surgimiento de este movimiento, que promueve el uso de energías limpias, el reciclaje y el ahorro energético, tiene dentro de sus motivaciones la importancia que ha cobrado el calentamiento global a la luz de los efectos que puede producir en el medio ambiente. Este fenómeno, que se ha desarrollado a una velocidad nunca antes vista, sugiere un cambio en las características climáticas de cada región de carácter irreversible, que pudieran implicar efectos zonales y globales como desertificación del suelo, intensificación de eventos extremos como lluvias o sequías, derretimiento de hielos milenarios, perturbación en ecosistemas, incremento del nivel del mar, reducción, fragmentación o eventualmente extinción de ciertas especies, etc.

Lo anterior permite suponer también que un cambio en las características climáticas podría implicar una modificación en el comportamiento de los vientos y por ende del oleaje, aspecto que se busca dilucidar en este trabajo, por lo cual se presenta a continuación una descripción del fenómeno.

3.5.1 EL EFECTO INVERNADERO

La atmósfera constituye un filtro de ondas electromagnéticas, que actúa como escudo protector contra los peligrosos rayos ultravioleta, pero permite el paso del espectro visible. La tierra al tener la capacidad de absorber la energía, transforma la energía de la luz solar en ondas caloríficas infrarrojas, las que son enviadas en dirección al espacio. Parte de estas ondas queda retenida en la atmósfera debido a la presencia de gases que en parte la absorben y en parte la reflejan de vuelta a la tierra, generándose el incremento de la temperatura de la atmósfera por la conservación de esta energía (Figura 40), fenómeno denominado *Efecto Invernadero* (Fuenzalida 1983).

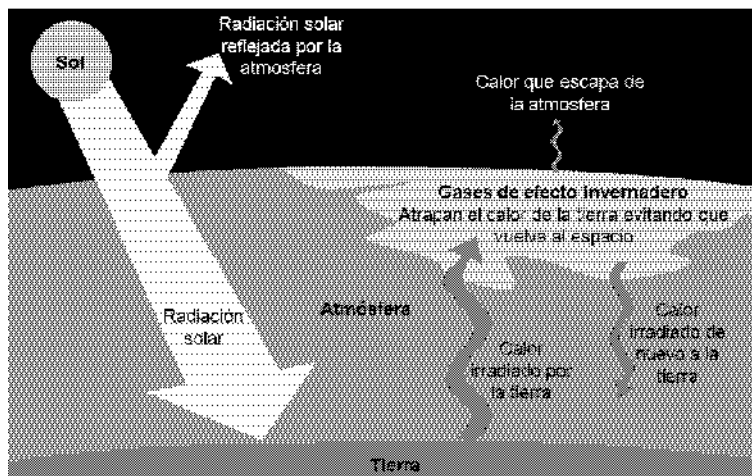


Figura 40. Esquema descriptivo del efecto invernadero.
(Adaptado de Anónimo)

La concentración de estos gases, denominados *Gases de Efecto Invernadero (GEI)*, define la cantidad de energía que puede ser retenida en la atmósfera, tal que se alcance un estado de equilibrio en el cual la energía entrante al sistema es equivalente a la saliente. Los principales GEI son el vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozono (O_3) y los halocarbonos (CFC, HFC, PFC).

3.5.2 EFECTO AMPLIADO DE INVERNADERO

Como se señaló en el capítulo anterior, la energía retenida en la atmósfera depende de la concentración de los GEI, los cuales se han mantenido relativamente constantes en la historia conocida. Sin embargo, desde comienzos del siglo XIX, se ha producido un incremento sostenido en las concentraciones de los GEI, lo que ineludiblemente lleva a una modificación en el estado de equilibrio alcanzado por el efecto invernadero, lo que se denomina *Efecto Ampliado de Invernadero* (UNFCCC 2004). Dado que la concentración de vapor de agua no se encuentra directamente relacionada con la actividad humana, no está considerada dentro de los causantes del efecto ampliado de invernadero, sin embargo a las restantes se les atribuye el origen de este fenómeno, responsabilizándose al dióxido de carbono en un 60%, al metano en un 20% y al Óxido nítrico el restante 20%. La Figura 41 señala la evolución de las concentraciones atmosféricas mundiales en los últimos 1000 años de estos tres GEI:

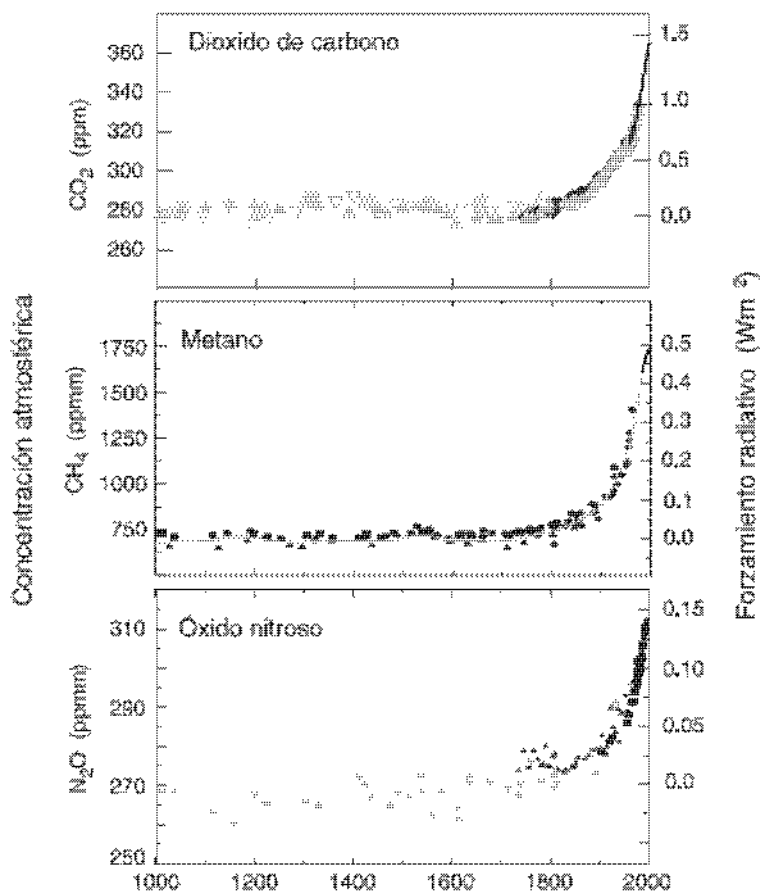


Figura 41. Concentraciones atmosféricas mundiales de tres gases de efecto invernadero. (UNFCCC 2004)

De esta figura se observa el incremento de tipo exponencial presentado a contar del siglo XIX en cada uno de los GEI analizados, donde el incremento de concentración está asociado al forzamiento radiativo que produce respecto a la condición estable original, esto es, el incremento en la energía por metro cuadrado absorbida por el sistema por sobre la condición estable u original debido al incremento de la concentración del GEI correspondiente. Al respecto es posible señalar que el gas con mayor forzamiento radiativo es el dióxido de carbono (CO₂) con 1.5 [Wm²] aun cuando su concentración no se incrementó tanto como la del metano (CH₄) que llegó a más del

doble. Con todo, la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC 2004) señala que el aumento en las concentraciones de los GEI ya han incrementado el balance mundial de energía en 2.5 Watts por metro cuadrado al año 2004.

Un estudio más reciente realizado por Trenberth, Fasullo y Kiehl del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de EEUU (NCAR por sus siglas en inglés) el año 2008 indica con mayor detalle el balance energético anual en términos de la energía entrante, reflejada, absorbida, transformada y saliente, cuyos principales resultados se presentan en la Figura 42.

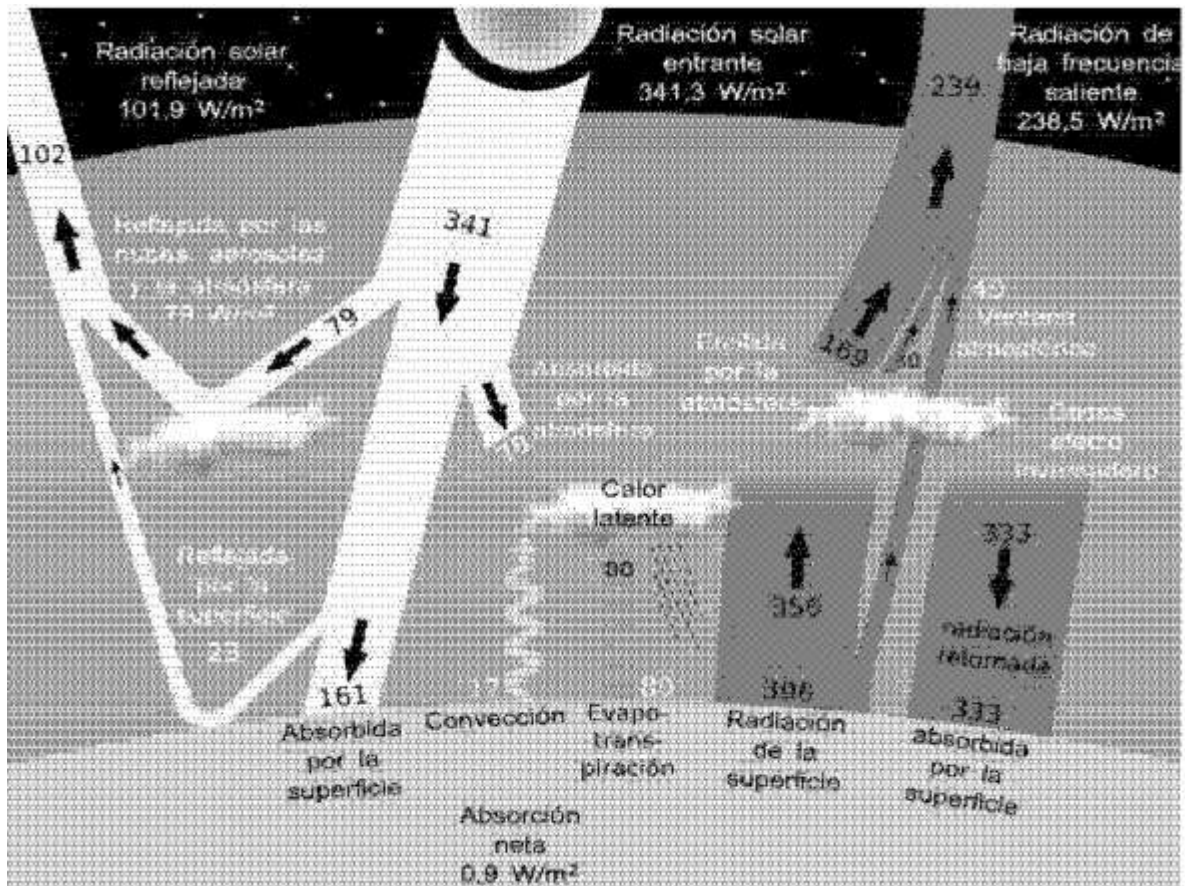
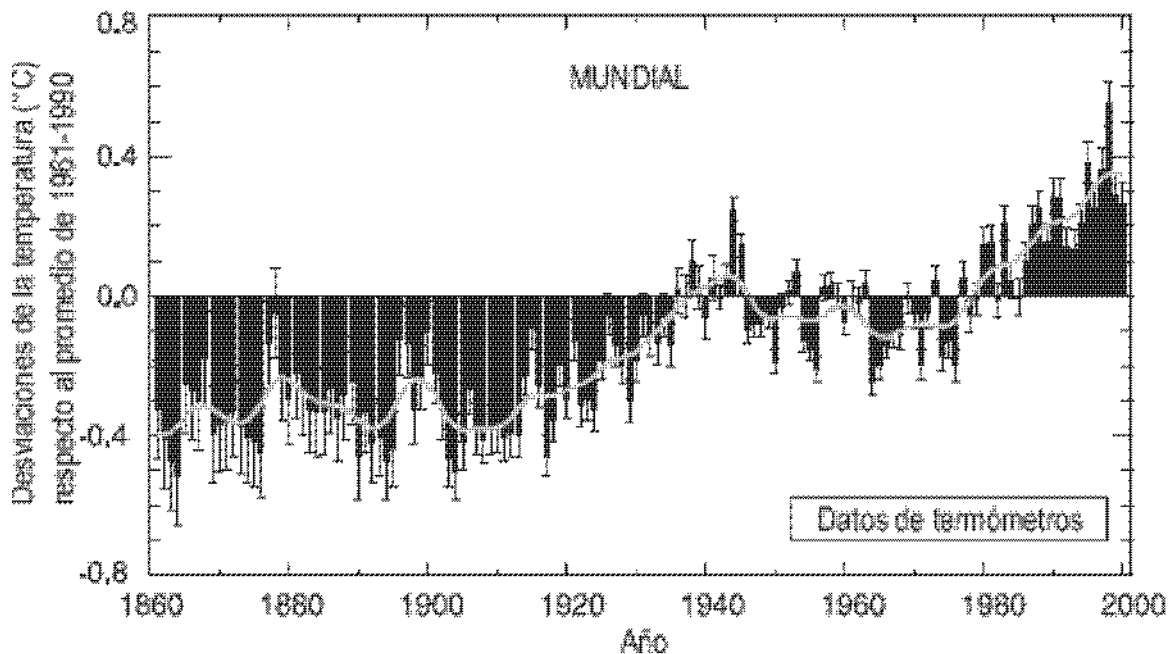


Figura 42. Balance anual de la energía en la Tierra.
(Trenberth *et al.* 2008)

Del balance de energía presentado por Trenberth *et al.* 2008 se desprenden cada una de las componentes de energía que interactúan en el sistema atmosférico de la tierra y que debido a la presencia del efecto ampliado de invernadero el sistema posee una absorción neta de 0.9 [W/m²], lo que implica un incremento sostenido de la cantidad de energía de la tierra.

3.5.3 EVIDENCIA DE CALENTAMIENTO GLOBAL

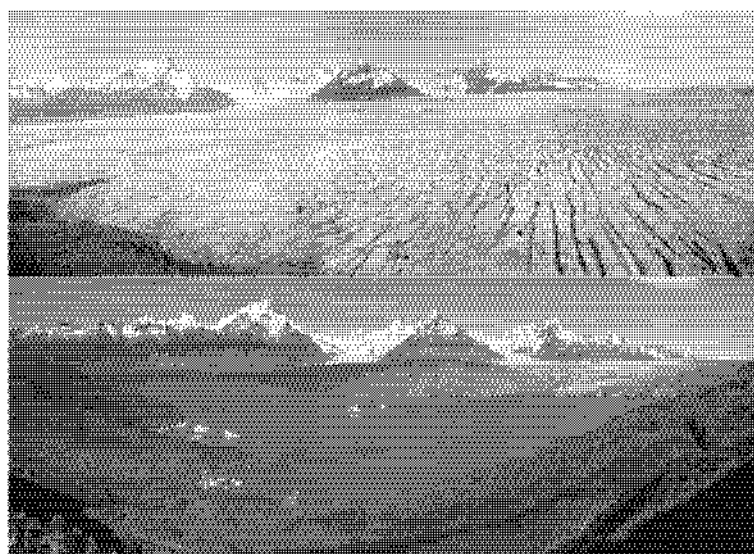


**Figura 43. Temperatura media del planeta entre 1880 y 2000.
(UNFCCC 2004)**

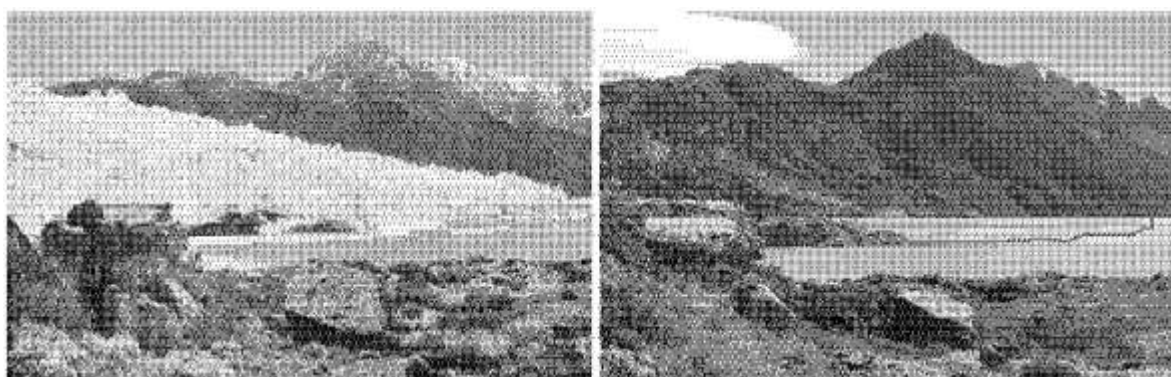
La serie presentada en la Figura 43 describe la temperatura media del planeta desde 1860 a 2000 en términos de las desviaciones respecto del promedio obtenido entre 1961 y 1990. La desviación positiva observada a contar de la década del 80 evidencia un calentamiento del globo respecto al lapso considerado para el promedio, pero la desviación negativa presentada desde 1860 a 1930 sugieren un calentamiento global que comienza a manifestarse en los inicios del siglo XIX, coincidente con el incremento de las concentraciones de gases invernadero descrito en el capítulo del Efecto Ampliado de Invernadero (Figura 41).

Si se considera además que el principal GEI, el vapor de agua, no es principalmente generado por causa de la actividad humana, sino que por el ciclo natural del agua, y que este ciclo debiera incrementarse por el aumento de la temperatura del planeta, es de esperar que las concentraciones de vapor de agua en la atmósfera aumente, incrementando así el efecto ampliado de invernadero y por ende la temperatura del planeta, formándose así un ciclo retroalimentativo.

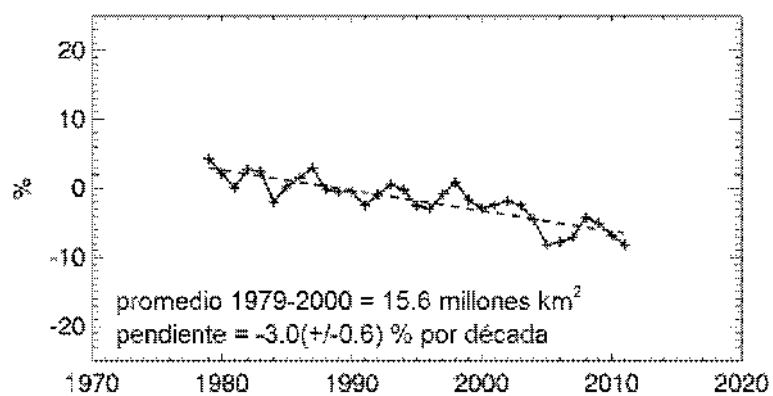
De esta forma es esperable que, manteniéndose las condiciones de emisiones en la actualidad, continúe el incremento en la temperatura del planeta, que a la fecha es casi de 1°C respecto a la temperatura de la década de 1860 (Figura 43) manifestándose en distintos puntos del planeta principalmente en la disminución del tamaño de glaciares milenarios y en el desprendimiento de grandes masas de hielo desde los polos. Evidencia de esto último son los niveles de los glaciares Uspala y Viedma en Argentina presentados como imágenes comparativas en la Figura 44 y Figura 45 respectivamente, mientras que la Figura 46 presenta la evolución de la anomalía anual de la superficie de hielo en el hemisferio norte entre 1979 y 2011.



**Figura 44. Derretimiento del glaciar Uspala (Argentina) de 1928 a 2004.
(Greenpeace 2010)**



**Figura 45. Derretimiento glaciar Viedma (Argentina) de 1930 a la actualidad.
(Greenpeace 2010)**



**Figura 46. Evolución de la anomalía anual de la superficie de hielo en el hemisferio norte.
(Adaptado de NSIDC 2011)**

3.5.4 PROYECCIONES

En virtud de las evidencias del calentamiento global, resulta natural preguntarse acerca de lo que podría ocurrir en el siglo que comienza, ya que el sistema de desarrollo de la humanidad continúa con el uso de combustibles fósiles y los procesos que emiten GEI. Al respecto se han desarrollado distintos modelos de pronóstico de las condiciones de Calentamiento Global que se presentarán en el futuro, destacándose el Informe Especial de Escenarios de Emisiones IEEE desarrollado por el IPCC en el año 2000, que presenta distintos escenarios agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1 B2) que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando toda una serie de fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas, junto con las emisiones de GEI resultantes. Dichas familias se describen a continuación:

1. A1: Presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos, que reflejan tres direcciones alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B).
2. B1: Describe un mundo convergente, con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información.
3. B2: Describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental.
4. A2: Describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento, y cambio tecnológico lento.

Las proyecciones asociadas a cada escenario en cuanto a la emisión de GEI y a la temperatura del planeta para el siglo XXI se presentan en la Figura 47:

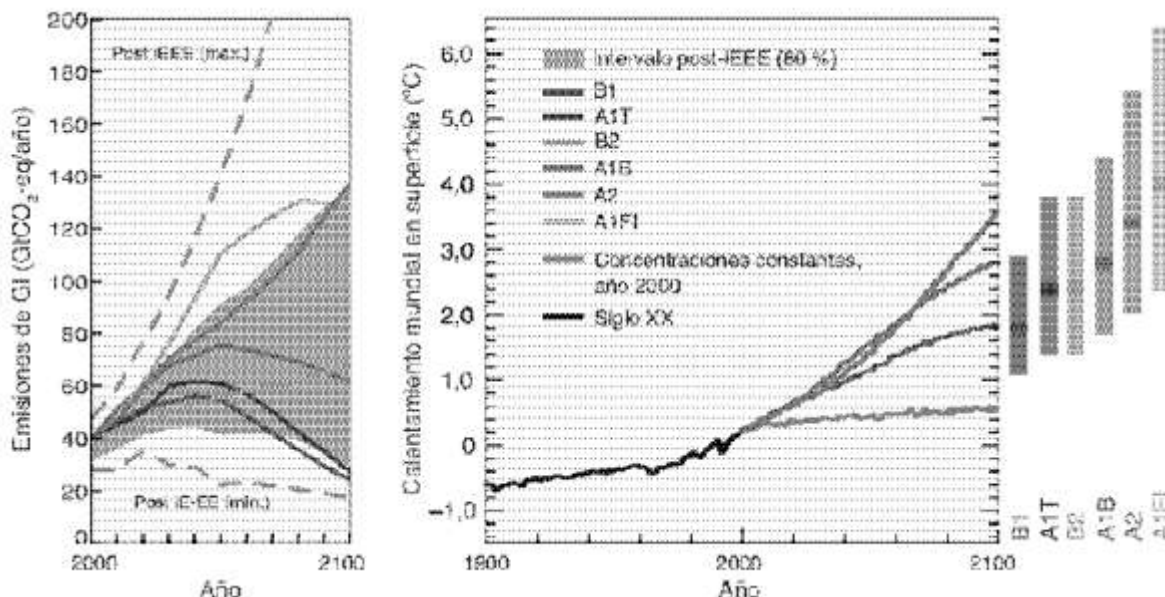


Figura 47. Escenarios de emisiones de GEI de 2000 a 2100 y proyecciones de la temperatura. (IPCC 2007)

De las proyecciones expuestas es posible observar que existen perspectivas optimistas y pesimistas respecto al desarrollo de este siglo, presentándose desde emisiones que disminuirán al final del siglo (B1 y A1T) hasta escenarios en la que las emisiones son el triple del que se presenta en la actualidad (A2), estos escenarios implican que en los casos extremos la temperatura media del planeta se incrementará entre 1.8°C y 3.6°C para los escenarios B1 y A2 respectivamente. En el caso hipotético que las concentraciones se mantengan constante e iguales a la situación actual a lo largo del siglo, la temperatura del planeta de igual forma elevará su temperatura, pero hasta 0.5°C respecto del nivel actual.

De esta forma, independiente de los escenarios que se consideren, el calentamiento global seguirá su curso, hasta un nivel que en la actualidad se desconoce.

La Figura 48 describe los cambios de temperatura en todo el globo para la última década del siglo XXI considerando el escenario A1B y estableciendo las diferencias respecto a la temperatura media del intervalo 1980-1999. En ella se observa que las mayores variaciones se producen en el hemisferio norte debido principalmente a la mayor proporción de tierra con respecto al hemisferio sur, lugar donde las grandes masas de agua de los océanos en conjunto con el continente Antártico actúan como amortiguador de las diferencias de temperatura.

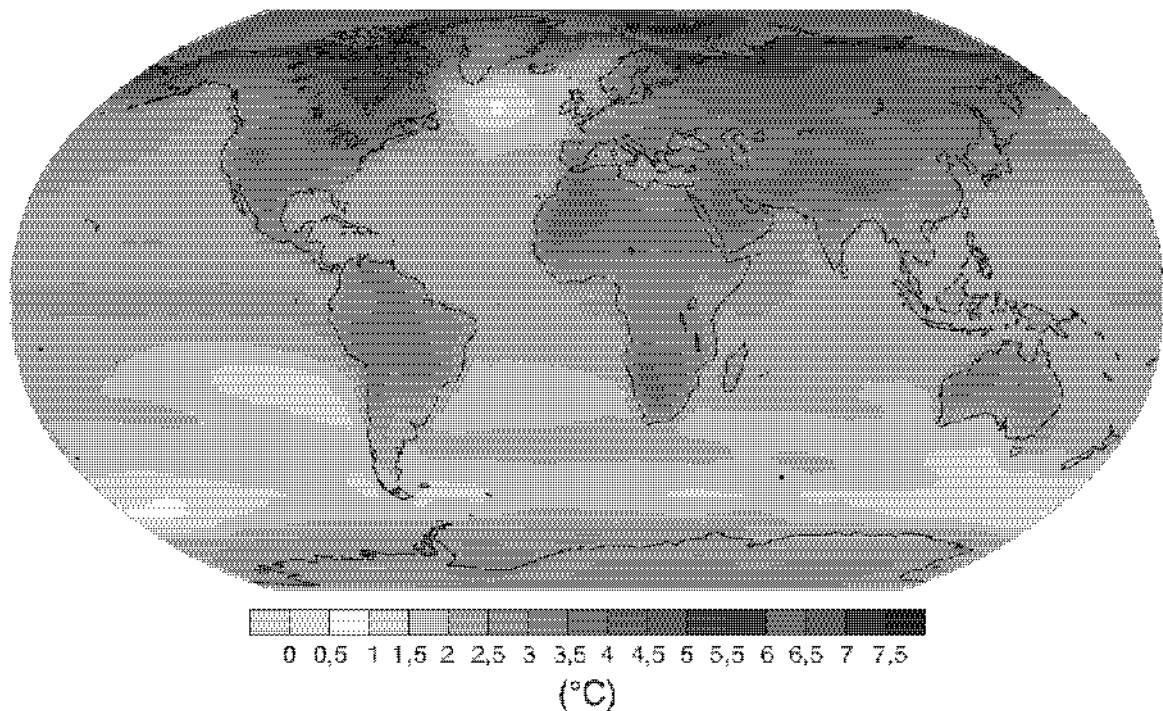


Figura 48. Cambios de temperatura superficial mundial proyectados para finales del siglo XXI (2090-2099) respecto al periodo 1980-1999 para el escenario A1B. (IPPC 2007)

3.5.5 INFLUENCIA DEL CALENTAMIENTO GLOBAL EN EL PATRÓN DE VIENTOS

En la medida que se requiera establecer los efectos que pueda tener el calentamiento global en el oleaje, es preciso identificar previamente los impactos que este fenómeno tenga en los campos de viento, debido a que este último es el principal mecanismo de generación del oleaje.

Al respecto, Garreaud y Falvey (2008) analizan las proyecciones de los vientos costeros en Chile para los escenarios climáticos futuros definidos por el IPPC en 2000. El trabajo analiza los resultados de 15 modelos globales de circulación océano-atmosférica en que, a partir de los datos observados entre 1961 y 1990, se obtiene la condición atmosférica base del siglo 20 (denominado BL o 20C), la que se presenta en la Figura 49 (a) como las condiciones medias de los campos de viento superficiales y presión para los meses de primavera y verano (septiembre a febrero). A partir de esta condición (calibrada con 5 años de mediciones satelitales), se estiman las condiciones a partir de los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero A2 y B2, obteniéndose las condiciones medias de viento y presión superficial a nivel global. La Figura 49 b) presenta la diferencia entre la condición base y el escenario A2 proyectado para fines de siglo (1971 a 2100), en donde se observa el incremento de la intensidad de los vientos en los frentes polares, en latitudes medias y en las cercanías del ecuador, mientras que también se observa un incremento de la presión superficial en latitudes medias y una disminución hacia los polos. Particularmente en el caso del Pacífico sur, el incremento en el viento del frente polar antártico es en torno a 1 [m/s] sobre una condición actual cercana a 5 [m/s], mientras que las variaciones de presión llegan a 3 [hpa] y -2 [hpa] en latitudes medias y en el frente polar antártico respectivamente.

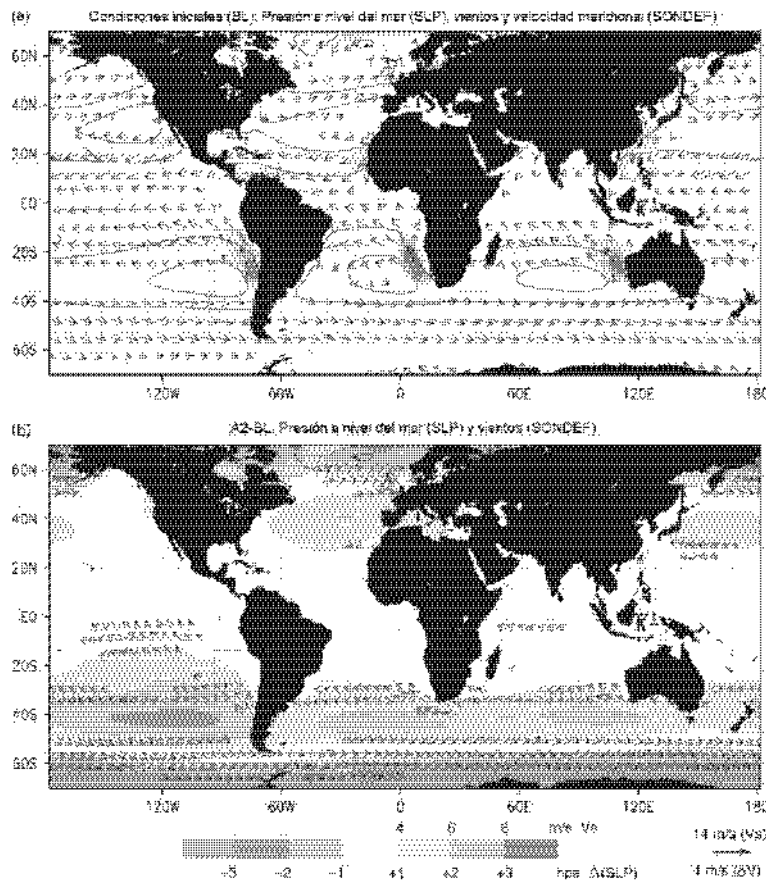


Figura 49. Vientos y presiones medias entre septiembre y febrero para la condición base (a) y su diferencia respecto al escenario A2 (b). (Garreaud y Falvey 2008)

3.6 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE OLEAJE NO ESTACIONARIO

3.6.1 PROBLEMÁTICA DEL ANÁLISIS TRADICIONAL

Los estudios de oleaje tradicional son realizados considerando un supuesto fundamental, que el oleaje es *estacionario*. Según la Real Academia de la Lengua Española (RAE), estacionario se define como:

estacionario, ria. (Del lat. *stationarius*).

3. adj. Fís. Dicho de un fenómeno físico: Que se reproduce de forma idéntica a lo largo del tiempo.

Así, un fenómeno estacionario es aquel que permanece constante o estable en el tiempo. En términos matemáticos (Parzen 1999) se señala que:

“...un proceso estacionario es aquel cuya distribución sigue siendo la misma con el paso del tiempo... lo cual ocurre cuando se cumple:

$$E(Y_t) = m, \text{ o media constante,}$$

$$\text{Var}(Y_t) = E(Y_t - m)^2 = \sigma^2, \text{ o varianza constante, y}$$

$$\text{Cov}(Y_t; Y_{t-j}) = \text{Cov}(Y_{t+m}; Y_{t+m-j}), \text{ o covarianza constante.”}$$

Este término aplicado al oleaje implica que la condición reinante futura a lo largo de la vida útil de una obra que se diseña (operacional) será la misma que la presente en la estadística disponible, mientras que el oleaje asociado a un cierto periodo de retorno (oleaje extremal) utilizado para el diseño estructural de una obra es estimado a partir de la función de distribución de probabilidad que presenta dicha estadística.

Sin embargo, la condición estacionaria que se presupone para el oleaje no es aplicable a dos fenómenos de escala global que tienen influencias en las zonas de generación: el fenómeno de El Niño – Oscilación Sur (ENOS) y el Calentamiento Global (ver sub capítulo 3.4.4 y sub capítulo 3.5.5 respectivamente). El primero es un fenómeno cíclico irregular, esto es, posee una fase positiva y luego una negativa, pero que no posee una periodicidad; mientras que el segundo es un fenómeno tendencial que se ha manifestado en los últimos 50 años, el cual, independiente de tener origen natural o antropogénico, ha producido un incremento de la temperatura media del planeta en alrededor de 0.5°C. Si bien, en sentido estricto la condición cíclica irregular no asegura la condición no estacionaria de ENOS como sí ocurre con el Calentamiento Global por su variación de la media en el tiempo, observaciones recientes dan cuenta del debilitamiento de la circulación oceánica ecuatorial (asociado a ENOS) reduciendo la surgencia en dicho sector en torno a un 25% desde mediados de la década del 70 (Werlinger 2004), por lo que esta variación en el tiempo hace de ENOS un fenómeno no estacionario.

La incorporación de estos fenómenos, como agentes de la generación, invalida la condición estacionaria supuesta para el oleaje. No obstante, si se logran mitigar de la estadística los efectos producidos por estos dos fenómenos (no estacionarios), es posible suponer (bajo ciertas condiciones) que la serie resultante sería estacionaria.

Dado lo anterior, resulta necesario diseñar un estudio de oleaje no estacionario que permita identificar la influencia de ENOS y el Calentamiento Global en el oleaje, a fin de mejorar la comprensión del fenómeno oleaje y así obtener pronósticos con menor incertidumbre que permitan disminuir los riesgos asociados en las obras marítimas.

3.6.2 HIPÓTESIS DEL OLEAJE NO ESTACIONARIO

Para el desarrollo del presente estudio se consideran una serie de hipótesis, las que se enumeran y tratan a continuación:

1. Análisis estacionario insuficiente para caracterizar oleaje.
2. Análisis se basa en el clima medio y se descarta el clima extremo.
3. El oleaje puede ser representado por índices mensuales
4. La estadística es representativa solo del oleaje del Pacífico sur.
5. Estadística de modelos *hindcasting* es válida para el estudio.
6. Calentamiento Global se comporta como tendencia lineal.
7. ENOS tiene comportamiento cíclico irregular.
8. ENOS y Calentamiento Global, pueden ser independientes.
9. El oleaje es representado como modelo aditivo.

3.6.2.1 Análisis estacionario insuficiente para caracterizar oleaje

La suposición estacionaria del oleaje simplifica su caracterización y proyección futura, considerando que cualquier variabilidad distinta a la explicada por las estaciones del año es despreciable en la vida útil del proyecto a desarrollar.

No obstante, la influencia de los fenómenos ENOS y Calentamiento Global pueden provocar alteraciones significativas en el oleaje en un horizonte menor al proyectado para la obra, implicando esto la posibilidad de obtener tasas de disponibilidad, costos de reparación y/u operación, tasa de retorno de inversión y/o vida útil distinta a las estimadas en la fase de evaluación del proyecto.

Así, un análisis no estacionario de oleaje proveerá mayor información que uno estacionario para la toma de decisiones respecto a un proyecto, ya que se alcanza una mejor comprensión del fenómeno y una menor incertidumbre respecto al comportamiento futuro del mismo.

3.6.2.2 Análisis se basa en el clima medio y se descarta el clima extremo

Considerando que los fenómenos ENOS y Calentamiento Global (capítulos 3.4 y 3.5 respectivamente) se encuentran representados por índices mensuales, solo es posible realizar un análisis a las variaciones del clima medio de oleaje, ya que éste es estimado a partir del comportamiento de toda la estadística disponible, y representa la condición de mayor recurrencia que presenta el oleaje, denominado *oleaje reinante*.

Por el contrario, la caracterización extremal del oleaje (*dominante*) queda marginada de cualquier análisis ya que ésta se efectúa mediante la selección de eventos cuya duración es generalmente de algunos días, no siendo compatible su comparación directa con los índices mensuales de ENOS y Calentamiento Global.

Dado lo anterior se descarta analizar los aspectos de no estacionariedad del oleaje en el clima extremo, y solo se considera el análisis de clima medio.

3.6.2.3 El oleaje puede ser representado por índices mensuales

Para efectos comparativos con los fenómenos ENOS y Calentamiento Global, los parámetros de oleaje deben presentarse en la misma escala temporal, es decir, valores mensuales. Por otro lado, la verificación de la condición estacionaria debe realizarse a partir del promedio y la desviación estándar, estadígrafos que deben mantenerse constantes en el tiempo para esta verificación.

De esta forma, se ha dispuesto generar series de promedios y desviaciones estándar mensuales por cada parámetro considerado en los 20 años de extensión de la estadística, siendo el primero representante de la condición media que describe el parámetro a lo largo del mes, mientras que el segundo describe la variabilidad del mismo respecto a la media.

En cuanto a la variable *tiempo* de las series, cada mes es representado por un dígito en términos de año, siendo denominado *fecha* y obtenido de la forma:

$$fecha = año + \frac{(mes - 1)}{12}$$

Donde año y mes se expresan en cifras y son correspondientes a la fecha que se analiza. Así, enero de 1988 y julio de 2005 equivaldrán a 1988.00 y 2005.50 respectivamente.

3.6.2.4 La estadística es representativa solo del oleaje del Pacífico sur

Dentro de los parámetros de resumen espectrales considerados se encuentran el periodo y dirección *peak*, estos representan los valores alcanzados por el mayor componente de energía (no necesariamente el único). Esto implica que dichos parámetros clasificarán el tipo de oleaje del estado de mar, siendo del tipo *swell* NW todos aquellos que tengan dirección mayor a 270° y periodo superior a 16 [s].

Se analizan todos los estados de mar que están asociados al *swell* NW (por cada nodo) y se construye una tabla de frecuencia separados por rango de dirección y periodos (Tabla 5).

Los resultados indican que para todos los nodos, la presencia de estados de mar con oleaje característico del tipo *swell* NW oscila entre 0.77% y 1.21% del total de los datos.

Considerando la baja frecuencia de ocurrencia del tipo de oleaje en cuestión, y además que los restantes estados de mar que provienen del cuarto cuadrante y que tienen periodos menores a 16 segundos son generados por sistemas locales (dentro del hemisferio), entonces es posible afirmar que la estadística de oleaje en cuanto a su generación es representativa solo del Pacífico sur.

Tabla 5. Frecuencia del Swell NW en cada nodo.

		Dir _p [°]							
		Nodo 31		Nodo 35		Nodo 37		Nodo 39	
		WNW	NW	WNW	NW	WNW	NW	WNW	NW
T _p [s]	16 - 18	0.13	0.78	0.13	0.84	0.11	0.56	0.11	0.52
	18 - 20	0.03	0.15	0.03	0.16	0.02	0.09	0.02	0.08
	20 - 22		0.02		0.02		0.00		0.02
	22 - 24	0.01	0.02		0.03		0.02		0.02
Total		1.14		1.21		0.80		0.77	

3.6.2.5 Estadística de modelos *hindcasting* es válida para el estudio

Dado que la estadística empleada proviene de una fuente secundaria de información (modelo que obtiene oleaje a partir de forzante viento y calibrado con altimetría satelital), se verifica su fiabilidad para representar fenómenos de larga duración. Al respecto, si se considera que se revisará la influencia de los fenómenos ENOS y Calentamiento Global mediante la condición media mensual del oleaje; que la altimetría satelital presenta una relación 0.95:1 respecto a una medición en terreno (Figura 19a); y que en el proceso de calibración se verificó que la estadística de *hindcasting* en la costa central de Chile tiene una regresión lineal con pendiente entre 1.000 y 1.004 respecto a la altimetría satelital (Figura 63 Anexo 9.1), es posible asegurar que la estadística de los modelos de *hindcasting* es válida para describir la influencia de los fenómenos ENOS y Calentamiento Global en el oleaje.

3.6.2.6 Calentamiento Global se comporta como tendencia lineal

Al observar el comportamiento del índice GLOTI (que describe el Calentamiento Global), descrito en la Figura 64 del Anexo 9.1 mediante la serie de tiempo disponible y un filtro triangular de 5 años, es posible advertir la presencia de un comportamiento principal de variabilidad interanual uniforme, asociable a una tendencia, con fluctuaciones mensuales en torno a este comportamiento principal. Este comportamiento permite describir una condición futura del fenómeno como la tendencia identificada (lineal, polinomial, exponencial, logarítmica, potencial, etc.) más una desviación o intervalo de confianza asociada a la variabilidad mensual. En efecto, si se observa con detalle el lapso contemporáneo a la estadística de oleaje, es asociable a una tendencia lineal, cuyo comportamiento también es observable en las proyecciones de las emisiones de GEI y de la temperatura media del planeta en distintos escenarios para finales de siglo, según lo descrito en la Figura 47 del sub capítulo 3.5.4.

Dado lo anterior, y considerando que el Calentamiento Global es un fenómeno de largo plazo, este se tratará como una tendencia lineal en el lapso de interés.

3.6.2.7 ENOS tiene comportamiento cíclico irregular

Según lo visto en el sub capítulo 3.4.2, ENOS es un fenómeno cíclico que manifiesta una fase cálida seguida de una fría, pero sin una periodicidad establecida (irregular). Y esto se ha manifestado en las series de todos los índices disponibles (ver Figura 36), y particularmente en el lapso contemporáneo a la estadística de oleaje, descrito en la Figura 65 del Anexo 9.1.

Considerando esto, y a pesar de que los registros son relativamente recientes (a contar de la década del 50), lo que no permite asegurar que mantenga dicho comportamiento, se considerará que el fenómeno ENOS seguirá siendo cíclico e irregular en las proyecciones que se realicen.

3.6.2.8 ENOS y Calentamiento Global, pueden ser independientes

Si se considera que tanto ENOS como el Calentamiento Global son descritos por índices relacionados con temperatura (SSTA Niño y GLOTI respectivamente, ver capítulos 3.4 y 3.5), resulta probable que ambos fenómenos puedan estar relacionados de alguna forma. En esto, si se considera que Klaus Wyrtki (referido en Glantz 1998) propone que el fenómeno ENOS corresponde a un mecanismo mediante el cual la tierra libera el exceso de calor en el ecuador disipándolo hacia los polos, y además, que el Calentamiento Global corresponde a un incremento progresivo de la temperatura planetaria, es posible suponer que este último puede modificar la frecuencia e intensidad de los ciclos de ENOS, de lo cual da indicios las variaciones interdecadales en la surgencia ecuatorial, la cual ha disminuido cerca de un 25% desde mediados de la década del 70 (Werlinger 2004).

Aun cuando la dependencia entre ambos fenómenos puede ser posible, ello no implica necesariamente que las influencias de cada fenómeno en el oleaje también lo sean, ya que esto último se realizará mediante la comparación de los índices mensuales de ENOS y del Calentamiento Global con los estadígrafos mensuales por parámetro del oleaje.

No obstante lo anterior, y para tener una visión simplificada del comportamiento de ambos fenómenos, se ha realizado un estudio de los índices GLOTI y SSTA Niño 3.4, en el que se comparan las series de tiempo y se realiza una dispersión de los datos entre 1950 y 2010, cuyos resultados se presentan en la Figura 66 en el Anexo 9.1. En general, se observa el comportamiento tendencial del índice GLOTI, mientras que el índice SSTA Niño 3.4 está centrado en cero. Comparativamente las series comienzan con una alta similitud en la década de 1950, disminuyendo su relación conforme el tiempo avanza. Para caracterizar dicha relación, se presentan las correlaciones para cada década, donde la mayor similitud alcanza en la primera década la correlación 0.67, mientras que la menor se presenta en la década de 1990 con correlación 0.09. Las décadas de 2000 y 1970 presentan correlaciones cercanas a 0.42, mientras que las de 1960 y 1980 no superan la correlación 0.20.

Se analiza además como correlación y dispersión las series totales y la contemporánea a la estadística de oleaje disponible (1985 a 2006), presentándose una mejor correlación en la serie total (0.2557) que en la de interés (0.1815), mientras que si se considera la pendiente de la tendencia lineal ajustada a las dispersiones como el grado de influencia entre los fenómenos, la serie completa presenta el doble de la influencia que se encuentra en la ventana de interés.

Dado lo anterior, y considerando que la ventana de interés presenta las menores relaciones entre los fenómenos ENOS y Calentamiento Global (tanto en correlación como influencia) respecto al total de la información disponible, se considera en adelante que ambos fenómenos no se encuentran influenciados entre sí, constituyendo esto la independencia entre ellos.

3.6.2.9 El oleaje representado como modelo aditivo

La consideración de independencia entre ENOS y el Calentamiento Global permite identificar sus influencias en el oleaje por separado. Esto también permite considerar el oleaje como un modelo aditivo, en el cual, el oleaje observado es representado mediante el oleaje presente bajo la condición normal de ENOS y del Calentamiento Global más las variaciones producidas por ambos fenómenos en un mes determinado, lo cual se trata con mayor detención en el sub capítulo 3.6.3.

3.6.3 EL OLAJE COMO MODELO ADITIVO

Ineludiblemente, identificadas las influencias de ENOS y el Calentamiento Global en los patrones globales de viento (ver sub capítulos 3.4.4 y 3.5.5), el oleaje sufrirá variaciones en sus características si el viento generador también las sufre. Y esta relación de variación es relativamente simultánea si se considera una escala de tiempo del orden de días, ya que el oleaje generado en el extremo occidental del frente polar Ártico tarda aproximadamente entre 5 y 9 días en llegar a las costas de Chile central (dependiendo del periodo), siendo éste el generado a mayor distancia (según lo visto en sección 3.2.1.1), por lo que un análisis de oleaje en términos mensuales no está afecto a retardos por propagación respecto al fenómeno perturbador.

Considerando lo anterior, cualquier variación en las características de oleaje producidas a partir de los efectos en el viento de fenómenos como el Calentamiento Global (incremento progresivo de la temperatura del planeta a lo largo de decenas de años) y ENOS (ciclos fríos y cálidos de la temperatura superficial del océano Pacífico ecuatorial del orden de un par de años) describirá similar comportamiento al que tienen estos fenómenos, es decir, ciclos en el caso de ENOS y tendencia en el caso del Calentamiento Global.

Con estos antecedentes, es posible sugerir que el oleaje presente en la estadística puede ser representado idealmente como la suma de una condición *normal* de oleaje y las variaciones producidas por ENOS y Calentamiento global, según el siguiente modelo:

$$\begin{array}{ccccccc} \textit{Oleaje real} & & \textit{Oleaje} & & \textit{Tendencia} & & \textit{Ciclo} \\ \textit{(no estacionario)} & = & \textit{(estacionario)} & + & \textit{(Calentamiento Global)} & + & \textit{(ENOS)} \end{array}$$

En donde el oleaje real corresponde a la condición descrita en la estadística, la tendencia a las variaciones esperadas por efecto del calentamiento global, el ciclo a las fluctuaciones debidas a ENOS y el oleaje estacionario queda definido como el que resulta al quitar del oleaje real la tendencia y los ciclos (este oleaje estacionario es el equivalente a la condición presente en la fase normal de ENOS y en la condición media del Calentamiento Global):

$$\begin{array}{ccccccc} \textit{Oleaje} & & \textit{Oleaje real} & & \textit{Tendencia} & & \textit{Ciclo} \\ \textit{(estacionario)} & = & \textit{(no estacionario)} & - & \textit{(Calentamiento Global)} & - & \textit{(ENOS)} \end{array}$$

En estricto rigor, si se consigue solo una representación parcial de las influencias de los fenómenos no estacionarios, se producirá solo una *atenuación* de estos en la serie.

Ahora bien, dado que el análisis a realizar consiste en evaluar las influencias mensuales de ENOS y del Calentamiento Global en el oleaje y a partir de ellos realizar la atenuación a la serie, se considera un modelo aditivo considerando la tendencia como la variación mensual de un parámetro por efecto del Calentamiento Global (Δ_{CG}^i), los ciclos como la variación mensual de un parámetro por efecto de ENOS (Δ_{ENOS}^i), el oleaje real como el estadígrafo mensual obtenido de la serie de un parámetro en cualquier mes (P_{real}^i) y el oleaje estacionario como el mismo estadígrafo mensual del parámetro correspondiente (P^i), de la forma:

$$P_{real}^i = P^i + \Delta_{ENOS}^i + \Delta_{CG}^i$$

Teniendo en cuenta que los estudios tradicionales identifican la condición media del oleaje a partir de toda la estadística, se realiza el promedio de cada componente mediante la suma en los n meses que componen la serie disponible dividido en el número de meses (n), de la forma:

$$\frac{\sum_{i=1}^n P_{real}^i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n P^i}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{CG}^i}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{ENOS}^i}{n}$$

$$\overline{P_{real}} = \bar{P} + \overline{\Delta_{ENOS}} + \overline{\Delta_{CG}}$$

Al realizar este proceso, las influencias de tendencia se anulan y son equivalentes a la influencia en la mitad de la serie para cualquier caso, mientras que las influencias de ENOS se anulan sólo si las influencias son equivalentes a un mismo índice en fase Niño y Niña y además si la suma de los índices en la longitud estadística es cero, si no se cumple una de las condiciones, se obtiene una distribución asimétrica de las influencias de ENOS en la serie, constituye un factor perturbador en la longitud de la serie:

$$P = \bar{P} + \overline{\Delta_{ENOS}}$$

Esto quiere decir que la serie está afectada en general por una de las fases de ENOS.

Observando los resultados parciales, la componente P corresponde a la condición media del parámetro en toda la serie, equivalente a la condición que identifican los estudios tradicionales. Esto implica que de existir una asimetría en la influencia de ENOS a lo largo de la serie, el valor obtenido por los estudios tradicionales debe ser corregido para obtener la condición estacionaria real, la cual corresponde a aquella en la que ENOS se encuentra en su fase normal y el Calentamiento Global en su influencia media. Dicho término se obtiene de la forma:

$$\bar{P} = P - \overline{\Delta_{ENOS}}$$

Donde \bar{P} es la condición estacionaria del oleaje a lo largo de la serie.

La condición estacionaria del oleaje que se ha identificado constituye el eje fundamental para la estimación de la condición de oleaje futura esperada para un mes determinado, ya que al identificarse las influencias asociadas a las distintas fases de los fenómenos no estacionarios, y además, al tener estas proyecciones futuras del orden de seis meses ofrecidos por distintas organizaciones internacionales (NASA 2010 y NOAA 2010), es posible obtener la condición de oleaje futura para un mes esperado (P^*) dadas las influencias esperadas para ese mes (Δ_{ENOS}^* y Δ_{CG}^*) mediante el esquema:

$$P^* = \bar{P} + \Delta_{ENOS}^* + \Delta_{CG}^*$$

Para tal efecto, a continuación se detallan los procesos asociados a la estimación de la influencia de ENOS y el Calentamiento Global en el oleaje.

3.6.4 MÉTODO PARA ESTIMAR INFLUENCIA DEL CALENTAMIENTO GLOBAL EN EL OLEAJE

Para el análisis de la influencia del Calentamiento Global en el oleaje se utilizará la comparación entre la tendencia del parámetro con la tendencia manifestada por el índice GLOTI (que describe el calentamiento global) en el lapso contemporáneo a la estadística de oleaje (ver Figura 50).

Dado que las series de parámetros e índices mensuales tienen el tiempo expresado en años, las tendencias lineales ajustadas a las series de tiempo tendrán pendiente equivalente a la variación anual del parámetro que se evalúa, la que se denotará como δ_{CG} .

La cuantificación de la importancia de la variación anual (δ_{CG}) se expresará mediante el cálculo de la variación total del parámetro en la serie (δ_{CG}^T), esto es, la multiplicación de dicho factor con la extensión de la estadística (recordar que la serie tiene un *gap* de 2 años entre junio de 1991 y mayo de 1993, por lo que la serie se extiende por 22 años) de la forma:

$$\delta_{CG}^T = \delta_{CG} * 22 \text{ años}$$

Adicionalmente, se estimará la proporción de esta variación (δ_{CG}^T) respecto al rango de valores de la serie de datos mensuales (en términos porcentuales), obtenido de la diferencia entre los valores máximo y mínimo.

También se presentarán gráficos en el dominio del tiempo con el objeto de ilustrar la coherencia de las variaciones anuales del índice con la de los parámetros.

Las tendencias determinadas serán removidas de las series de parámetros de oleaje solo en términos de la variación anual, manteniéndose de esta forma la serie con sus valores medios. Para esto se restará a la serie la tendencia estimada y se sumará el promedio de la serie de datos mensuales original.

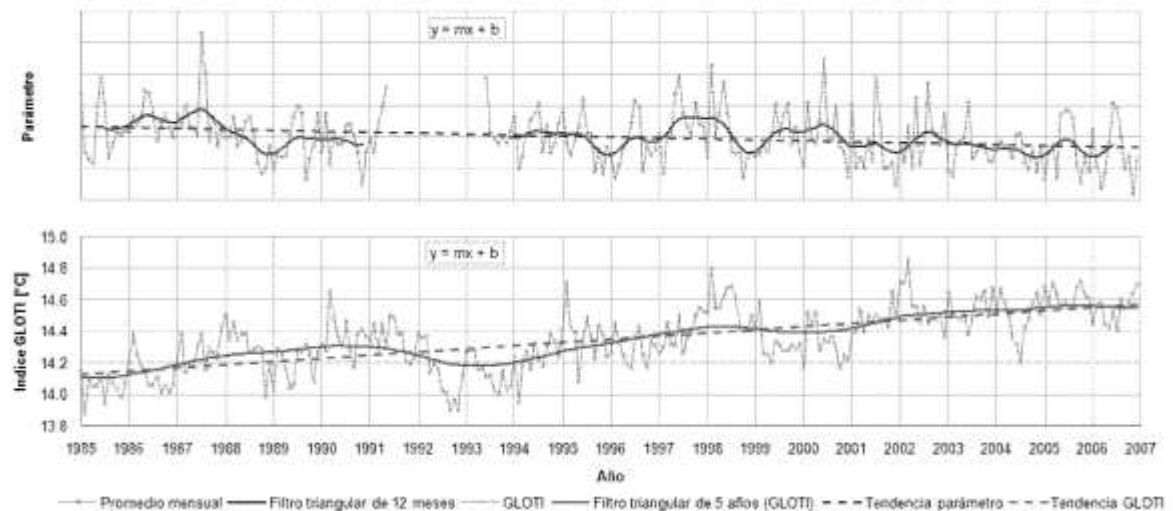


Figura 50. Esquema de comparación de índice GLOTI con parámetros.

3.6.5 MÉTODO PARA ESTIMAR INFLUENCIA DE ENOS EN EL OLEAJE

Tal como se describió en el capítulo 3.4.3, ENOS se encuentra caracterizado por índices asociados a anomalías de temperatura superficial del mar (SSTA) y de presiones atmosféricas (IOS). Tales anomalías se obtienen luego de quitar de la serie original la condición media anual del fenómeno (temperatura o presión) estimada en una ventana de tiempo. Este proceso se repite para cada serie de promedios y desviaciones estándar de los parámetros de oleaje, con tal de hacerlos comparables con los índices de ENOS.

La bondad de ajuste de un parámetro de oleaje con un índice ENOS se evalúa a partir de la correlación y tendencia del par separado por fase de ENOS.

Así, se propone una metodología diseñada con el fin de obtener las relaciones existentes entre el oleaje y ENOS para las tres fases de este último, a saber Niño, Normal y Niña, la cual se detalla a continuación:

1. Se selecciona la serie de un índice que describe ENOS y la de un parámetro de resumen del oleaje con atenuación de tendencia por Calentamiento Global, ambas series de datos mensuales y misma ventana temporal.
2. Utilizando el criterio de mes normal asociado al índice seleccionado, se separan de la serie del parámetro todos los meses correspondientes a un mes normal (para los índices SSTA la selección es $0.5 \geq \text{mes normal} \geq -0.5$, mientras que para el índice IOS es $1 \geq \text{mes normal} \geq -1$).
3. A partir de la serie de meses normales, se estima el promedio de datos correspondiente a cada mes del año (12), construyendo una serie media anual de valores mensuales del parámetro de oleaje para la condición normal de ENOS según el índice seleccionado.
4. A la serie original de parámetros de oleaje se le resta el valor medio del año normal para el mes correspondiente, generando una serie de anomalías mensuales del parámetro de oleaje.
5. La serie de anomalías mensuales por parámetro de oleaje se separa en los meses asociados a condición Niño, Normal y Niña según el valor y criterio de separación del índice que caracteriza ENOS seleccionado (Para los índices SSTA los intervalos son Niño > 0.5 , $0.5 \geq \text{Normal} \geq -0.5$, $-0.5 > \text{Niña}$, mientras que para el índice IOS los intervalos son Niña > 1 , $1 \geq \text{Normal} \geq -1$, $-1 > \text{Niño}$).
6. Las tres series obtenidas (Niño, Normal y Niña) son ordenadas de menor a mayor por el índice de ENOS, estimándose la correlación y tendencia lineal entre la serie de parámetro de oleaje y el índice, según lo presentado en la Figura 51.

Dada la existencia de al menos cinco índices que caracterizan el fenómeno ENOS (descrito en el capítulo 3.4.3) se considera realizar un análisis de la bondad de ajuste de cada uno de ellos con todos los parámetros de oleaje, con el objetivo de discriminar el índice que mejor describe los comportamientos medios mensuales del oleaje. Como criterio de selección se usará aquel cuyo promedio de correlaciones absolutas entre condición Niño y Niña, para todos los parámetros de resumen (5), estadígrafos (2) y nodos (4) sea mayor.

Para el índice seleccionado se realizarán gráficos de series de tiempo y de dispersión con cada parámetro de resumen, a través de los cuales se evaluará el grado de similitud entre las series y la razón de variación del parámetro por unidad de índice en la condición Niño y Niña (se considera que bajo la condición Normal no hay variaciones del parámetro), los que se denotarán como $\delta_{\text{Niño}}$ y $\delta_{\text{Niña}}$, respectivamente.

La comparación visual de las series se realizará solo para aquel nodo que tenga la mejor suma de correlaciones absolutas para todos los nodos, incorporando a la serie del parámetro un filtro

triangular de 12 meses (Contreras 2001), lo que permite por una parte la atenuación de las estacionalidades y por otra la descripción del comportamiento general de la serie.

Las influencias encontradas de ENOS en los parámetros del oleaje serán atenuadas de las series mensuales de parámetro mediante el uso de las razones de variación a partir de los valores del índice ENOS para cada mes, resultando una serie mensual de oleaje con efectos mitigados del fenómeno (filtro pasa alto).

Adicionalmente, a partir de la razón de variación del parámetro por unidad de índice de ENOS para cada fase ($\delta_{Niño}$ y $\delta_{Niña}$), se estima la media de los efectos de ENOS en la serie ($\overline{\Delta_{ENOS}}$), el cual es comparado con el rango de valores del parámetro para evaluar su importancia en la serie.

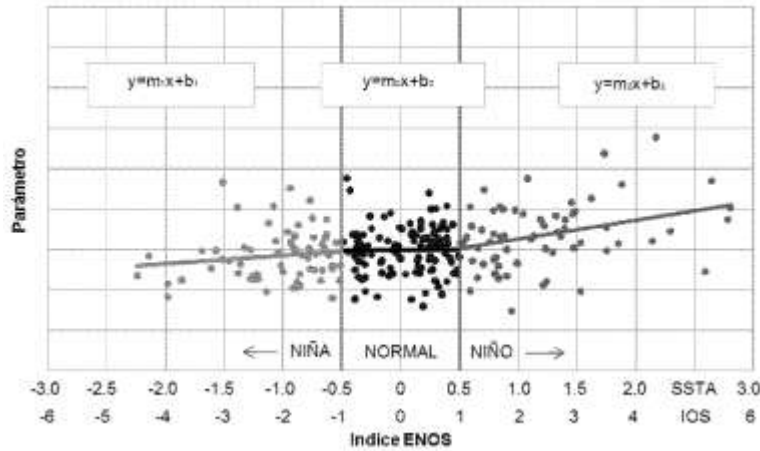


Figura 51. Esquema determinación influencia de ENOS en el oleaje.

3.6.6 MÉTODO DE ANÁLISIS DE OLAJE NO ESTACIONARIO

Dado que ENOS puede eventualmente influenciar asimétricamente el oleaje entre sus fases Niño y Niña, los valores medios de los parámetros estimados a partir del estudio de clima medio de oleaje deben ser corregidos por la media de los efectos de ENOS en dicho parámetro en el mismo periodo que comprende la estadística de oleaje disponible, según la siguiente relación:

$$\bar{P} = P - \overline{\Delta_{ENOS}}$$

Donde:

\bar{P} : Valor medio del parámetro corregido por la asimetría de los efectos de ENOS.

P : Valor medio del parámetro obtenido del estudio de clima medio tradicional.

$\overline{\Delta_{ENOS}}$: Media de las influencias de ENOS en el parámetro en la estadística, calculado de la forma:

$$\overline{\Delta_{ENOS}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{ENOS}^i}{n}$$

Con:

n : Número de meses de la estadística.

Δ_{ENOS}^i : Influencia de ENOS en el parámetro en un mes típico cualquiera.

El término \bar{P} , representativo de la condición media del oleaje en la longitud estadística disponible, constituye la primera aproximación a la estimación de una condición media de oleaje con menor

incertidumbre que la ofrecida por los estudios tradicionales de oleaje. Esto debido a que al incorporar las variaciones mensuales asociadas a los índices que describen ENOS y del Calentamiento global es posible realizar un pronóstico de las condiciones de oleaje con un par de meses de anticipación, ya que los índices de SSTA, IOS y GLOTI tienen pronósticos del orden de seis meses ofrecidos por distintas organizaciones internacionales (NASA 2010 y NOAA 2010), constituyéndose en una segunda aproximación con menor incertidumbre a la estimación de la condición media del oleaje.

La estimación de la condición de oleaje futura se estima a partir de la siguiente relación:

$$P^* = \bar{P} + \Delta_{ENOS}^* + \Delta_{CG}^*$$

Donde:

P^* : Valor medio del parámetro corregido por análisis no estacionario para el mes de interés.

Δ_{ENOS}^* : Corrección del parámetro por influencia de ENOS.

Δ_{CG}^* : Corrección del parámetro por influencia del Calentamiento Global (estimado lineal).

Donde además:

$$\Delta_{ENOS}^* = \begin{cases} (i_{ENOS}^* - Lim_{Niño}) * \delta_{Niño} & \text{si} \\ 0 & \text{si} \\ (i_{ENOS}^* - Lim_{Niña}) * \delta_{Niña} & \text{si} \end{cases} \quad \begin{matrix} i_{ENOS}^* > Lim_{Niño} \\ Lim_{Niño} \geq i_{ENOS}^* \geq Lim_{Niña} \\ i_{ENOS}^* < Lim_{Niña} \end{matrix}$$

Con:

i_{ENOS}^* : Valor de índice de ENOS para el mes que se analiza.

$Lim_{Niño}$: Límite que define la fase Niño de ENOS (0.5 para la serie SSTA y 1 para IOS).

$Lim_{Niña}$: Límite que define la fase Niña de ENOS (-0.5 para la serie SSTA y -1 para IOS).

$\delta_{Niño}$: Variación por unidad del índice de ENOS en la fase Niño del parámetro.

$\delta_{Niña}$: Variación por unidad del índice de ENOS en la fase Niña del parámetro.

$$\Delta_{CG}^* = \left(año^* + \frac{mes^* - 1}{12} - \frac{año_i + \frac{mes_i - 1}{12} + año_f + \frac{mes_f - 1}{12}}{2} \right) * \delta_{CG}$$

O bien

$$\Delta_{CG}^* = \left(fecha^* - \frac{fecha_i + fecha_f}{2} \right) * \delta_{CG}$$

Con:

δ_{CG} : Variación anual del parámetro (pendiente tendencia).

$fecha^*, año^*, mes^*$: Fecha, año y mes que se analiza.

$fecha_i, año_i, mes_i$: Fecha, año y mes de inicio de la estadística de oleaje.

$fecha_f, año_f, mes_f$: Fecha, año y mes de fin de la estadística de oleaje.

Esta aproximación es válida tanto para los promedios mensuales de los parámetros de resumen de oleaje (altura, periodo y dirección) como para las desviaciones estándar mensuales asociadas.

Como resumen de lo expuesto en este capítulo, se presentan a continuación los diagramas de ejecución del estudio no estacionario y de cálculo de parámetro mensual incorporando influencia no estacionaria.

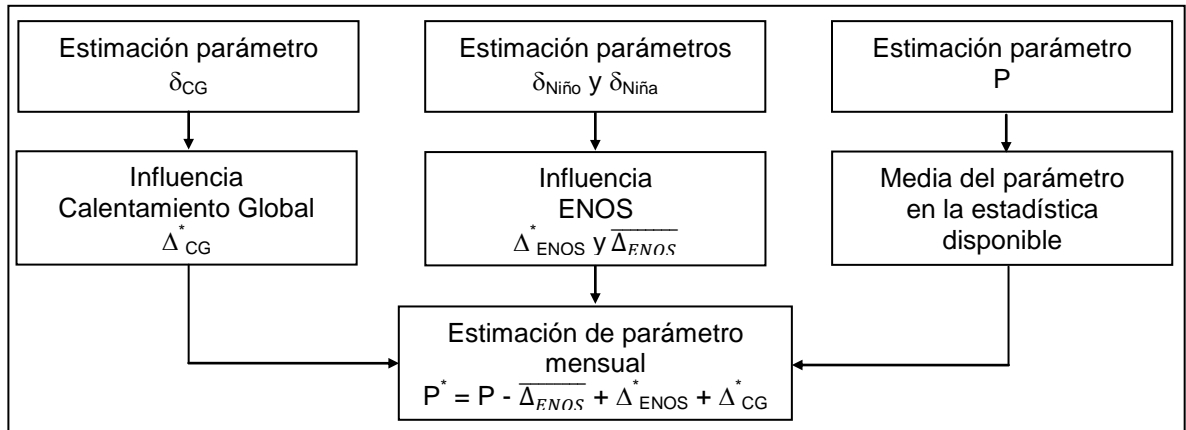


Figura 52. Diagrama cálculo de parámetro mensual incorporando influencia no estacionaria.

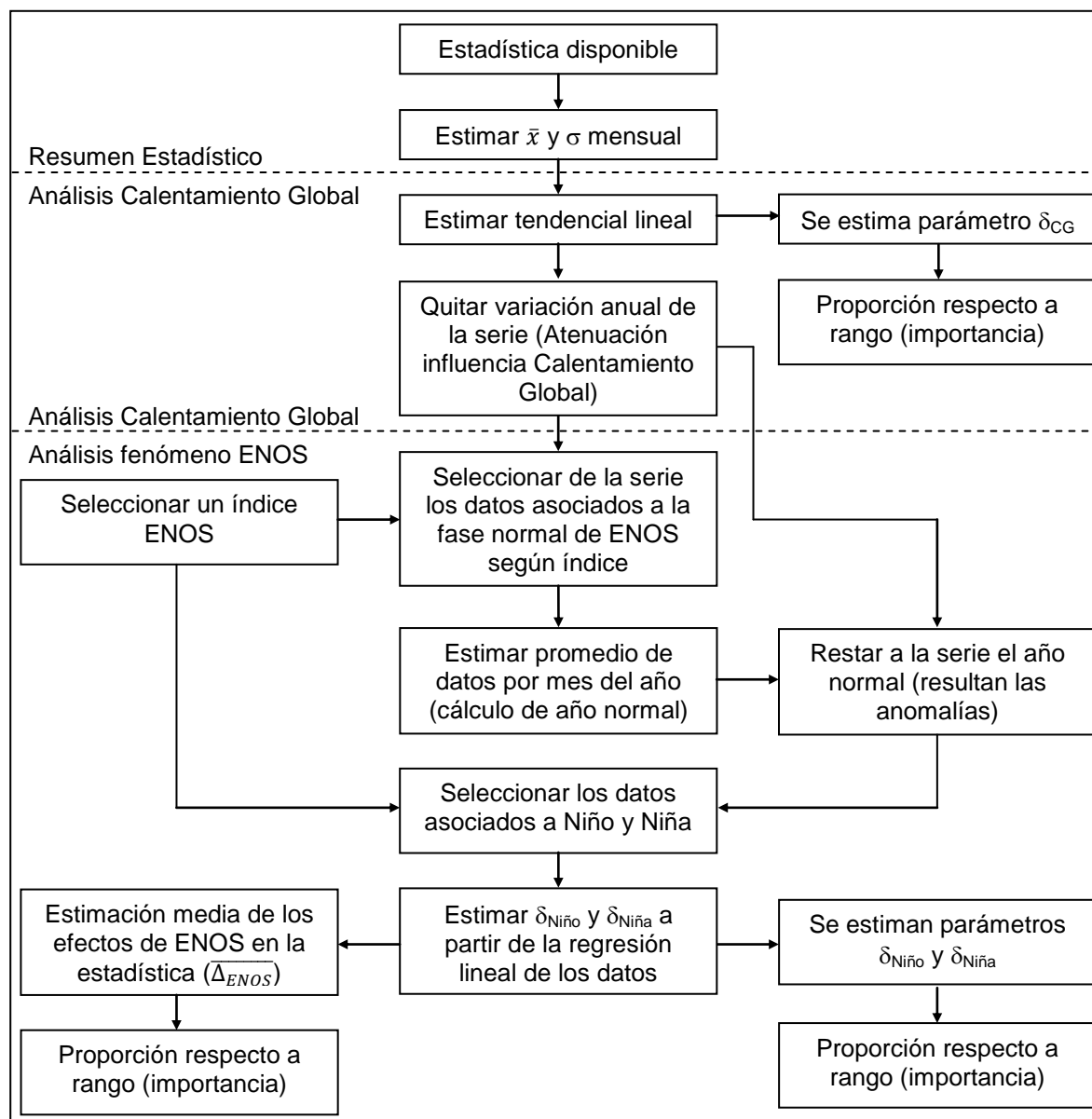


Figura 53. Diagrama de ejecución del estudio no estacionario.

4 RESULTADOS

4.1 INFLUENCIA DEL CALENTAMIENTO GLOBAL EN EL OLEAJE

Al aplicar a la estadística la metodología expuesta en el sub capítulo 3.6.4, se obtienen los valores medios y la variación anual (δ_{CG}) por parámetro y nodo, a partir del ajuste de una tendencia lineal a la serie de parámetros de oleaje, tal como se muestra en la Figura 54 y Figura 55 (al final del capítulo), donde se presentan las series mensuales de los parámetros para el nodo 35°S (dada su medianía respecto al área considerada y la similitud latitudinal mostrada en el sub capítulo 3.2.2), incluyendo el filtro triangular de 5 años y la tendencia asociada a la serie.

Los valores obtenidos para todos los nodos se presentan en la Tabla 6, donde destaca que los valores medios de la serie y las variaciones anuales por parámetro son similares en todos los nodos, presentándose en general una relación entre el valor del parámetro y la latitud evaluada. También resalta la similitud entre pares de nodos para distintos parámetros, siendo en general el nodo 31°S muy similar al nodo 35°S, y mayormente el nodo 37°S con el nodo 39°S.

En cuanto a los parámetros, para todos los casos el periodo *peak* (T_p) presenta valores superiores a los del periodo medio (T_m), situación idéntica a la observada entre las direcciones *peak* (Dir_p) y Media (Dir_m) salvo en la media de la estadística en los nodos 37°S y 39°S.

Tabla 6. Valores medios y variaciones anuales por parámetro δ_{CG} .

Latitud	Promedio Mensual									
	Hs [m]		T _p [s]		T _m [s]		Dir _p [°]		Dir _m [°]	
	media	δ_{CG}	media	δ_{CG}	media	δ_{CG}	media	δ_{CG}	media	δ_{CG}
31°S	2.48	0.006	12.54	0.008	8.94	-0.004	229.43	-0.606	225.99	-0.327
35°S	2.65	0.004	12.56	0.008	9.04	-0.001	236.92	-0.629	235.87	-0.314
37°S	2.87	0.003	12.42	0.020	9.15	0.012	234.85	-0.405	236.98	-0.121
39°S	2.89	0.005	12.43	0.017	9.21	0.010	238.65	-0.492	242.36	-0.213

Latitud	Desviación Estándar Mensual									
	Hs [m]		T _p [s]		T _m [s]		Dir _p [°]		Dir _m [°]	
	media	δ_{CG}	media	δ_{CG}	media	δ_{CG}	media	δ_{CG}	media	δ_{CG}
31°S	0.70	0.004	1.92	0.028	1.43	0.006	21.70	-0.249	14.45	-0.008
35°S	0.75	0.008	1.82	0.024	1.46	0.006	21.98	-0.277	15.69	-0.034
37°S	0.84	0.004	1.76	0.016	1.39	0.009	24.65	-0.246	20.37	-0.007
39°S	0.87	0.003	1.68	0.019	1.36	0.009	25.34	-0.234	21.09	0.000

En cuanto al detalle por parámetro, el valor medio de la altura significativa (H_s) en la serie fluctúa entre 2.48 [m] y 2.89 [m], incrementándose su valor conforme aumenta la latitud, mientras que la variación anual no supera los 6 [mm] en los cuatro nodos, siendo la menor variación de 3 [mm].

En el periodo *peak* (T_p), los valores medios latitudinales de la serie oscilan entre 12.42 [s] y 12.56 [s] mientras que las variaciones anuales van de 0.01 [s] a 0.02 [s]. Para el periodo medio (T_m), el valor medio de la serie aumenta conforme aumenta la latitud, siendo el menor valor 8.94 [s] en el nodo 31°S, llegando a 9.21 [s] en el nodo 39°S. Las variaciones anuales pasan de valores negativos (-0.004 [s]) en bajas latitudes a valores positivos (0.012 [s]) en latitudes mayores.

En la dirección *peak* (Dir_p), los valores medios oscilan entre 229.43° y 238.65° , mientras que las variaciones anuales alcanzan entre -0.492° y -0.629° , siendo estas mayores en bajas latitudes. Para la dirección media (Dir_m) los valores medios latitudinales de las series fluctúan entre 225.99° y 242.36° , aumentado en conformidad con la latitud, situación opuesta a lo presentado con la variación anual, donde a mayor latitud, menor variación (entre -0.121° y -0.327°).

En cuanto a la desviación estándar de la altura significativa, el valor medio de la serie aumenta en latitud desde 0.70 [m] a 0.87 [m], presentando variaciones anuales que van de 3 a 8 [mm].

En el caso de la desviación estándar del periodo *peak*, el valor medio de la serie disminuye con el aumento latitudinal desde 1.92 [s] en el nodo $31^\circ S$ a 1.68 [s] en el nodo $39^\circ S$, presentando variaciones anuales que en general presenta una secuencia similar, siendo sus extremos 0.016 [s] y 0.028 [s]. La desviación estándar del periodo medio, presenta valores medios latitudinales entre 1.36 [s] y 1.46 [s], mientras que la variación anual del parámetro fluctúa entre 0.006 [s] y 0.009 [s].

La condición media de la desviación estándar mensual de la dirección *peak* incrementa latitudinalmente desde 21.7° hasta 25.34° , por el contrario, la variación anual no presenta una relación con la latitud, fluctuando entre -0.239° y -0.277° . Por último, la desviación estándar de la dirección media presenta una condición media relacionada proporcionalmente con el incremento latitudinal, desde 14.45° en el nodo $31^\circ S$ hasta 21.09° en el nodo $39^\circ S$. Las variaciones anuales, por el contrario, no manifiestan un orden latitudinal, con valores entre 0° y -0.034° .

Con el objeto de cuantificar la importancia de las variaciones anuales en la serie, se estima la variación producida en los 22 años en los que se extiende la estadística (ver Tabla 7), a partir del cual se estima la proporción respecto del rango de valores de la serie mensual del parámetro definido como la diferencia entre el valor máximo y mínimo (ver Tabla 28 en Anexo 9.2), cuyos resultados se presentan en la Tabla 8:

Tabla 7. Variación de la media del parámetro en los 22 años de la estadística.

Latitud	Promedio Mensual					Desviación Estándar Mensual				
	H_s [m]	T_p [s]	T_m [s]	Dir_p [°]	Dir_m [°]	H_s [m]	T_p [s]	T_m [s]	Dir_p [°]	Dir_m [°]
$31^\circ S$	0.13	0.18	-0.09	-13.33	-7.19	0.09	0.62	0.13	-5.48	-0.18
$35^\circ S$	0.09	0.18	-0.02	-13.84	-6.91	0.18	0.53	0.13	-6.09	-0.75
$37^\circ S$	0.07	0.44	0.26	-8.91	-2.66	0.09	0.35	0.20	-5.41	-0.15
$39^\circ S$	0.11	0.37	0.22	-10.82	-4.69	0.07	0.42	0.20	-5.15	0.00

Tabla 8. Proporción entre variación de 22 años y rango de valores de la serie.

Latitud	Promedio Mensual [%]					Desviación Estándar Mensual [%]				
	H_s	T_p	T_m	Dir_p	Dir_m	H_s	T_p	T_m	Dir_p	Dir_m
$31^\circ S$	8.76	5.17	-2.74	-16.69	-15.86	11.14	21.26	9.56	-11.98	-0.63
$35^\circ S$	4.72	5.10	-0.65	-19.99	-13.52	15.44	16.83	10.15	-13.98	-2.16
$37^\circ S$	3.29	12.83	7.60	-16.35	-4.94	8.60	13.61	14.84	-12.28	-0.47
$39^\circ S$	4.89	11.59	6.72	-20.14	-8.67	5.90	17.27	15.07	-11.64	0.00

En general, las variaciones a lo largo de la estadística no representan más del 22% del rango de valores de la serie, siendo los parámetros de dirección *peak* (de 16.4% a 20.1%) y desviación estándar del periodo *peak* (de 13.6% a 21.3%) los que presentan las mayores proporciones, mientras que el periodo medio (menores a 7.6%) y la desviación estándar de la dirección media (menores a 2.2%) son las que representan las menores proporciones. Los restantes parámetros fluctúan entre 3.3% y 15.9%.

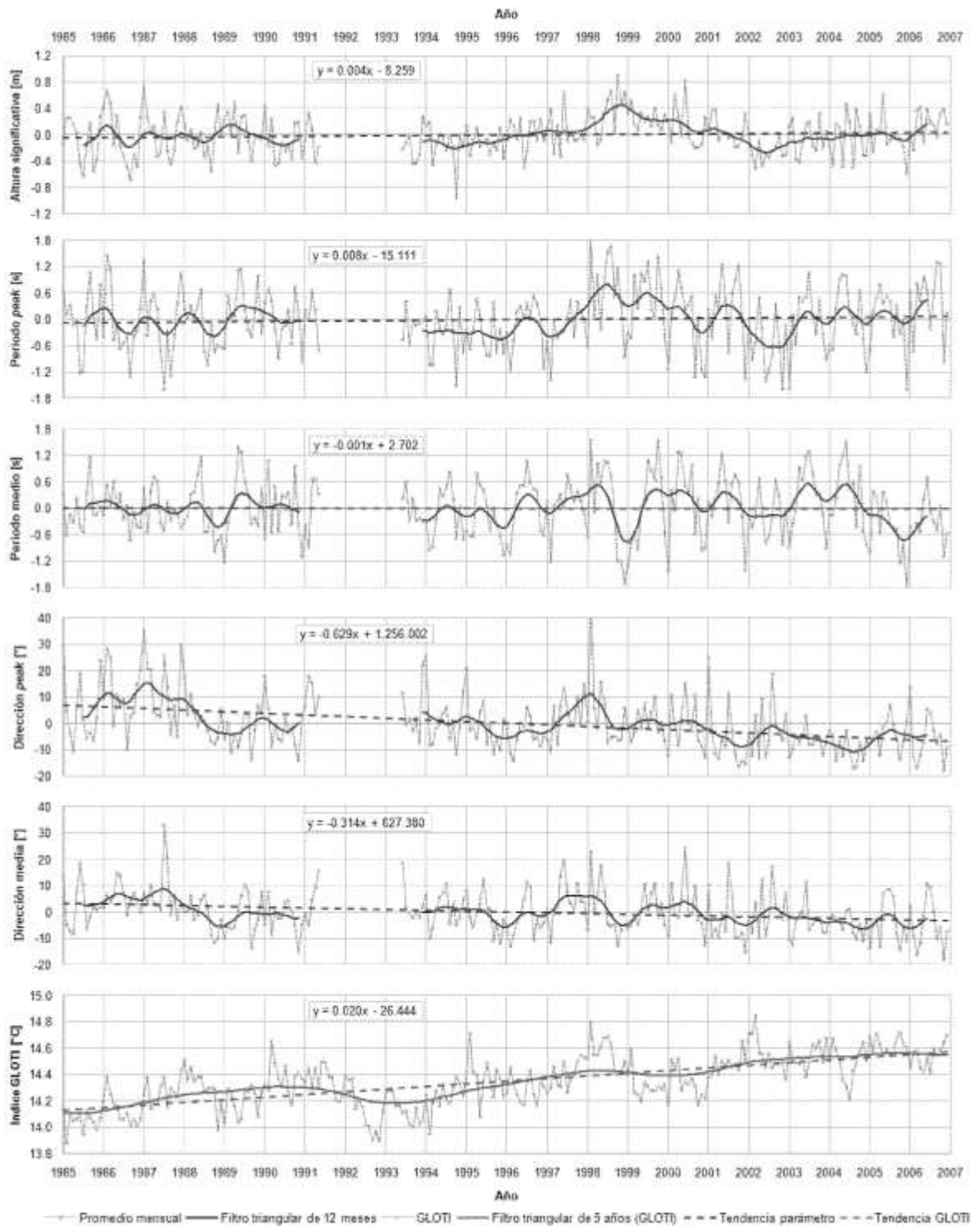


Figura 54. Tendencia del promedio mensual por parámetro (nodo 35°S) e índice GLOTI. (Elaboración propia)

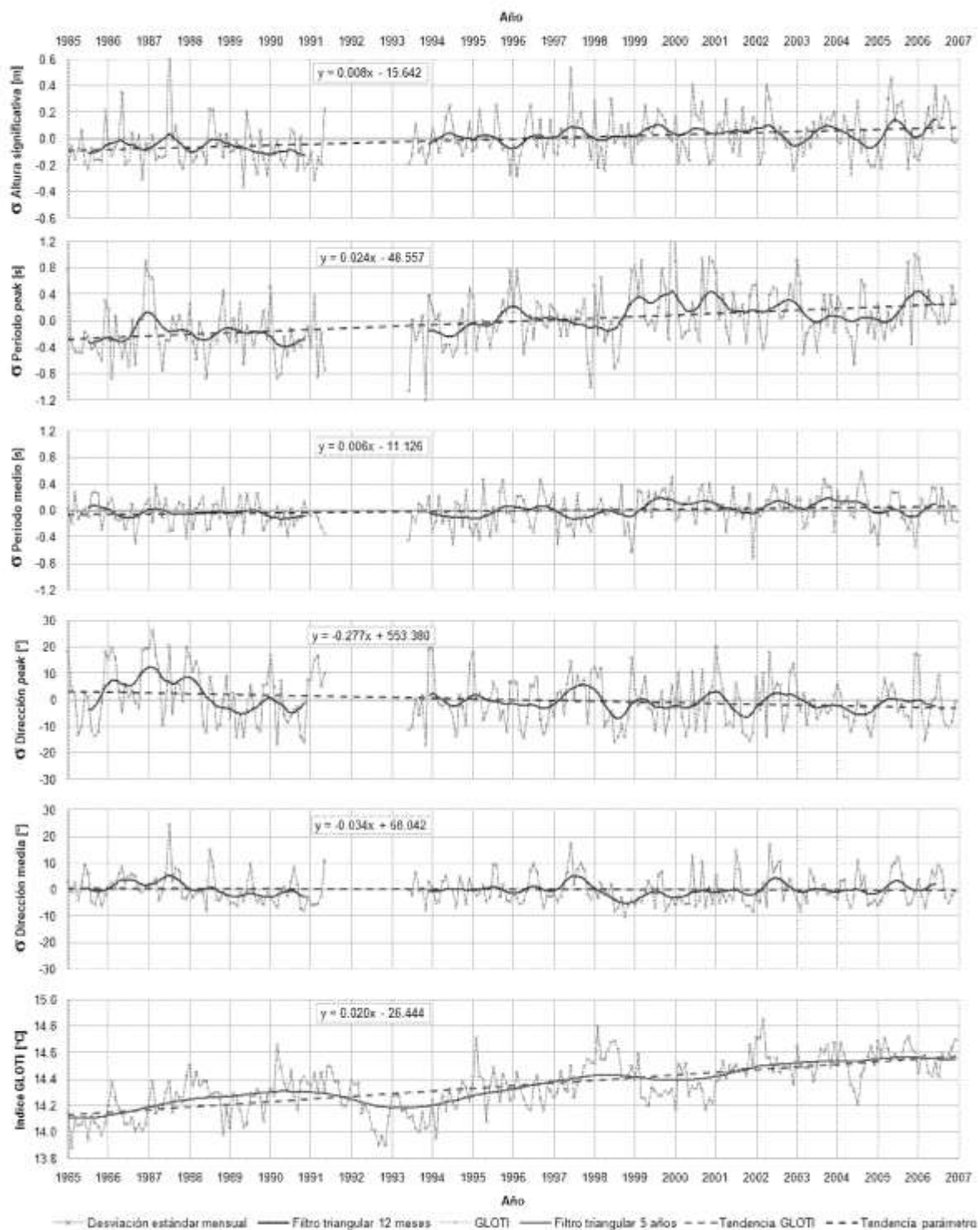


Figura 55. Tendencia de la desviación estándar mensual por parámetro (nodo 35°S) e índice GLOTI.
(Elaboración propia)

4.2 INFLUENCIA DE ENOS EN EL OLEAJE

4.2.1 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE LOS ÍNDICES ENOS Y PARÁMETROS DE RESUMEN

La metodología descrita en el sub capítulo 3.6.5 se ejecuta para las distintas combinaciones entre los 5 índices de ENOS con sus fases: Niño y Niña (10 casos) y los 5 parámetros de resumen para sus 2 estadígrafos mensuales (promedio y desviación estándar) por cada uno de los 4 nodos considerados (40 casos), resultando 400 correlaciones, de las cuales se presentan solo las asociadas a las condiciones Niño y Niña en la Tabla 9. Cabe consignar que valores de correlación cercanos a 1 indican una alta relación entre dos series mientras que valores cercanos a 0 indican muy baja relación entre ellas, además el signo indica solamente si su correlación es directa (positivo) o inversa (negativo).

Tabla 9. Correlaciones entre los índices de ENOS y los promedios mensuales y desviaciones estándar mensuales para cada parámetro y nodo.

Correlación		Promedio Mensual																			
		H _s				T _p				T _m				Dir _p				Dir _m			
		31°S	35°S	37°S	39°S	31°S	35°S	37°S	39°S	31°S	35°S	37°S	39°S	31°S	35°S	37°S	39°S	31°S	35°S	37°S	39°S
IOS	Niño	-0.11	-0.10	-0.05	-0.06	-0.15	-0.18	-0.16	-0.11	-0.23	-0.26	-0.16	-0.16	-0.30	-0.30	-0.23	-0.19	-0.31	-0.27	-0.13	-0.11
	Niña	-0.02	0.05	0.05	0.01	-0.01	-0.04	-0.07	-0.02	-0.06	-0.13	-0.29	-0.27	0.16	0.12	0.09	0.12	0.09	0.03	-0.02	0.02
Niño 1+2	Niño	0.17	0.12	0.13	0.10	0.06	0.10	0.07	0.11	0.26	0.33	0.24	0.21	0.11	0.22	0.11	0.15	0.23	0.24	0.07	0.07
	Niña	-0.20	-0.13	0.00	0.04	-0.08	-0.13	-0.18	-0.19	-0.01	-0.07	-0.15	-0.20	0.04	0.07	0.01	0.00	0.13	0.15	0.09	0.06
Niño 3	Niño	0.27	0.22	0.25	0.22	0.19	0.21	0.17	0.19	0.26	0.36	0.19	0.19	0.14	0.18	0.08	0.08	0.20	0.21	0.03	0.01
	Niña	0.02	0.03	0.14	0.16	0.17	0.18	0.13	0.09	0.12	0.10	0.08	0.08	0.20	0.20	0.18	0.13	0.18	0.15	0.14	0.16
Niño 4	Niño	0.14	0.13	0.00	0.00	-0.15	-0.14	-0.11	-0.13	-0.13	-0.07	0.02	0.00	0.01	0.05	0.04	-0.04	0.04	0.12	0.15	
	Niña	-0.08	-0.05	0.03	0.01	0.18	0.17	0.06	0.10	0.33	0.28	0.18	0.13	0.33	0.29	0.28	0.33	0.34	0.25	0.24	0.22
Niño 3.4	Niño	0.15	0.15	0.13	0.11	0.10	0.07	0.01	0.02	0.17	0.25	0.07	0.07	0.28	0.32	0.19	0.18	0.31	0.33	0.18	0.16
	Niña	-0.15	-0.18	-0.06	-0.05	0.14	0.17	0.13	0.13	0.27	0.26	0.18	0.16	0.14	0.12	0.15	0.16	0.20	0.14	0.11	0.12

Correlación		Desviación Estándar Mensual																			
		H _s				T _p				T _m				Dir _p				Dir _m			
		31°S	35°S	37°S	39°S	31°S	35°S	37°S	39°S	31°S	35°S	37°S	39°S	31°S	35°S	37°S	39°S	31°S	35°S	37°S	39°S
IOS	Niño	-0.18	-0.13	-0.07	-0.03	0.04	0.00	0.07	-0.05	0.11	0.02	0.08	0.09	-0.21	-0.16	-0.14	-0.15	-0.19	-0.12	-0.08	-0.11
	Niña	-0.14	-0.05	-0.03	0.01	0.07	0.10	0.12	0.04	-0.03	-0.08	-0.22	-0.22	0.26	0.20	0.17	0.11	0.14	0.12	0.07	0.02
Niño 1+2	Niño	0.08	0.02	0.11	0.09	-0.06	-0.12	0.06	-0.03	0.03	-0.13	0.01	0.00	0.00	0.09	0.13	0.13	0.15	0.07	-0.01	-0.01
	Niña	0.07	0.04	0.07	0.07	0.03	0.04	0.12	0.12	0.06	0.03	0.10	0.15	0.21	0.18	0.17	0.16	0.14	0.14	0.13	0.15
Niño 3	Niño	0.29	0.15	0.13	0.13	-0.15	-0.17	-0.05	-0.13	0.00	-0.09	0.02	0.00	0.12	0.17	0.15	0.08	0.26	0.15	0.02	0.01
	Niña	-0.02	-0.12	-0.07	-0.06	-0.16	-0.13	0.01	0.08	-0.06	-0.01	-0.06	-0.12	0.10	0.09	0.13	0.17	-0.02	0.00	0.05	0.07
Niño 4	Niño	-0.10	-0.04	-0.16	-0.13	0.11	0.12	-0.15	-0.16	-0.12	-0.01	-0.01	0.03	0.07	0.08	0.00	0.00	0.06	0.13	0.08	0.04
	Niña	0.14	0.05	0.14	0.13	-0.09	-0.04	0.24	0.22	-0.07	0.19	0.16	0.04	0.14	0.15	0.29	0.28	0.18	0.20	0.20	0.15
Niño 3.4	Niño	0.22	0.14	0.00	0.00	-0.01	0.06	0.05	-0.01	-0.04	-0.07	0.05	0.01	0.29	0.32	0.22	0.16	0.41	0.29	0.12	0.10
	Niña	0.00	-0.19	-0.09	0.02	-0.05	-0.06	0.12	0.12	-0.02	0.20	0.15	-0.04	0.02	-0.02	0.15	0.17	-0.02	-0.01	0.05	0.05

En general se observa que las mejores correlaciones no superan los 0.41, y aquellas que superan el umbral ± 0.30 se presentan solo en el periodo medio y las direcciones. En cuanto a la diferenciación Niño – Niña, las mejores correlaciones se encuentran exclusivamente en la condición Niño salvo para el índice Niño 4 que las presenta solo en la condición Niña. También destaca que las correlaciones asociadas al promedio mensual son en general superiores a las de la desviación estándar, teniendo solo en el índice Niño 3.4 correlaciones superiores al umbral 0.30. Con todo, la correlación absoluta promedio es de 0.121.

Otro aspecto relevante es que en general las correlaciones son mayores en los nodos 31°S y 35°S, mientras que los nodos 37°S y 39°S tienen entre ambos solo una correlación mayor a 0.30.

Con el objeto de identificar el índice que mejor se ajusta a la mayor parte de los parámetros, se realiza el promedio de las correlaciones absolutas asociadas a cada índice, presentándose en la Tabla 10 para el promedio mensual, desviación estándar y total:

Tabla 10. Promedio de correlaciones absolutas por índices.

	Promedio	Desviación Estándar	Total
IOS	0.130	0.106	0.118
Niño 1+2	0.125	0.087	0.106
Niño 3	0.156	0.095	0.125
Niño 4	0.134	0.117	0.126
Niño 3.4	0.156	0.103	0.129

En general se confirma que para todos los casos se alcanzan mejores correlaciones en el promedio mensual que en la desviación estándar mensual, mientras que en la separación por índice, el Niño 3.4 presenta la mejor sumatoria de correlaciones de las cinco.

En vista de los resultados descritos anteriormente, los análisis posteriores serán realizados con el índice SSTA Niño 3.4.

A partir del índice seleccionado, se analizan las correlaciones por parámetro y nodo mediante la suma de los valores absolutos para las fases Niño y Niña, según lo presentado en la Tabla 11.

Tabla 11. Promedio correlaciones absolutas de fases Niño y Niña de ENOS para el índice SSTA Niño 3.4 según parámetro y nodo.

Latitud	Promedio Mensual					Desviación Estándar Mensual					Promedio
	H _s	T _p	T _m	Dir _p	Dir _m	H _s	T _p	T _m	Dir _p	Dir _m	
31°S	0.15	0.12	0.22	0.21	0.25	0.11	0.03	0.03	0.16	0.21	0.15
35°S	0.16	0.12	0.25	0.22	0.24	0.17	0.06	0.13	0.17	0.15	0.17
37°S	0.10	0.07	0.13	0.17	0.14	0.04	0.08	0.10	0.18	0.09	0.11
39°S	0.08	0.07	0.11	0.17	0.14	0.01	0.06	0.02	0.16	0.07	0.09
Promedio	0.12	0.09	0.18	0.19	0.19	0.08	0.06	0.07	0.17	0.13	

El promedio de correlaciones indica las mejores relaciones entre el índice SSTA Niño 3.4 y los parámetros se presentan en los nodos 31°S y 35°S para los parámetros de dirección y periodo medio en el promedio mensual, con correlaciones promedio entre 0.21 y 0.25. Analizando por grupo, los promedios mensuales evidencian mayores influencias de ENOS que las desviaciones estándar, siendo los parámetros de mayor correlación las direcciones y el periodo medio en el promedio mensual y la dirección *peak* en la desviación estándar, con correlaciones promedio entre 0.17 y 0.19, mientras que por nodo, el ubicado en los 35°S presenta el mayor promedio de correlación de los parámetros con 0.17, seguido por los nodos 31°S, 37°S y 39°S con 0.15, 0.11 y 0.09, respectivamente.

Dada esta condición, se utilizará el nodo 35°S para la confección de los gráficos en el dominio del tiempo para describir los comportamientos del fenómeno en los posteriores análisis.

4.2.2 INFLUENCIA DE ENOS EN EL OLEAJE UTILIZANDO ÍNDICE SSTA NIÑO 3.4

Dado que el índice SSTA Niño 3.4 es el que tiene la mejor correlación con las series de parámetros de oleaje, se detallan a continuación los resultados obtenidos al utilizar este índice como patrón de comparación.

Según lo descrito en los puntos 2 y 3 del sub capítulo 3.6.5, se obtienen las series de años normales para cada uno de los parámetros a partir de las series destendenciadas, las cuales se encuentran descritas en la Figura 67 del Anexo 9.1. En general, se obtienen de la serie entre seis y catorce datos con la condición de ENOS normal para todos los meses, conformándose las series normales anuales. Considerando que se poseen 20 años de estadística, con igual número de datos por mes, la condición base de análisis es obtenida de entre un 30% y 70% de los datos por mes (20 enero, 20 febrero, 20 marzo...), y para la serie total representa un 50.8% de los datos disponibles, constituyendo una buena base de análisis.

Dado que en el sub capítulo anterior se determinó que el Nodo 35°S posee la mejor correlación total para las fases de ENOS, se presenta en la Figura 56 y Figura 57 (al final del sub capítulo) la comparación de las series de anomalías de cada parámetro, su filtro triangular de 12 meses y la serie del índice SSTA Niño 3.4 para dicho nodo.

Al respecto, las figuras indican una variabilidad mensual de las anomalías de los parámetros superior a la que describe la serie del índice ENOS, por lo que el ajuste de un filtro triangular de 12 meses permite realizar una comparación que beneficia la identificación de comportamiento global de serie más que de análisis término a término. Esto implica necesariamente que la influencia de ENOS en el oleaje no sería enteramente proporcional, más bien respondería a una variación igual de paulatina que el fenómeno ENOS.

Con todo, la comparación entre el filtro triangular y el índice de ENOS presenta similitudes en ciertos años y parámetro para el nodo 35°S. En cuanto al comportamiento general de las series con el índice SSTA Niño 3.4, en los promedios mensuales destaca la alta similitud existente con las direcciones, mientras que la altura y los periodos presentan alta similitud (el primero más que el segundo) solo en algunas ventanas caracterizadas por la fase Normal de ENOS (89° - 90° y 99° - 106°) no representando bien las fases Niño y Niña presentadas entre los años 87' - 88' y 97' - 98'.

Para las desviaciones estándar mensuales se repite el esquema, pero con resultados intensificados, teniendo las direcciones una similitud aun mayor que la presentada por los promedios mensuales mientras que las distancias entre las series para la altura y los periodos son mayores que las de los promedios mensuales.

Dado que la descripción visual es subjetiva, y con la finalidad de identificar las relaciones parciales asociadas a las fases de ENOS en los distintos parámetros y para todos los nodos, se determinan las variaciones del parámetro por unidad de índice de ENOS según el proceso descrito en el capítulo 3.6.5, cuyos resultados se presentan gráficamente solo para el nodo 35°S en la Figura 58, y para todos los nodos en la Tabla 12.

Las variaciones por unidad del índice SSTA Niño 3.4 en el promedio presentan para ambas fases valores positivos para todos los parámetros y nodos, a excepción de la altura significativa en la condición Niña, siempre con una variación consecuente entre nodos. En la desviación estándar mensual en cambio, se presenta una alta dispersión de valores y signos entre parámetros, nodos y fase de ENOS, perdiéndose en la mayoría de los casos una consecuencia entre los valores latitudinales.

En el análisis por parámetro y fase para todas las latitudes en el promedio mensual, la altura significativa presenta variaciones positivas del orden de 5 a 8 centímetros en la fase cálida y disminuciones de 3 a 13 centímetros en la fase fría. En los periodos, el parámetro *peak*, presenta variaciones menores a 0.137 [s] en la condición Niño y de 0.198 [s] a 0.294 [s] en la condición Niña, mientras que en la condición media las variaciones van de 0.061 [s] a 0.231 [s] en la condición Niño y de 0.244 [s] a 0.406 [s] en la condición Niña. Las variaciones presentadas por la

dirección *peak* van de 3.145° a 5.999° en la fase cálida y de 2.642° a 3.239° en la fase fría, mientras que las asociadas a la dirección media van de 2.497° a 4.641° en la fase cálida y de 1.995° a 2.931° en la fase fría.

Tabla 12. Variación de un parámetro por unidad de índice de ENOS.

Latitud	Promedio Mensual									
	H _s [m]		T _p [s]		T _m [s]		Dir _p [°]		Dir _m [°]	
	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}
31°S	0.073	-0.102	0.137	0.255	0.147	0.384	5.811	3.176	4.101	2.931
35°S	0.077	-0.133	0.094	0.294	0.231	0.406	5.999	2.642	4.641	2.097
37°S	0.067	-0.044	0.009	0.207	0.067	0.287	3.318	3.162	2.607	1.995
39°S	0.056	-0.032	0.022	0.198	0.061	0.244	3.145	3.239	2.497	2.103

Latitud	Desviación Estándar Mensual									
	H _s [m]		T _p [s]		T _m [s]		Dir _p [°]		Dir _m [°]	
	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}
31°S	0.055	0.000	-0.004	-0.051	-0.017	-0.010	4.097	0.431	3.019	-0.232
35°S	0.046	-0.065	0.043	-0.059	-0.031	0.110	4.631	-0.434	2.473	-0.150
37°S	0.001	-0.032	0.029	0.135	0.019	0.084	2.969	3.550	1.091	0.724
39°S	0.001	0.007	-0.005	0.142	0.003	-0.022	2.073	4.155	0.854	0.720

Para la desviación estándar mensual, las variaciones latitudinales por unidad de índice para cada parámetro y fase muestran en la altura significativa valores positivos menores a 5.5 centímetros en la condición Niño entre -6.5 y 0.7 centímetros en la condición Niña. El periodo *peak* tiene valores entre -0.004 [s] y 0.043 [s] en la fase Niño y entre 0.142 [s] y -0.059 [s] en la fase Niña, mientras que el periodo medio tiene valores entre -0.031 [s] y 0.019 [s] en la fase cálida y entre -0.022 [s] y 0.110 [s] en la fase fría. Para las direcciones, el parámetro *peak* presenta valores de 2.073° a 4.631° en la condición Niño y de -0.434° a 4.155° en la condición Niña, mientras que el parámetro medio concentra las variaciones entre 0.854° y 3.019° en la fase cálida y entre 0.724° y -0.232° en la fase fría.

Con el objeto de cuantificar la importancia de las variaciones por unidad de índice obtenidos, se dividen por el rango de valores de la serie (ver Tabla 28 en Anexo 9.2) obteniendo una razón de proporción, la que se encuentra descrita en la Tabla 13, donde las mayores proporciones son alcanzadas en los promedios mensuales, en las fases Niña, en los nodos de menor latitud y en los periodos y direcciones medias, alcanzando un máximo de 11.96% en la fase Niña del promedio mensual del periodo medio.

Tal como se revisó en el capítulo 3.6.3, los efectos de ENOS en la serie no necesariamente van a ser simétricos, implicando ello una diferencia entre la media de la estadística y la media de la estadística en la fase normal de ENOS. Dichas diferencias son obtenidas a partir de la media de los efectos de ENOS en longitud de la serie ($\overline{\Delta_{ENOS}}$) y son presentadas en la Tabla 14 junto con la proporción al rango de valores de la serie del parámetro respectivo.

Los valores obtenidos muestran una consecución latitudinal, mayormente manifestada en el promedio mensual, donde destacan la altura significativa (con valores de 4.4 a 6.7 centímetros), el periodo *peak* (de -0.044 [s] a -0.120 [s]) y el periodo medio (de -0.035 [s] a -0.088 [s]). Las direcciones en cambio presentan valores positivos en los nodos 31°S y 35°S, y negativos en el 37°S y 39°S, entre -0.705° y 1.565° en la dirección *peak* y entre -0.185° y 1.278° en la dirección media.

Un esquema similar presentan los valores de la desviación estándar, teniendo la altura valores entre -0.4 y 5.1 centímetros, el periodo *peak* entre -0.117 [s] y -0.023 [s], el periodo medio entre 0.012 [s] y -0.100 [s], la dirección *peak* entre 2.817° y -1.179°, y la dirección media entre -0.081° y 1.697°.

Respecto a la proporción de estos valores con el rango de la serie de parámetros mensuales, en general no exceden el 7.72% alcanzado por la desviación estándar del periodo medio en el nodo 35°S, siendo las siguientes proporciones relevantes mayormente de la desviación estándar en algunos nodos. Latitudinalmente, la altura significativa y el periodo *peak* del promedio mensual son los que tienen mayor regularidad, en torno al 4% y 3% respectivamente.

Tabla 13. Proporción de variaciones de parámetro por unidad de índice de ENOS y rango de valores de la serie mensual respectiva.

Latitud	Promedio Mensual [%]									
	H _s		T _p		T _m		Dir _p		Dir _m	
	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}
31°S	4.85	-6.77	4.02	7.49	4.57	11.94	7.27	3.98	9.04	6.46
35°S	4.13	-7.13	2.73	8.52	6.81	11.96	8.66	3.82	9.08	4.10
37°S	3.33	-2.19	0.26	6.04	1.93	8.26	6.09	5.80	4.83	3.70
39°S	2.49	-1.42	0.68	6.13	1.86	7.45	5.85	6.03	4.62	3.89

Latitud	Desviación Estándar Mensual [%]									
	H _s		T _p		T _m		Dir _p		Dir _m	
	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}	δ _{NIÑO}	δ _{NIÑA}
31°S	6.96	0.00	-0.14	-1.76	-1.23	-0.72	8.96	0.94	10.76	-0.83
35°S	4.04	-5.70	1.37	-1.88	-2.38	8.46	10.62	-1.00	7.14	-0.43
37°S	0.10	-3.13	1.12	5.22	1.42	6.30	6.74	8.06	3.36	2.23
39°S	0.09	0.63	-0.21	5.87	0.23	-1.67	4.69	9.40	2.53	2.13

Tabla 14. Media de los efectos de ENOS ($\overline{\Delta_{ENOS}}$) en la estadística (a) y su proporción respecto al rango de la serie (b).

(a)	Promedio Mensual					Desviación Estándar Mensual				
Latitud	H _s [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]	H _s [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]
31°S	0.067	-0.044	-0.086	0.942	0.575	0.051	-0.039	-0.004	1.615	1.697
35°S	0.066	-0.095	-0.035	1.565	1.278	0.068	-0.023	-0.100	2.817	1.188
37°S	0.053	-0.120	-0.088	-0.541	-0.004	0.018	-0.106	-0.035	-0.565	-0.081
39°S	0.044	-0.110	-0.070	-0.705	-0.185	-0.004	-0.117	0.012	-1.179	0.051

(b)	Promedio Mensual [%]					Desviación Estándar Mensual [%]				
Latitud	H _s	T _p	T _m	Dir _p	Dir _m	H _s	T _p	T _m	Dir _p	Dir _m
31°S	4.46	-1.28	-2.67	1.18	1.27	6.48	-1.36	-0.25	3.53	6.05
35°S	3.55	-2.77	-1.04	2.26	2.50	5.96	-0.74	-7.72	6.46	3.43
37°S	2.62	-3.49	-2.53	-0.99	-0.01	1.79	-4.11	-2.63	-1.28	-0.25
39°S	1.94	-3.39	-2.14	-1.31	-0.34	-0.35	-4.85	0.91	-2.67	0.15

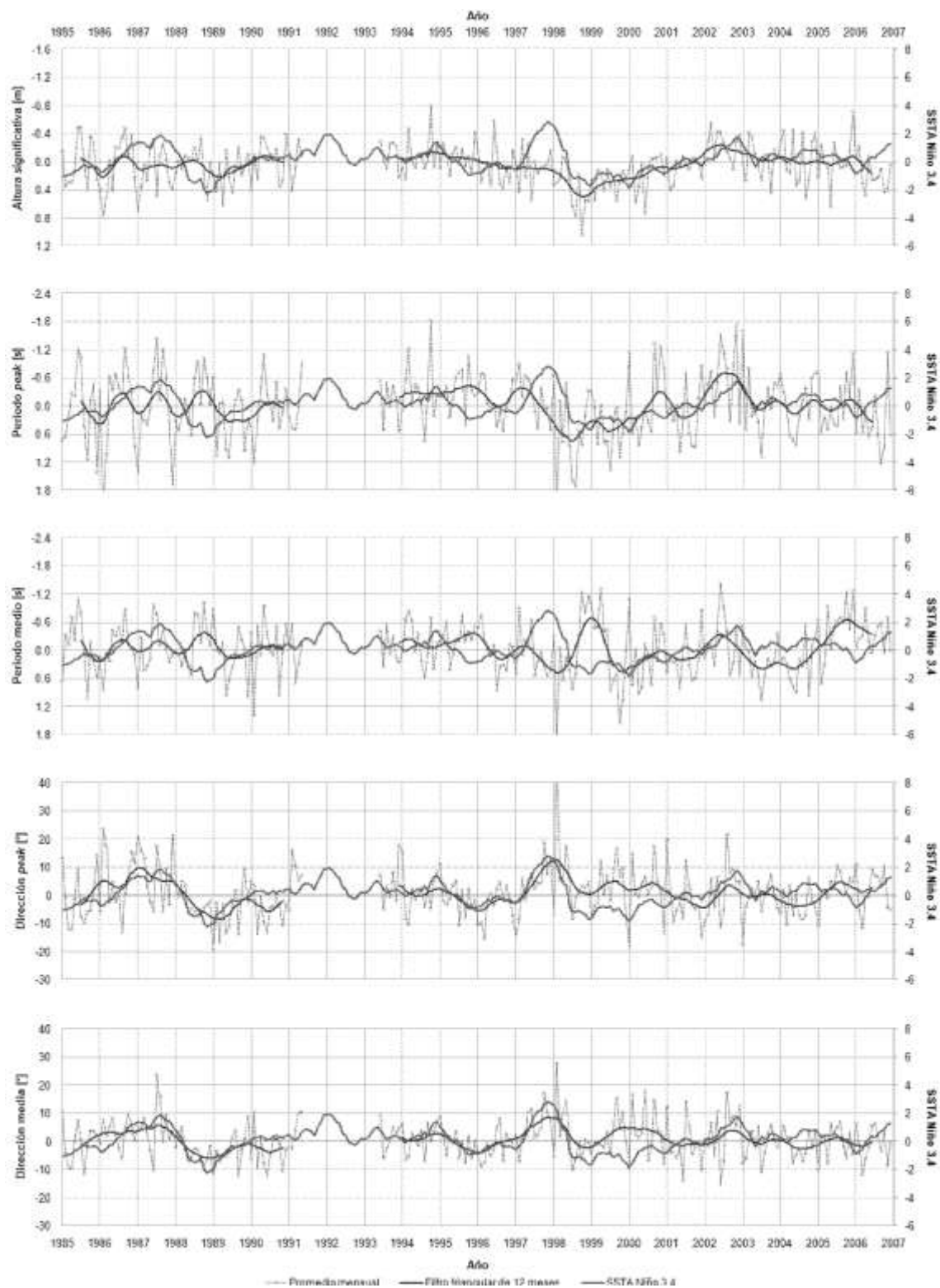


Figura 56. Comparación series índice SSTA Niño 3.4 con la anomalía del promedio mensual y su filtro triangular de 12 meses para cada parámetro.
(Elaboración propia)

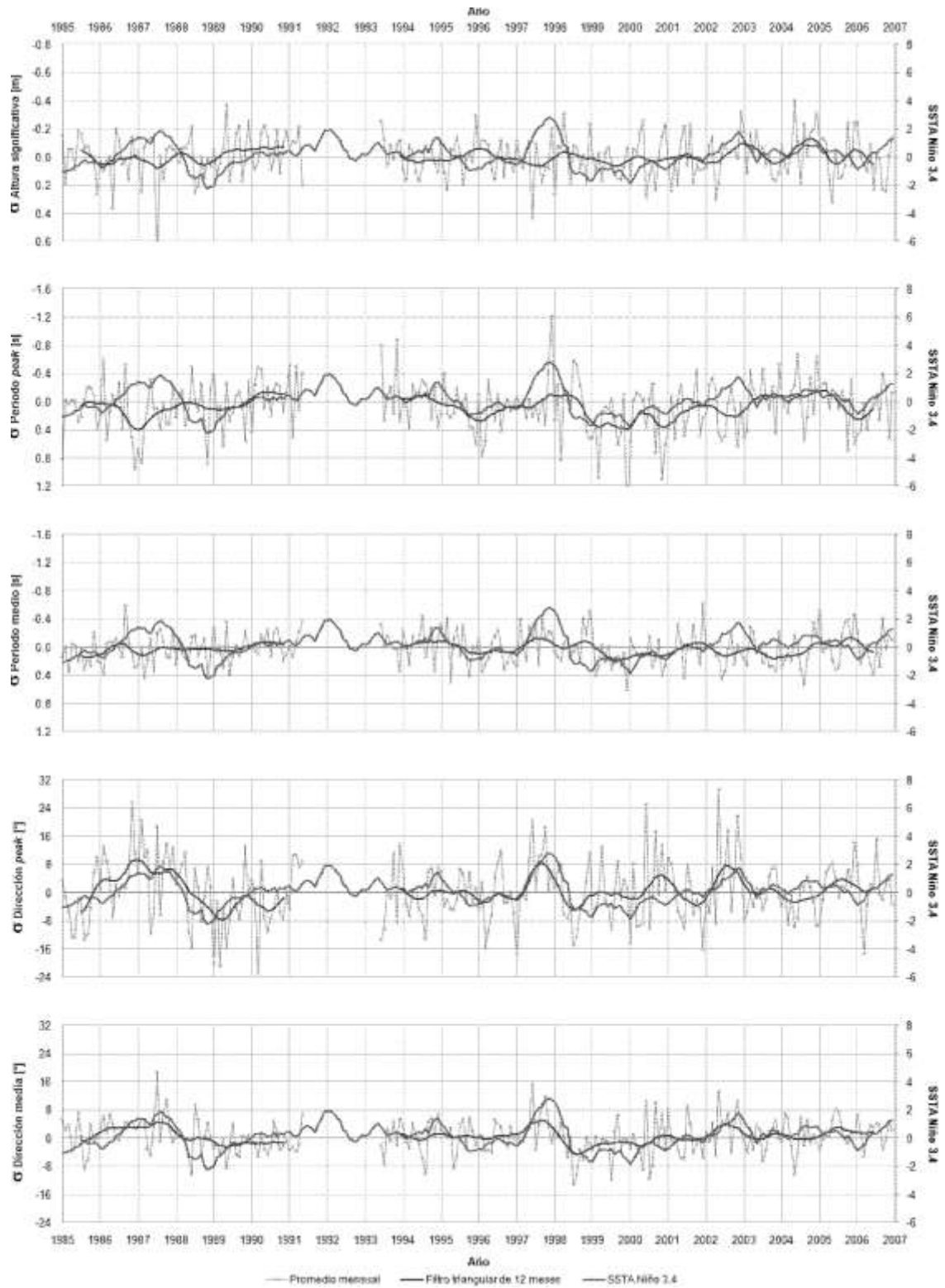


Figura 57. Comparación series índice SSTA Niño 3.4 con la anomalía de la desviación estándar mensual y su filtro triangular de 12 meses para cada parámetro. (Elaboración propia)

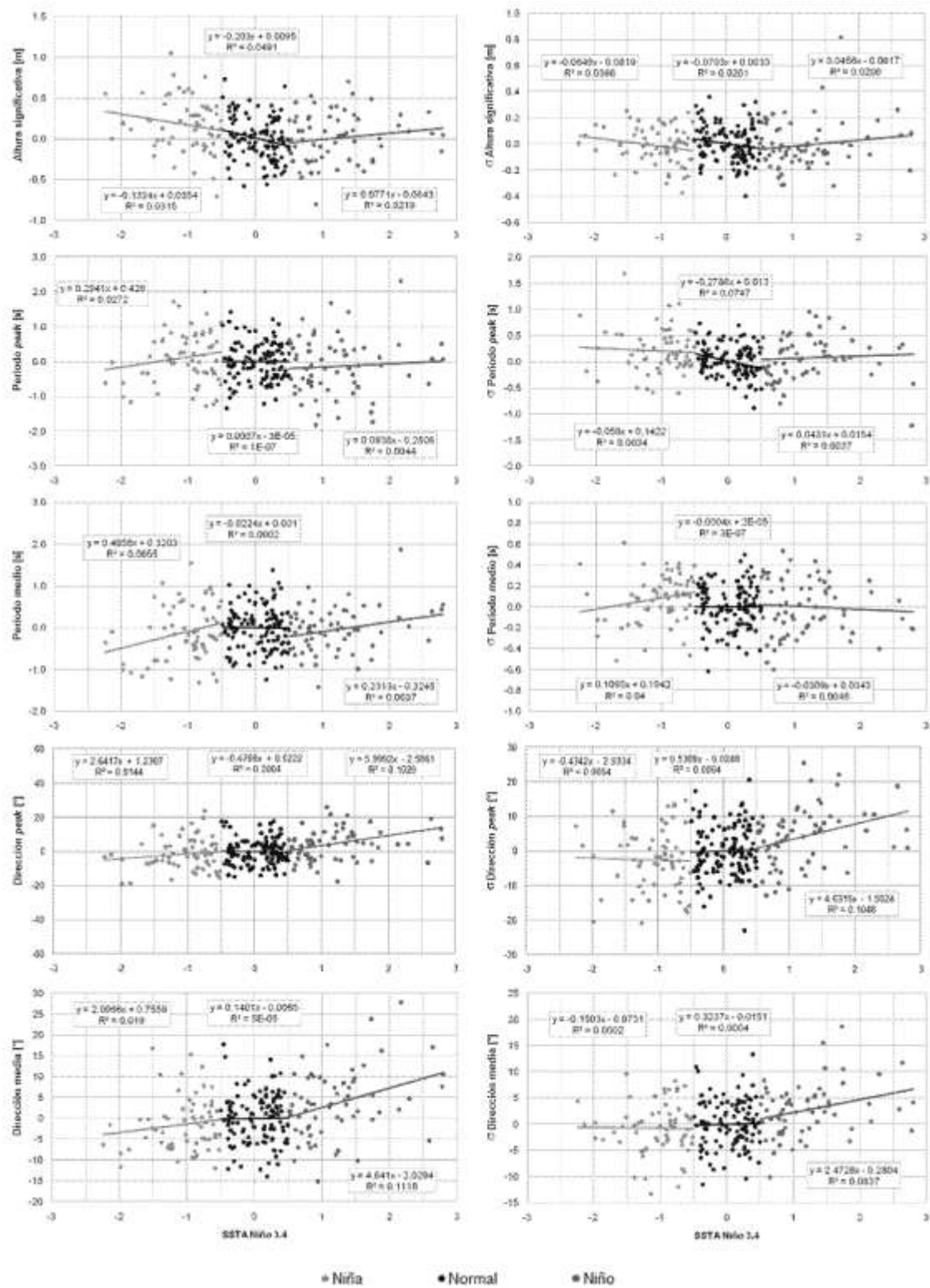


Figura 58. Dispersión entre anomalía mensual por parámetro y las fases de ENOS según índice SSTA Niño 3.4 en el Nodo 35°S.
(Elaboración propia)

4.3 PRONÓSTICO DE CLIMA MEDIO DE OLEAJE CON ANÁLISIS NO ESTACIONARIO

Se han aplicado los resultados descritos en los sub capítulos precedentes utilizando la metodología descrita en el sub capítulo 3.6.6 para la estimación de una condición de oleaje futura.

Se considera un horizonte de 25 años a contar del término de la estadística (año 2006), equivalente al año 2031, bajo condiciones extremas de ENOS (en este caso se consideran los índices 3 y -2.5), para obtener las variaciones máximas esperables por parámetro según el planteamiento metodológico.

La estimación de la condición futura de oleaje que presentarán los parámetros nace de la obtención de la condición estacionaria (fase normal de ENOS y condición media del Calentamiento Global) que resulta de la diferencia entre la condición media de la estadística (Tabla 15) y el promedio de las variaciones de ENOS (Δ_{ENOS}) en la serie (Tabla 14), cuyos valores se presentan en la vista inferior de la Tabla 15. Esta presenta en general un comportamiento latitudinal similar al obtenido de la media de la estadística, con disminuciones del valor del parámetro en todas las latitudes del promedio de la altura y aumentos en todos los periodos, teniendo los restantes parámetros comportamientos desiguales en latitud.

Tabla 15. Valores medios por parámetro y nodo de la estadística (P) y en condición estacionaria (\bar{P}).

Latitud	Valores medios por parámetro y nodo									
	Promedio Mensual					Desviación Estándar Mensual				
	Hs [m]	Tp [s]	Tm [s]	Dirp [°]	Dirm [°]	Hs [m]	Tp [s]	Tm [s]	Dirp [°]	Dirm [°]
31°S	2.48	12.54	8.94	229.43	225.99	0.70	1.92	1.43	21.70	14.45
35°S	2.65	12.56	9.04	236.92	235.87	0.75	1.82	1.46	21.98	15.69
37°S	2.87	12.42	9.15	234.85	236.98	0.84	1.76	1.39	24.65	20.37
39°S	2.89	12.43	9.21	238.65	242.36	0.87	1.68	1.36	25.34	21.09

Latitud	Valores medios por parámetro y nodo en condición estacionaria									
	Promedio Mensual					Desviación Estándar Mensual				
	Hs [m]	Tp [s]	Tm [s]	Dirp [°]	Dirm [°]	Hs [m]	Tp [s]	Tm [s]	Dirp [°]	Dirm [°]
31°S	2.41	12.58	9.02	228.49	225.41	0.65	1.96	1.43	20.08	12.75
35°S	2.58	12.65	9.07	235.35	234.59	0.69	1.85	1.56	19.16	14.50
37°S	2.81	12.54	9.24	235.39	236.99	0.82	1.87	1.43	25.22	20.45
39°S	2.84	12.54	9.28	239.35	242.54	0.87	1.79	1.35	26.52	21.04

Para los escenarios futuros considerados, la estimación de las variaciones anuales asociado al Calentamiento Global determinadas para los 25 años futuros (ver Tabla 16) dan cuenta de disminuciones sustanciales en el promedio mensual de la dirección *peak*, cuyas magnitudes son comparables a las marcas de clase utilizadas en las rosas y tablas de incidencia, llegando a 22.64°, mientras que en el periodo y altura se presentan incrementos en torno a 0.5 [s] y 0.15 [m] respectivamente con máximos de 0.72 [s] y 0.22 [m]. En el caso de la desviación estándar las variaciones en la dirección *peak* consisten en disminuciones de alrededor de 9° contrario a dirección media que no presenta disminuciones superiores a 1.22°. En el caso del periodo, los valores entre 0.58 [s] y 1.01 [s] del parámetro *peak* se diferencian del parámetro medio que presenta valores latitudinales similares en torno a 0.3 [s]. La altura en cambio presenta valores entre 0.11 [m] y 0.29 [m].

Estos resultados en general son significativos, llegando a representar más del 30% del rango de valores de la serie mensual, teniendo en todos los parámetros valores principalmente en torno a 20% a excepción de la desviación estándar de la dirección media que no supera el 4%. Destacan entre el promedio y la desviación estándar la dirección *peak* en ambos (de 27% a 33% y de 19% a 23% respectivamente), la dirección media (de 8% a 26%) y el periodo *peak* (de 8% a 21%) en el primero. Mientras que en el segundo, el periodo *peak* (de 22% a 35%), el periodo medio (de 15% a 25%) y la altura significativa (de 9% a 25%). El periodo medio y la altura significativa en el promedio van de 1% a 12% y de 5% a 14% respectivamente.

Tabla 16. Variaciones por Calentamiento Global (Δ_{CG}^*) en horizonte de 25 años (a) y su proporción respecto a rango de la serie (b).

(a)	Promedio Mensual					Desviación Estándar Mensual				
Latitud	H _s [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]	H _s [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]
31°S	0.22	0.29	-0.14	-21.82	-11.77	0.14	1.01	0.22	-8.96	-0.29
35°S	0.14	0.29	-0.04	-22.64	-11.30	0.29	0.86	0.22	-9.97	-1.22
37°S	0.11	0.72	0.43	-14.58	-4.36	0.14	0.58	0.32	-8.86	-0.25
39°S	0.18	0.61	0.36	-17.71	-7.67	0.11	0.68	0.32	-8.42	0.00

(b)	Promedio Mensual [%]					Desviación Estándar Mensual [%]				
Latitud	H _s	T _p	T _m	Dir _p	Dir _m	H _s	T _p	T _m	Dir _p	Dir _m
31°S	14.34	8.46	-4.48	-27.31	-25.95	18.23	34.79	15.64	-19.60	-1.03
35°S	7.72	8.35	-1.06	-32.71	-22.12	25.26	27.53	16.62	-22.87	-3.53
37°S	5.38	21.00	12.44	-26.76	-8.08	14.08	22.27	24.29	-20.10	-0.78
39°S	8.01	18.96	11.00	-32.96	-14.19	9.65	28.26	24.66	-19.05	0.00

Para el caso de las variaciones bajo las condiciones extremas de ENOS (ver Tabla 17), las variaciones en la condición Niño con valor de índice SSTA Niño 3.4 igual a 3, las variaciones presentadas en el promedio mensual dan cuenta de incrementos en todos los parámetros, teniendo en la altura significativa valores de 0.14 [m] a 0.19 [m] mientras que las variaciones en los periodos van de 0.02 [s] y 0.58 [s] siendo siempre mayores en el parámetro medio. En la dirección, en cambio, el parámetro *peak* es siempre mayor que el medio, presentándose valores de 7.86° a 15° y de 6.24° a 11.60° respectivamente. Para la desviación estándar se presentan incrementos en las direcciones, con valores entre 2.13° y 7.55° en el parámetro medio y de 5.18° a 11.58° en el *peak*, y en la altura significativa con valores menores a 0.14 [m]. Para los periodos, en cambio, se presentan variaciones positivas y negativas, entre -0.01 [s] y 0.11 [s] en el parámetro *peak* y de 0.05 [s] a -0.08 [s] en el medio.

Para las variaciones en la condición Niña extrema considerando SSTA Niño 3.4 igual a -2.5, se presenta para el promedio mensual disminuciones en todos los parámetros salvo en la altura significativa, que presenta incrementos entre 0.06 [m] y 0.27 [m]. Los periodos presentan disminuciones entre 0.40 [s] y 0.81 [s] siendo siempre mayor el parámetro medio que el *peak*, mientras que en la dirección las disminuciones van de 3.99° a 6.47° siendo siempre mayor el parámetro *peak* que el medio. En la desviación estándar mensual, todos los parámetros presentan tanto incrementos como disminuciones, presentando la altura valores de -0.01 [m] a 0.13 [m], los periodos de -0.28 [s] a 0.12 [s] y las direcciones valores inferiores a 1.5° salvo en los nodos 37°S y 39°S de la dirección *peak* que presentan disminuciones de -7.10° y -8.31 [s] respectivamente.

Las variaciones en las condiciones extremas de ENOS presentan proporciones sobre el 20% en varios parámetros, principalmente en el promedio mensual en ambas fases. En este, destacan las proporciones de la dirección en la fase cálida (de 11% a 23%) y del periodo en la fase fría (de 12%

a 24%). Mientras que a la inversa, el periodo en la fase cálida va de 1% a 17% y la dirección en la fase fría, va de 7% a 13%. La altura tiene mayor regularidad en la condición Niño (de 6% a 12%) que en la Niña (de 3% a 14%) donde es más notoria la diferencia entre los dos nodos norte y los dos sur. En la desviación estándar mensual se presenta una mayor irregularidad de las proporciones alcanzadas, registrándose la mayor de las asociadas a ENOS (26.90% en el nodo 31°S de la dirección media en condición Niño) pero con 7 parámetros con valor menor a 1%. Con todo, destaca la dirección *peak* y media en la fase cálida con proporciones de 12% a 27% y de 6% a 27% respectivamente, mientras que en la misma fase los periodos no superan el 6% y la altura solo sobresale en los nodos 31°S y 35°S con 17% y 10% respectivamente. En la fase fría las proporciones son menores a 5% en la dirección, salvo en los nodos 37°S y 39°S de la dirección *peak* (de 16% a 19%), mientras que en los periodos la mitad presenta valores menores a 4% pero los restantes van de 10% a 17%. La altura por su parte presenta proporciones menores a 2% en los nodos extremos y de 6% a 11% en los interiores.

Tabla 17. Variaciones por condiciones extremas de ENOS (Δ_{ENOS}^*) para fase Niño (a) y Niña (b) con sus proporciones respecto a rango de la serie (c y d) respectivamente.

(a)	Promedio Mensual					Desviación Estándar Mensual				
Latitud	H _s [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]	H _s [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]
31°S	0.18	0.34	0.37	14.53	10.25	0.14	-0.01	-0.04	10.24	7.55
35°S	0.19	0.24	0.58	15.00	11.60	0.12	0.11	-0.08	11.58	6.18
37°S	0.17	0.02	0.17	8.30	6.52	0.00	0.07	0.05	7.42	2.73
39°S	0.14	0.06	0.15	7.86	6.24	0.00	-0.01	0.01	5.18	2.14

(b)	Promedio Mensual					Desviación Estándar Mensual				
Latitud	H _s [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]	H _s [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]
31°S	0.20	-0.51	-0.77	-6.35	-5.86	0.00	0.10	0.02	-0.86	0.46
35°S	0.27	-0.59	-0.81	-5.28	-4.19	0.13	0.12	-0.22	0.87	0.30
37°S	0.09	-0.41	-0.57	-6.32	-3.99	0.06	-0.27	-0.17	-7.10	-1.45
39°S	0.06	-0.40	-0.49	-6.48	-4.21	-0.01	-0.28	0.04	-8.31	-1.44

(c)	Promedio Mensual [%]					Desviación Estándar Mensual [%]				
Latitud	H _s	T _p	T _m	Dir _p	Dir _m	H _s	T _p	T _m	Dir _p	Dir _m
31°S	12.12	10.06	11.42	18.18	22.60	17.41	-0.35	-3.08	22.40	26.90
35°S	10.32	6.81	17.02	21.66	22.70	10.09	3.43	-5.96	26.55	17.85
37°S	8.34	0.66	4.82	15.23	12.08	0.24	2.80	3.56	16.84	8.40
39°S	6.23	1.70	4.66	14.63	11.55	0.22	-0.52	0.57	11.72	6.33

(d)	Promedio Mensual [%]					Desviación Estándar Mensual [%]				
Latitud	H _s	T _p	T _m	Dir _p	Dir _m	H _s	T _p	T _m	Dir _p	Dir _m
31°S	13.55	-14.98	-23.87	-7.95	-12.92	0.00	3.52	1.45	-1.89	1.65
35°S	14.26	-17.05	-23.92	-7.63	-8.21	11.40	3.76	-16.92	1.99	0.87
37°S	4.38	-12.07	-16.53	-11.61	-7.40	6.26	-10.44	-12.59	-16.11	-4.46
39°S	2.85	-12.27	-14.91	-12.05	-7.78	-1.25	-11.74	3.35	-18.79	-4.27

Tabla 18. Proyecciones de parámetros (P^*) en horizonte 25 años para las tres fases de ENOS en condiciones extremas.

Valores parámetros en horizonte 25 años (fase normal de ENOS)										
Latitud	Promedio Mensual					Desviación Estándar Mensual				
	Hs [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]	Hs [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]
31°S	2.63	12.87	8.88	206.67	213.64	0.79	2.96	1.65	11.12	12.46
35°S	2.73	12.94	9.04	212.71	223.28	0.97	2.71	1.78	9.19	13.28
37°S	2.92	13.26	9.67	220.81	232.63	0.96	2.45	1.75	16.36	20.20
39°S	3.02	13.15	9.64	221.64	234.87	0.98	2.48	1.67	18.10	21.04

Valores parámetros en horizonte 25 años y Niño extremo										
Latitud	Promedio Mensual					Desviación Estándar Mensual				
	Hs [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]	Hs [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]
31°S	2.81	13.21	9.24	221.20	223.89	0.93	2.95	1.60	21.36	20.01
35°S	2.92	13.18	9.61	227.71	234.89	1.09	2.82	1.70	20.77	19.46
37°S	3.09	13.29	9.84	229.10	239.15	0.97	2.52	1.80	23.78	22.93
39°S	3.16	13.21	9.79	229.50	241.12	0.98	2.46	1.68	23.28	23.17

Valores parámetros en horizonte 25 años y Niña extremo										
Latitud	Promedio Mensual					Desviación Estándar Mensual				
	Hs [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]	Hs [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]
31°S	2.83	12.36	8.11	200.32	207.78	0.79	3.07	1.67	10.26	12.92
35°S	2.99	12.35	8.22	207.43	219.09	1.10	2.83	1.56	10.06	13.58
37°S	3.01	12.85	9.10	214.48	228.64	1.03	2.18	1.58	9.26	18.75
39°S	3.09	12.76	9.15	215.16	230.67	0.97	2.19	1.72	9.79	19.60

Los valores de los parámetros de oleaje para los tres escenarios propuestos, a saber, proyección de 25 años bajo condición normal y extrema de ENOS en sus fases Niño y Niña, se encuentran descritos en la Tabla 18 y graficados por nodo junto con la condición estacionaria en la Figura 59.

Para la proyección de 25 años en la fase normal de ENOS los resultados muestran un incremento generalizado de la altura y el periodo y una disminución de la dirección tanto en el promedio como en la desviación estándar para todos los nodos respecto a la condición estacionaria, salvo en la desviación estándar de la dirección media donde la disminución es marginal. Dado que la condición normal de ENOS considera que el fenómeno no tiene influencia en el oleaje, las variaciones y proporciones de este escenario respecto a la condición estacionaria equivalen a las estimadas en la proyección de 25 años, descrito en Tabla 16, por lo que la descripción de la importancia de las variaciones es equivalente a lo que allí se encuentra descrito.

En el caso de la influencia de un evento Niño extremo (con valor de índice SSTA Niño $3.4 = 3$) en un horizonte de 25 años, los valores determinados son en general de magnitud superior a los presentes en el escenario en condición normal de ENOS. Por ende, las variaciones de este escenario respecto a la condición estacionaria (ver Tabla 19) son de mayor relevancia en el caso de la altura y el periodo, mientras que en las direcciones las disminuciones son menores por la compensación entre las variaciones asociadas al Calentamiento Global y a la fase cálida. En el promedio mensual, las variaciones de altura significativa son incrementos de 0.28 [m] a 0.40 [m] (de 14% a 26%), mientras que en los periodos van de 0.52 [s] a 0.74 [s] (de 19% a 22%) y de 0.22 [s] a 0.60 [s] (7% a 17%) para los parámetros *peak* y medio respectivamente. Para la dirección

peak se presentan disminuciones de -6.29° a -9.85° (9% a 18%), mientras que en la dirección media se presentan tanto disminuciones como incrementos que van de -1.52° a 2.16° (menores a 4%). En el caso de la desviación estándar se producen incrementos de 0.11 [m] a 0.40 [m] (10% a 36%) en la altura significativa, de 0.65 [s] a 1.00 [s] (25% a 34%) en el periodo *peak*, de 0.14 [s] a 0.37 [s] (11% a 28%) en el periodo medio y de 2.14° a 7.26° (6% a 26%) en la dirección media. Para la dirección *peak* en cambio se producen tanto incrementos como disminuciones (menores a 7%) de -3.24° a 1.61° .

Tabla 19. Variación respecto a condición estacionaria de la proyección de 25 años con Niño (a) y Niña (b) extremo y su proporción respecto a rango de la serie (c y d) respectivamente.

(a)	Promedio Mensual					Desviación Estándar Mensual				
Latitud	Hs [m]	Tp [s]	Tm [s]	Dirp [°]	Dirm [°]	Hs [m]	Tp [s]	Tm [s]	Dirp [°]	Dirm [°]
31°S	0.40	0.63	0.22	-7.29	-1.52	0.28	1.00	0.17	1.28	7.26
35°S	0.34	0.52	0.54	-7.65	0.30	0.40	0.97	0.14	1.61	4.96
37°S	0.28	0.74	0.60	-6.29	2.16	0.15	0.65	0.37	-1.43	2.48
39°S	0.32	0.67	0.51	-9.85	-1.43	0.11	0.67	0.33	-3.24	2.14

(b)	Promedio Mensual					Desviación Estándar Mensual				
Latitud	Hs [m]	Tp [s]	Tm [s]	Dirp [°]	Dirm [°]	Hs [m]	Tp [s]	Tm [s]	Dirp [°]	Dirm [°]
31°S	0.42	-0.22	-0.91	-28.17	-17.63	0.14	1.11	0.24	-9.83	0.18
35°S	0.41	-0.30	-0.85	-27.93	-15.50	0.42	0.98	0.00	-9.10	-0.92
37°S	0.20	0.31	-0.14	-20.90	-8.35	0.21	0.31	0.16	-15.96	-1.70
39°S	0.24	0.22	-0.13	-24.19	-11.87	0.09	0.40	0.37	-16.73	-1.44

(c)	Promedio Mensual [%]					Desviación Estándar Mensual [%]				
Latitud	Hs	Tp	Tm	Dirp	Dirm	Hs	Tp	Tm	Dirp	Dirm
31°S	26.46	18.52	6.95	-9.12	-3.35	35.63	34.45	12.56	2.80	25.87
35°S	18.03	15.16	15.95	-11.04	0.58	35.35	30.96	10.65	3.68	14.32
37°S	13.71	21.65	17.26	-11.54	4.01	14.32	25.08	27.85	-3.25	7.62
39°S	14.23	20.66	15.66	-18.33	-2.64	9.87	27.75	25.23	-7.33	6.33

(d)	Promedio Mensual [%]					Desviación Estándar Mensual [%]				
Latitud	Hs	Tp	Tm	Dirp	Dirm	Hs	Tp	Tm	Dirp	Dirm
31°S	27.89	-6.52	-28.35	-35.26	-38.88	18.23	38.32	17.09	-21.49	0.63
35°S	21.97	-8.70	-24.99	-40.34	-30.32	36.67	31.29	-0.31	-20.88	-2.67
37°S	9.76	8.92	-4.09	-38.37	-15.47	20.33	11.83	11.69	-36.21	-5.23
39°S	10.85	6.69	-3.91	-45.01	-21.97	8.40	16.53	28.01	-37.84	-4.27

En el caso de la proyección de 25 años en un evento Niña extremo (con valor de índice SSTA Niño $3.4 = -2.5$) destacan los valores del promedio mensual de los periodos y direcciones, los cuales son menores a los presentados en los otros dos escenarios, mientras que la altura significativa es en general de valor similar a los presentados en la proyección con Niño extremo, al igual que en la desviación estándar de los periodos. En cambio, la desviación estándar de la altura significativa y las direcciones tienen valores similares a la de la proyección con fase normal de ENOS.

En cuanto a las variaciones que presenta el escenario de la condición Niña extrema, las variaciones presentadas en la Tabla 19 indican para el promedio mensual incrementos de 0.20 [m] a 0.42 [m] (de 10% a 28%) en la altura significativa, mientras que para el periodo *peak* se presentan tanto incrementos como disminuciones de -0.30 [s] a 0.31 [s] (menores a 9%). Para el periodo medio se presentan disminuciones de -0.13 [s] a -0.91 [s] (de 4% a 28%), de -20.90° a -28.17° (35% a 45%) en la dirección *peak* y de -8.35° a -17.63° (15% a 39%) en la dirección media. Para la desviación estándar se presentan incrementos en la altura significativa de 0.09 [m] a 0.42 [m] (de 8% a 37%), en el periodo *peak* de 0.31 [s] a 1.11 [s] (12% a 38%) y en el periodo medio de 0.16 [s] a 0.37 [s] (12% a 28%) sin considerar el nodo 35°S que presenta variación 0.00 [s]. En el caso de la dirección *peak* se presentan disminuciones de -9.10° a -16.73° (de 21% a 38%), mientras que en la dirección media se presentan tanto incremento como disminuciones de -1.70° a 0.18° (menores a 5%).

En general estos resultados dan cuenta de una relevancia considerable en las influencias conjuntas del Calentamiento Global y de ENOS bajo condiciones extremas, presentándose diferencias respecto a la condición estacionaria generalmente en torno a 20% con máximo de 45%.

En el caso de analizar las implicancias de las proyecciones por parámetro, se puede señalar para la altura significativa que para las tres proyecciones, la condición media es siempre mayor que la estacionaria, sobre todo en el límite superior de la banda $\pm 1 \sigma$, mientras que el límite inferior presenta similar magnitud para todos los casos. En cuanto a las diferencias en las fases de ENOS de las proyecciones, para todos los nodos los límites de la banda $\pm 1 \sigma$ y el valor medio son siempre mayores en las fases cálida y fría que en la condición normal.

Genéricamente, para el periodo y la dirección se observa que la proyección en la condición normal de ENOS es siempre mayor y menor respectivamente en su valor medio que en la condición estacionaria, a excepción del periodo medio en los nodos 31°S y 35°S, mientras que siempre el valor medio en la condición Niña y Niño es menor y mayor respectivamente que en la condición normal, dando cuenta además que siempre los límites superior e inferior de las bandas de $\pm 1 \sigma$ tienen un orden de menor a mayor de la fase fría a la cálida.

Individualmente, en el periodo *peak* la banda $\pm 1 \sigma$ es significativamente mayor en todas las condiciones proyectadas a la de la condición estacionaria, mientras que en el periodo medio presentan una relativa uniformidad en latitud y fase de ENOS.

En el caso de la dirección destaca para el parámetro *peak* la alta influencia de la fase cálida en el incremento del promedio y dispersión del parámetro, a la vez que la fase fría induce una reducción, salvo en la dispersión de los nodos 31°S y 35°S, que se mantiene relativamente invariable. En cuando a la dirección media, a la influencia de ENOS en el promedio destacada en el parámetro *peak* se suma la similitud de la dispersión direccional en las fases de ENOS hacia el sur, pero que hacia el norte se reduce salvo en la fase cálida.

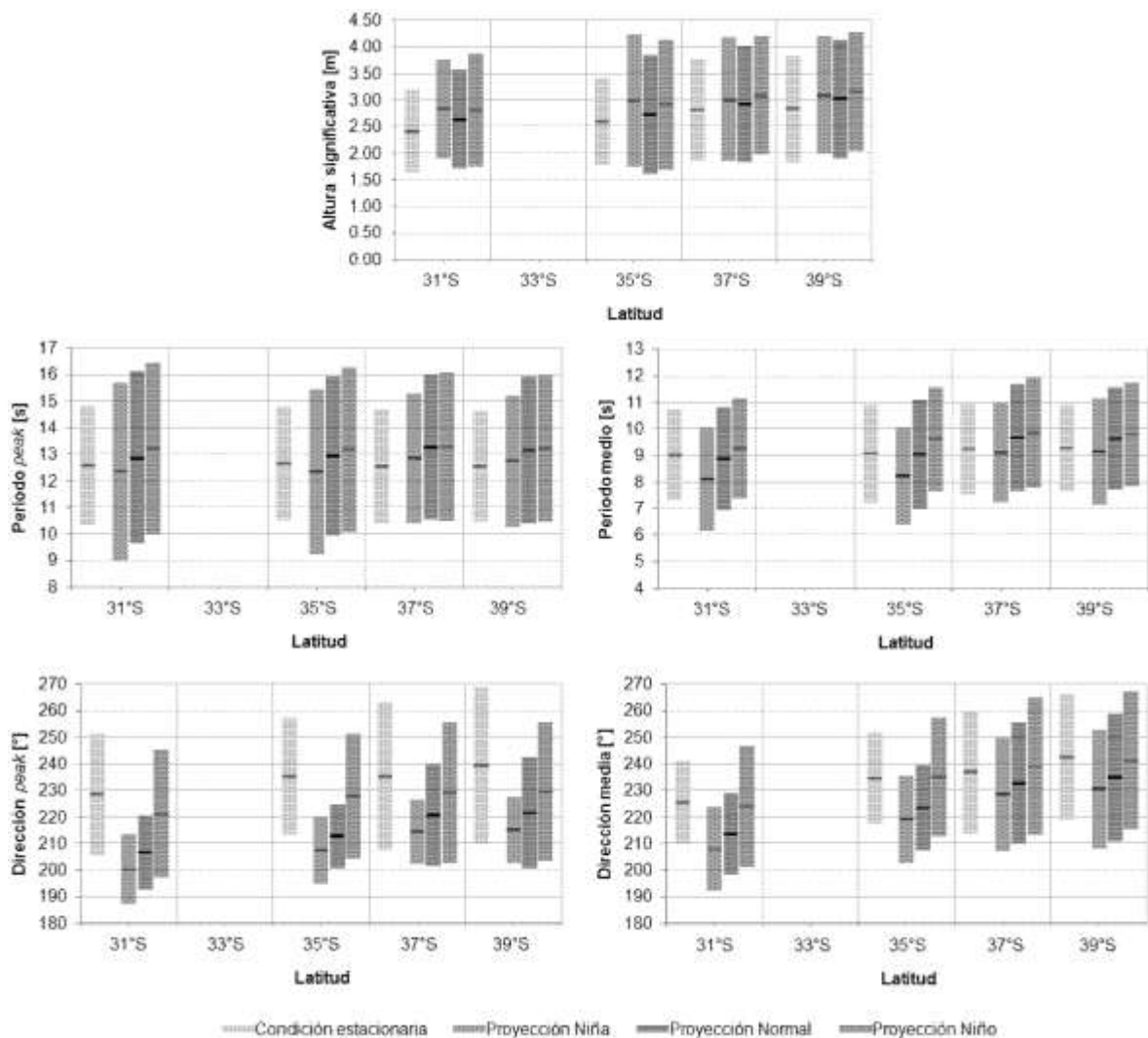


Figura 59. Valor medio con banda de una desviación estándar para cada parámetro y nodo en la condición estacionaria y las proyectadas de 25 años para cada fase de ENOS. (Elaboración propia)

5 DISCUSIÓN

5.1 DISCUSIÓN POR OBJETIVOS

5.1.1 OBJETIVO GENERAL: DESARROLLO DEL ESTUDIO NO ESTACIONARIO DE CLIMA MEDIO

Por simplicidad, los estudios tradicionales consideran la estimación de la condición media futura a partir de la presentada por la estadística. Esto en sí es una aproximación válida bajo la suposición de que el oleaje no sufrirá variaciones significativas ni perdurables en el tiempo (estacionario). No obstante, el mundo científico en la actualidad se encuentra girando en torno a la evidencia del Cambio Climático y sus efectos. De igual forma el fenómeno El Niño – Oscilación Sur (ENOS) se encuentra en proceso de estudio ante los efectos evidenciados en los episodios de 1982-83 y 1997-98. El primero al ser un fenómeno tendencial no posee la condición estacionaria, mientras que de ENOS se ha encontrado evidencia del debilitamiento de la circulación en el Pacífico ecuatorial (asociado a su proceso de desarrollo) manifestado como una disminución del 25% de la surgencia a contar de mediados de la década del 70, por lo que tampoco es un fenómeno estacionario. Ambos, al ser parte de los procesos de generación del oleaje a partir de las variaciones que inducen en las condiciones de viento visto en capítulos anteriores, invalidan la condición estacionaria supuesta para el oleaje, por ende, que la aproximación de la condición de oleaje futura sea representativa a partir de la condición media de la estadística tiene poca validez. Bajo estos conceptos, resulta necesario explorar alternativas que permitan obtener pronósticos de oleaje con mayor certidumbre en vista de las influencias de los fenómenos de escala global antes mencionados, motivo fundamental del desarrollo del presente trabajo.

De esta forma se propone identificar las influencias de estos fenómenos en el oleaje, a fin de poder contar con una condición de oleaje que efectivamente sea estacionaria. Este planteamiento responde a la hipótesis que al hallar las influencias es posible quitarlas de la serie, resultando una condición de oleaje que efectivamente sea estacionaria, lo cual es representado por el modelo aditivo:

$$\text{Oleaje (estacionario)} = \text{Oleaje real (no estacionario)} - \text{Influencia Calentamiento Global} - \text{Influencia ENOS}$$

Para que este modelo aditivo sea válido, se debe asegurar la independencia de las influencias de ambos fenómenos en el oleaje, lo que permite que ambas puedan ser obtenidas por separado. Esto no implica necesariamente la independencia entre ambos fenómenos, tema tratado con más detalle posteriormente.

Ahora bien, es esperable (y los resultados así lo demuestran) que la identificación de las influencias no sea totalmente satisfactoria, ya que para condiciones de ENOS equivalentes (respecto del valor del índice observado) se observan condiciones de oleaje distintas, pero atribuibles a una efectiva influencia del fenómeno. En este caso, solo se consigue la atenuación de las influencias de los fenómenos de las series, consiguiéndose así una mejor aproximación a la condición de oleaje estacionario que las obtenidas directamente de la estadística.

El estudio de las influencias del Calentamiento Global y del fenómeno ENOS en el oleaje es materia de reciente discusión. En el caso de las influencias de ENOS en el oleaje destacan las publicaciones realizadas en Australia en el hemisferio sur y EEUU en el hemisferio norte, dentro de las que se encuentran:

Komar P. 1998. El Niño and coastal erosion in the Pacific Northwest. Oregon Geology, vol 60, n° 3.

Stolarzzi C. & D. Wingfield. 2005. *Spatial and Temporal Variations in Oceanographic and Meteorologic Forcing Along the Central California Coast, 1980–2002* (disponible en <http://pubs.usgs.gov/sir/2005/5085/>).

Trembanis A. 2006. *El Niño/Southern Oscillation (ENSO), wave climate, and beach variation*. Disponible en http://gsa.confex.com/gsa/2001ESP/finalprogram/abstract_4985.htm.

Mientras que en el estudio de las influencias del calentamiento global en el oleaje se han hallado las publicaciones:

Hemer M. 2010. *Historical trends in Southern Ocean storminess: Long - term variability of extreme wave heights at Cape Sorell, Tasmania*. *Geophysical Research Letters*, Vol. 37, L18601, doi:10.1029/2010GL044595.

Hemer M., J. Church & J. Hunter. 2010. *Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere*. *Int. J. Climatol.* 30: 475–491, DOI: 10.1002/joc.1900.

Destacando además el desarrollo de la mesa de trabajo de proyecciones coordinadas de clima global de oleaje por parte del Programa de Investigación de Cambio Climático y la Comisión Técnica Conjunta de Oceanografía y Meteorología Marina (The WCRP-JCOMM *Workshop on Coordinated Global Wave Climate Projections*) desarrollada entre el 11 y 13 de abril de 2011 en Ginebra, Suiza, y cuyo detalle puede encontrarse en la página web: <http://www.jcomm.info/cowclip>.

Adicionalmente, en ambos campos, el autor cuenta con varios títulos de publicaciones realizadas a nivel mundial, a las cuales no se logró acceso.

En el caso de Chile, no existen trabajos publicados en esta área, solo algunas publicaciones relacionadas con las influencias de los fenómenos en el viento, precipitaciones y condiciones atmosféricas. Por lo que este trabajo, tanto en la investigación de las influencias de ENOS y del Calentamiento Global, es inédito en Chile y contemporáneo a los esfuerzos de otros países en este campo.

En cuanto al desarrollo de un estudio que articule ambos fenómenos, a la fecha no se han hallado referencias de trabajos similares a nivel mundial, por lo que resulta un tema de gran potencialidad, para posicionar al país a la vanguardia de los estudios de oleaje a nivel mundial.

La verificación de la condición estacionaria supuesta para el oleaje es fácilmente realizable si se estiman el promedio y desviación estándar (como subproducto de la varianza) en sub intervalos de la serie de datos, que en este caso han sido calculados para la dirección *peak* en el nodo 35°S en ventanas mensuales, anuales y para el total de la serie (ver Figura 60).

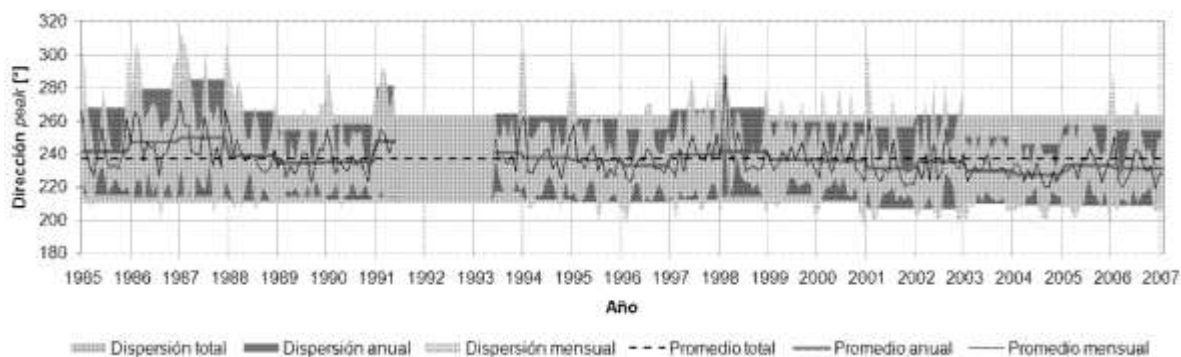


Figura 60. Promedio y desviación estándar total, anual y mensual de la dirección *peak* en el nodo 35°S.

El promedio y desviación estándar total de la serie representan el supuesto estacionario del parámetro de oleaje, que en términos teóricos debiera ser el mismo en cualquier sub intervalo para que sea efectivo, según lo enunciado en el principio del capítulo 3.6.1. No obstante, la estimación de los estadígrafos anuales dan cuenta de su diferencia respecto a la del total, presentando en la primera mitad valores anuales en general por sobre el del total, mientras que en la segunda mitad se aprecian valores anuales por bajo del total, lo que da cuenta de un comportamiento de disminución progresiva del valor medio del parámetro, que es probable se mantenga en los tiempos futuros a la estadística. En términos mensuales, las diferencias se hacen más notorias en ambos estadígrafos, presentándose incluso valores medios por sobre el límite superior de la banda de la desviación estándar, y otros en los que la desviación estándar es muy menor a la total de la serie. Estos antecedentes dan cuenta que la serie por sí sola posee un comportamiento distinto al estacionario, sustentando el supuesto de que en realidad el oleaje es no estacionario.

Si se consideran el Calentamiento Global y ENOS como los responsables del carácter no estacionario del oleaje, el comportamiento progresivo del primero se reflejará en la serie de parámetros como una tendencia (considerando una visión simplificada del fenómeno, lo cual se discute en las influencias de Calentamiento Global en el oleaje), mientras que el segundo corresponderá a una variación cíclica irregular en torno al valor medio que estará modulado por la tendencia de la serie.

El estudio de oleaje no estacionario apunta a correlacionar las variaciones presentes en la estadística con el Calentamiento Global y ENOS, ya que en la medida que estas variaciones en la serie se encuentren bien asociadas a los fenómenos no estacionarios, es posible extrapolar hacia el futuro la magnitud de las variaciones bajo los escenarios que se presenten de estos, que en el caso del Calentamiento Global será como la evaluación de la fecha en la función de la tendencia estimada, mientras que en el caso de ENOS puede ser bajo la evaluación de las condiciones extremas o bien a partir de las proyecciones que ofrecen instituciones como NOAA con seis meses de antelación.

Esta proyección debe hacerse en base a una condición que en efecto no esté influenciada por los fenómenos no estacionarios, es decir, bajo la condición normal de ENOS, y neutra del Calentamiento Global. Resultando una condición estacionaria que obtiene al quitar de la serie las influencias estimadas de ambos fenómenos.

La posibilidad de realizar una proyección de la condición de oleaje para distintos horizontes y condiciones de ENOS y además en distintos espacios temporales, desde meses a décadas, supone una ventaja respecto al estudio tradicional que, por su simplicidad, solo ofrece una caracterización general de la condición media de oleaje pasada (de la estadística) que no asegura que, en efecto, sea la que se presentará en el futuro.

Estas mejoras en la aproximación del oleaje esperado, permiten anticipar las medidas tendientes a contener o manejar la influencia del oleaje en el proyecto contemplado, reduciendo de paso la incertidumbre, el riesgo y los costos asociados.

En este sentido, el estudio de oleaje no estacionario es de gran utilidad para proyectos sensibles a variaciones en los parámetros de oleaje tanto mensual como en su vida útil, como orientación de sitios de atraque con baja protección (muelles de penetración principalmente), procesos de mezcla y transporte litoral (sedimento, nutriente, oxígeno), granjas de generación de energía undimotriz, obras de abrigo y otros, mientras que también permite evaluar el comportamiento de los proyectos existentes ante los escenarios futuros del clima medio de oleaje.

5.1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO UNO: CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA MEDIO

Se realiza el estudio de oleaje tradicional ante la ausencia de un trabajo similar que permita tener una referencia de las características del oleaje en la costa central de Chile, constituyendo uno de los ejes de este proyecto. La estadística, suministrada gentilmente por la empresa HydroChile S.A., consiste en parámetros de resumen de 20 años en cuatro puntos latitudinales de la costa chilena a una distancia de la costa tal que se asegure la condición de aguas profundas (oleaje no

influenciado por fondo). Esta permite tener una representatividad de gran parte de la IV Región, y desde la VI a la XIV Región, representando cerca de 890 [km] del litoral de Chile y casi la totalidad de la costa central (falta costa de la V región). Dado que se utiliza información de parámetro de resumen (reducida información del estado de mar, pero fácil manejo de datos) en desmedro de la información espectral (información completa, pero volumen de datos de manejo complejo), se considera la utilización de los parámetros *peak* y medio con el objeto de tener una visión más representativa de la información espectral.

El oleaje característico de la costa central de Chile se genera fundamentalmente en el frente polar antártico, lo que se evidencia en su incidencia desde la dirección SW, con alturas de 2 [m] a 3 [m] y periodos entre 12 [s] y 14 [s], teniendo clasificación del tipo *swell* debido a la distancia con la fuente de generación (de 2000 [km] a 8000 [km]). Dado que la zona de estudio se encuentra posicionada en el extremo suroriental del anticiclón semipermanente del Pacífico sur, las depresiones que avanzan desde el frente polar antártico hacia bajas latitudes generan oleaje del tipo *sea* que presenta dirección de incidencia desde el SW hasta el NW, periodos inferiores a 8 [s] y alturas generalmente inferiores a las del tipo *swell*. El oleaje generado en el frente polar ártico constituye la tercera fuente de generación del oleaje de la costa central de Chile, el cual incide desde el NW con periodos superiores a 16 [s] y alturas generalmente bajas (menores a 1 [m]). De estas fuentes de generación, el *swell* SW tiene una permanente presencia, mientras que el *swell* NW se manifiesta principalmente en verano (época invernal en la zona de generación), mientras que el *sea* tiene una presencia intermitente a lo largo del año, teniendo mayor frecuencia en época invernal.

En las condiciones de oleaje extremo, los estados de mar con alturas superiores a 5 metros tienen periodos principalmente entre 8 [s] y 16 [s] y direcciones entre el SW y NW, lo que da cuenta de que su generación ocurre principalmente en el frente polar antártico y en las depresiones que se desplazan a bajas latitudes.

Latitudinalmente se observan hacia el norte oleaje con altura bajas y direcciones altamente concentradas en la dirección SW mientras que hacia el sur las alturas aumentan su tamaño y la incidencia presenta una mayor direccionalidad, entre SW y W. en cuanto al periodo no se observan diferencias importantes entre los nodos considerados.

Cabe destacar, respecto a la zonificación del oleaje, que entre nodos consecutivos la correlación estimada es mayor hacia el sur, destacando la similitud entre los nodos 37°S y 39°S (correlaciones entre 0.83 y 0.96) y en segundo orden entre los nodos 31°S y 35°S (entre 0.76 y 0.89).

5.1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO DOS: INFLUENCIA DEL CALENTAMIENTO GLOBAL EN EL OLAJE

La importancia del Calentamiento Global radica en la posibilidad de que todos los fenómenos océano-atmosféricos conocidos, caracterizados y zonificados varíen de su condición actual, y en esto se incluye el oleaje. Si bien existe discusión respecto a la real influencia antrópica en el desarrollo de este fenómeno, la evidencia encontrada en los registros de temperatura en distintos puntos del planeta y las observadas en zonas frías a partir de la disminución de las áreas y volúmenes de hielo obligan a planificar acciones tendientes a prever los efectos posibles en el clima planetario.

La recopilación de antecedentes ha permitido contar con un índice que describe este fenómeno y que destaca por su simpleza y su comprensión intuitiva, que a pesar de ser el único encontrado, el índice GLOTI (Global Land-Ocean Temperature Index) es un elemento totalmente suficiente para los propósitos que se persiguen en este proyecto.

Los esfuerzos por prever el desarrollo de este fenómeno han llevado a distintos países a realizar investigaciones y conformar un panel de expertos. Se han previsto distintos escenarios respecto al comportamiento futuro del desarrollo humano y en base a ello estimar las condiciones que presentará el sistema atmósfera-océano hacia finales del siglo que comienza. En términos climáticos, uno de los principales agentes a considerar es el de los campos de vientos, los cuales a su vez darán indicios del comportamiento futuro del oleaje. Al respecto, el estudio realizado por

Garreaud y Falvey (2008) tendiente a la caracterización del viento en Chile bajo los escenarios planteados por el IPPC, destaca un incremento de la intensidad de viento en el círculo polar antártico por la proyección del escenario A2 hacia finales de siglo sobre la condición actual, mientras que se observa una variación positiva de la presión en las cercanías del anticiclón y negativa en torno al frente polar antártico.

Lamentablemente, las estimaciones de la condición futura del viento no ofrecen información respecto a la evolución de este desde la actualidad hasta el horizonte evaluado. No obstante, las estimaciones de la temperatura del planeta para el presente siglo bajo los distintos escenarios considerados en la Figura 47 pueden dar indicios de su comportamiento.

Por simplicidad, la primera aproximación mediante una tendencia lineal representa una adecuación aceptable de la temperatura futura, ya que un ajuste más elaborado mediante funciones del tipo exponencial, potencial o polinomial debiera considerar además un completo estudio respecto a cuál de los escenarios planteados posee la mayor probabilidad de ser el que realmente ocurra en el futuro en base a la reacción de la humanidad ante el fenómeno, lo cual escapa a los alcances de este estudio. Es por este motivo que se considera la aproximación mediante una tendencia lineal como la más adecuada para representar la evolución del Calentamiento Global respecto a la información disponible.

Esta consideración lleva a estimar de las series de estadígrafos mensuales de los parámetros de resumen las variaciones anuales del parámetro mediante el ajuste de una recta. En esto se debe considerar que las evidencias del inicio del fenómeno comienzan desde principios del siglo pasado, y ha tenido un ritmo creciente sostenido desde la década del 70, por lo que las influencias del calentamiento global en el oleaje debieran manifestarse en la estadística disponible (1985-2006).

Las variaciones anuales por parámetro descritas en la Tabla 6 dan cuenta de un incremento de los valores medio de la altura y del periodo (con variaciones muy cercanas a cero de este último) mientras que la dirección manifiesta una disminución en su valor, variando hacia el sur. Las desviaciones estándar, asociadas a la dispersión mensual de los parámetros, tienen el mismo comportamiento, presentando en la estadística un aumento en la altura y el periodo, mientras que disminuye en la dirección. En cuanto a la diferenciación entre parámetros *peak* y medios, los primeros tienen siempre variaciones mayores a los segundos, mientras que latitudinalmente las variaciones tienen alta similitud pero generalmente adoleciendo de un orden consecutivo.

Dado que en general las variaciones determinadas son cercanas a cero, que la estadística de oleaje representa 22 años (con 2 años faltantes) y que su utilidad de basa en la proyección en la extensión de la vida útil de un proyecto considerado, se estiman las variaciones en la longitud estadística para tener una noción de las variaciones de largo plazo influenciadas por el Calentamiento Global en el oleaje (ver Tabla 7)

Los resultados indican que las variaciones anuales de los parámetros tienden a ser significativas en la extensión de la estadística, llegando a valores sobre el 20% en la dirección *peak* del promedio mensual y en la desviación estándar del periodo *peak* en los nodos 39°S y 31°S respectivamente, mientras que estos mismos tienen proporción siempre sobre 11.5% junto con la desviación estándar de la dirección *peak*. Caso opuesto es el de la desviación estándar de la dirección media que tiene proporción siempre inferior a 2.2%. Puesto que en general los restantes parámetros tienen proporciones cercanas al 10%, se puede señalar que las variaciones anuales de cada parámetro son totalmente relevantes respecto al rango de valores alcanzados por el parámetro (salvo el caso de la desviación estándar de la dirección media).

Los resultados de Garreaud y Falvey (2008) indican que el incremento de los vientos en el frente polar antártico es cercano a 1 [m/s] para la proyección del escenario A2 hacia finales de siglo sobre la condición actual que está en torno a los 5 [m/s], mientras que las variaciones de presión atmosférica encontradas están en torno a los 3 [hpa] sobre la condición actual de 1013 [hpa] en las cercanías del anticiclón y una disminución en torno a los -2 [hpa] respecto a la condición actual en las cercanías del frente polar antártico.

Ambos resultados implican una modificación de las condiciones atmosféricas de las principales zonas de generación del oleaje que llega a la costa central de Chile. Por un lado, la intensificación de los vientos en el frente polar antártico implicará un incremento en la altura y periodo del oleaje generado (según lo visto en el capítulo 3.1.2.1), en el caso que las variaciones atmosféricas no disminuyan en una proporción similar a los valores típicos de tamaño y duración de los *fetch*. Por otro lado, las variaciones en la presión inducirán una intensificación del anticiclón por el incremento de la presión atmosférica en latitudes medias, mientras que la disminución de la misma en el frente polar antártico producirá depresiones de mayor intensidad, implicando esto un gradiente de presión de mayor intensidad que provocará vientos mayores en esta modalidad según lo visto en el sub capítulo 3.3.3, aumentando las alturas y periodos junto con las dispersiones de ambos al combinarse en el estado de mar con los aportes desde el frente polar antártico. Relacionado con lo anterior, la intensificación del anticiclón aumentaría el bloqueo a las depresiones, mientras que si estas también se intensifican pudiera generarse un sistema con similar frecuencia de depresiones que avancen a latitudes bajas pero con una intensificación de los vientos que generen. Esto puede desplazar hacia el continente el sector por el que las depresiones se mueven hacia bajas latitudes, lo que explicaría la variación hacia el sur de la tendencia de la dirección del oleaje y una disminución de su dispersión al acotarse las zonas de generación local.

De esta forma, los resultados obtenidos y el comportamiento atmosférico futuro estimado mediante los escenarios de Calentamiento Global da cuenta de una relación satisfactoria de los resultados, lo que permite atenuar de la estadística la influencia de este fenómeno con el objeto de identificar de buena manera las influencias de ENOS en el oleaje.

5.1.4 OBJETIVO ESPECÍFICO TRES: INFLUENCIA DEL ENOS EN EL OLEAJE.

Se podría decir que la ocurrencia de ENOS representa la condición extrema del clima.

ENOS en sí representa la ocurrencia de fenómenos anormales en distintos puntos del globo, cuyos efectos sociales pasan principalmente por resentir el ciclo hídrico del lugar, notados como sequías e inundaciones. No obstante, este fenómeno tiene efectos océano-atmosféricos que generalmente son pasados por alto por la opinión pública, dentro de los que destacan corrientes, surgencia, pesca y vientos, este último lleva al oleaje.

ENOS se encuentra caracterizado por diversos índices relacionados, originalmente, con la temperatura superficial del mar y la presión atmosférica, dentro de los que se cuentan SSTA Niño 4, SSTA Niño 3, SSTA Niño 1+2, SSTA Niño 3.4 con el primero e IOS, con el segundo. Con posterioridad han sido desarrollados algunos indicadores como el Índice Multivariado de ENOS (MEI por sus siglas en inglés), el cual considera además de la presión superficial y la temperatura superficial del mar, la temperatura superficial del aire, la nubosidad total y las componentes zonales del viento (USGS 2005), dando una visión generalizada de las influencias del fenómeno a nivel global, sin embargo, por un tema de visibilidad de información, este antecedente no fue encontrado en la recopilación preliminar, apareciendo en las postrimerías del proyecto, por lo que no fue considerado en el desarrollo del mismo, sino que solo los asociados a temperatura superficial del mar y presión atmosférica.

La ausencia de un criterio que permita definir cuál de estos cinco índices considerados representa de mejor manera la influencia de ENOS en el oleaje, obliga a desarrollar uno para su selección. Para este efecto se ha considerado la estimación de la correlación entre cada índice en las fases cálida y fría de ENOS y los estadígrafos mensuales destendenciados para los meses correspondientes por cada parámetro y nodo (según detalle en sub capítulo 3.6.5), resultando un total de 400 combinaciones. La selección del índice que mejor se adecúa a la estadística se realiza a partir del promedio de las correlaciones absolutas, resultando la elección del índice SSTA Niño 3.4 que alcanza un valor de 0.129.

Cabe destacar que las correlaciones encontradas para todas las combinaciones (Tabla 9) no superan el valor 0.41 y que su valor promedio llega a 0.121, que si bien puede parecer una adecuación relativamente baja pensando en fenómenos que se encuentren directamente

relacionados, resulta una prueba que permite confirmar la relación existente entre ambos fenómenos. Ahora bien, esto puede indicar que el área involucrada en la generación del oleaje que se registra en el nodo correspondiente es superior al área de la zonificación de los efectos de ENOS en el viento, por lo que el parámetro de oleaje obtenido contiene una superposición de efectos del fenómeno en distintos lugares.

El promedio de correlaciones indica las mejores relaciones entre el índice SSTA Niño 3.4 y los parámetros se presentan en los nodos 31°S y 35°S para los parámetros de dirección y periodo medio en el promedio mensual, con correlaciones promedio entre 0.21 y 0.25. Analizando por grupo, los promedios mensuales evidencian mayoritariamente influencias de ENOS que las desviaciones estándar, siendo los parámetros de mayor correlación las direcciones y el periodo medio en el promedio mensual y la dirección *peak* en la desviación estándar, con correlaciones promedio entre 0.17 y 0.19, mientras que por nodo, el ubicado en los 35°S presenta el mayor promedio de correlación de los parámetros con 0.17, seguido por los nodos 31°S, 37°S y 39°S con 0.15, 0.11 y 0.09 respectivamente.

Preliminarmente, se obtienen de los estadígrafos mensuales a partir del índice SSTA Niño 3.4 una serie de datos asociados a la fase normal de ENOS, los que permiten definir los valores de un parámetro asociado a un año normal, y por ende, las anomalías mensuales que pueden ser asociadas a las fases de ENOS. Este procedimiento aparta de seis a catorce datos por cada mes del año, representando entre el 30% y 70% respectivamente de los datos disponibles (20 años) y el 50.8% del total de la estadística. Este volumen de datos permite contar con una confiable representación del año bajo la condición normal de ENOS del parámetro, pero a su vez disminuye a la mitad la estadística que, en efecto, es utilizada para caracterizar las influencias de ENOS en el oleaje.

Una comparación visual entre las series de anomalías por parámetro y el índice de ENOS (Figura 56 y Figura 57) permite destacar una diferencia en el comportamiento de ambas, teniendo la primera una variación mensual notoriamente superior a la manifestada por el índice SSTA Niño 3.4. Esto da cuenta de que las aproximaciones de las influencias de ENOS en el oleaje corresponden a una descripción del comportamiento global del oleaje sujeto a una banda de confianza que incorpore mejores aproximaciones al valor real del parámetro.

A pesar de lo anterior, la comparación del índice ENOS con el filtro triangular da cuenta de una alta similitud en varios sectores de las series. En el caso de los promedios mensuales, las direcciones presentan una alta similitud en toda la extensión de la serie, mientras que la altura y periodo solo tienen cercanía en algunos tramos (el primero más que el segundo). En la desviación estándar en cambio, las direcciones presentan aun mayor similitud que en el promedio, mientras que la altura y periodo se distancian más que en el promedio.

Una visión un poco más objetiva ofrecen las estimaciones de las regresiones lineales entre las anomalías y el índice SSTA Niño 3.4 dependiendo de la fase de ENOS, a través de las cuales se obtienen las variaciones del parámetro por unidad de índice de ENOS, las que se presentan en la Tabla 12 para todos los nodos y parámetros, mientras que la Figura 58 se grafican para el nodo 35°S.

Los resultados indican para el promedio mensual que las variaciones mensuales de los parámetros se encuentran influenciados por el valor del índice de ENOS que se alcanza, siendo en todos los casos esta relación directa, a excepción de la altura significativa en la condición Niña, donde es inversa. Analizando por parámetro, las variaciones por unidad de índice producidas por las fases cálida y fría no son equivalentes entre sí, pasando de leves diferencias en algunos nodos de la dirección a valores de signo contrario en la altura. Con todo, para los periodos siempre es mayor la influencia de La Niña que de El Niño, mientras que en la dirección es a la inversa. Con todo, latitudinalmente en todos los casos se mantiene una variabilidad consecuente. En esto destaca que la altura aumenta independiente de la fase de ENOS, mientras que en el caso del periodo y dirección, la fase cálida induce un aumento de la magnitud del parámetro y la fase fría una

disminución, pero cuyas influencias decaen hacia mayores latitudes salvo en la condición Niña de la dirección *peak*.

En el caso de la desviación estándar los resultados son menos concluyentes que en el promedio, al presentarse un número importante de variaciones cercanas a cero, variaciones de un parámetro de distinto signo en una misma fase de ENOS, diferencias de influencias de ENOS por fase en un parámetro de mayor notoriedad que en el promedio y una variación latitudinal carente de un orden consecutivo. Con todo, destacan las variaciones en la fase Niño de las direcciones, las cuales presentan siempre valores positivos y con un orden consecutivo latitudinal. En esto se puede inferir que las variaciones de la dispersión del oleaje pueden responder a condiciones locales de escala espacial menor al orden de la zona de estudio, que impiden generalizar la influencia latitudinal de ENOS, salvo en la condición Niño de la dirección, donde la incidencia del oleaje es más dispersa hacia el norte que en la condición normal.

Un aspecto relevante no considerado directamente de las variaciones por unidad de índice de ENOS es la continuidad de las influencias obtenidas en el dominio del fenómeno, de lo cual da cuenta la Figura 58, donde se observan discontinuidades notorias en buena parte de los parámetros, a excepción de la continuidad mostrada por la dirección. Esto es debido a que en parte la metodología propuesta considera que los parámetros de oleaje no son influenciados en la fase normal de ENOS, comenzando dichas influencias a partir del límite de cambio de fase, considerado para el índice SSTA Niño 3.4 equivalente a 0.5. Esto puede ser indicio de que ciertos parámetros de oleaje tienen razones de influencia equivalentes en intervalos del índice ENOS distintos a los que predefinen las fases, dando cuenta de esto el promedio de la altura significativa que tiene una representación continua pero en dos intervalos (en Niño y en Normal-Niña) al igual que la desviación estándar de la dirección media, pero con variación cero en la condición no-Niño.

En cuanto a la relevancia de las variaciones de un parámetro por unidad de índice, se estiman las proporciones respecto al rango de valores presentados en las series mensuales (diferencia entre el máximo y mínimo descrito en la Tabla 28), cuyos resultados son entregados en la Tabla 13, y en donde destaca que para todos los casos las variaciones son siempre menores a 11% y 12% en las condiciones Niño y Niña respectivamente. Si bien esto pudiera parecer un resultado poco significativo, vale recordar que el índice ENOS en la extensión de 60 años disponible oscila entre 3 y -2.5 aproximadamente, implicando que bajo condiciones extremas se pueden llegar a proporciones cercanas a 27% y 24% respectivamente al estimar las variaciones según las indicaciones del sub capítulo 3.6.6, alcanzando relevancia.

Los resultados obtenidos pueden ser contrastados con las influencias de ENOS en el viento generador, lo cual se ha tratado en el sub capítulo 3.4.4. Allí se trata el estudio de Avaria *et al.* (2004) consistente en el análisis de las influencias de ENOS en el campo de vientos mediante un diagrama latitud tiempo de la anomalía de la componente zonal del viento en 200 [hPa] (equivalente al plano horizontal a 11.8 [km] de altura aproximadamente) en el promedio longitudinal entre 160°W y 90°W en el hemisferio sur entre enero de 1996 y julio de 2000 (Figura 39), abarcando el evento Niño 1997-98. De este estudio se desprende la existencia de 4 bandas latitudinales (del ecuador a 10°S, 20°S a 30°S, 40°S a 60°S y 60°S a 80°S) que responden de distinta manera a las fases de ENOS descrita por la serie del índice SSTA Niño 3.4. La intensidad del viento en la banda ecuatorial y la 40°S-60°S es inversamente proporcional al valor del índice ENOS siendo la primera altamente sensible a la fase cálida y la segunda a la fase fría; mientras que en las bandas 10°S-20°S y 60°S-80°S la proporcionalidad es directa, siendo la primera altamente sensible a las variaciones de ENOS, mientras que la segunda presenta variaciones de menor importancia.

Estos resultados dan cuenta de la influencia de ENOS en el campo global de vientos, cuyas variaciones en torno a los 60° de latitud permiten inferir cambios en el oleaje generado en el frente polar antártico. Asumiendo que los vientos son relativamente uniformes en la vertical de la atmósfera, los vientos del frente polar antártico sufren una intensificación en la fase Niño y una disminución en la fase Niña. Estos resultados son consecuentes con el incremento de la altura y el

periodo en la fase Niño y con la disminución del periodo en la fase Niña, mientras que no es capaz de explicar el aumento de la altura en la fase fría, ni las variaciones de la dirección.

De manera complementaria se deben revisar las influencias de ENOS en la ocurrencia de depresiones y en las características del anticiclón, ya que de la interacción entre ambos puede surgir la respuesta al comportamiento de los restantes parámetros del oleaje. En este sentido, los resultados obtenidos podrían ser explicados por un aumento de la llegada de depresiones a latitudes medias en la condición Niño (debilitamiento del anticiclón) lo que aumentaría la participación mensual de estados de mar, principalmente caracterizados con oleaje tipo sea, que dado el desplazamiento latitudinal de las depresiones explicarían la variación de la dirección hacia el norte y el aumento de su dispersión mensual, a la vez que aumenta la dispersión de alturas generadas (principalmente las alturas menores a las generadas en el frente polar antártico que son más altas de lo normal). En la condición Niña en cambio, una intensificación del anticiclón evitaría el ingreso de las depresiones a latitudes medias, explicando el desvío hacia el sur de la dirección de incidencia (pero con variación menor a la manifestada en la fase cálida) junto con la dispersión direccional similar a la presente en la condición normal dada las posiciones relativas. La intensificación incrementaría el gradiente de presiones con las depresiones, explicando ello el incremento de las alturas de ola descrito en los resultados, que pueden llegar a ser similares o superiores a las generadas en el frente polar antártico (las que han disminuido), explicando la baja variación de la dispersión respecto a la condición media. En el caso del periodo, la influencia del sea en este parámetro es baja, dado que en general el ordenamiento sufrido por el oleaje generado en el frente polar antártico incrementa el periodo a una tasa inferior a la que experimenta el generado localmente, teniendo de esta forma en la mayoría de los casos un dominio en la caracterización del estado de mar, lo que también sustenta la escasa e irregular variación de la dispersión del periodo en ambas fases.

De esta manera, la interacción de las influencias de ENOS en ambas fuentes de generación permite explicar satisfactoriamente cada una de las variaciones de los parámetros de oleaje observados en los resultados, en la medida que se puedan fundamentar los supuestos expuestos relativos a la dinámica del anticiclón y las depresiones.

Conocido que las fases de ENOS afectan de manera desigual un mismo parámetro, y que aún cuando una distribución desigual de los índices en fase positiva y negativa pudiera compensar esta desigualdad en la influencia de ENOS en el parámetro, el hecho de que en un parámetro una de las fases influya más que la otra, y en otro parámetro ocurre de manera opuesta; implica que necesariamente uno de los parámetros no tendrá una influencia simétrica de ENOS respecto de la media, lo que en sí mismo es una dificultad considerando que el supuesto de la inclusión de las variaciones respecto a un valor medio implica que este valor sea el correspondiente al fenómeno en la fase normal de ENOS. Así, resulta importante cuestionar si en efecto las influencias a lo largo de la estadística son simétricas respecto a la media para todos los parámetros, ya que los que no cumplan esta condición ofrecen un valor medio del parámetro en la estadística con un sesgo por efecto de la influencia de ENOS. Y la manera más sencilla de cuantificar este efecto es realizando el promedio de todas las influencias de ENOS en el parámetro de oleaje a lo largo de la estadística.

Los resultados de dicho cálculo (presentados en la Tabla 14), demuestran que efectivamente el oleaje experimenta una influencia asimétrica en el tiempo por parte de ENOS presentando variaciones que llegan al 7.72% del rango de valores de un parámetro (desviación estándar del periodo medio en el nodo 35°S) y que en general presenta una variación latitudinal consecuente principalmente en el promedio mensual, lo que da cuenta de la relevancia de considerar la obtención de la condición del oleaje estacionario, que es aquel presente en fase normal de ENOS y del calentamiento global.

5.1.5 APLICACIÓN DEL ESTUDIO DE OLAJE NO ESTACIONARIO

El desarrollo de un ejercicio para la estimación de las influencias conjuntas de ENOS y del Calentamiento Global en el oleaje permite analizar la condición media del oleaje en un futuro próximo

El horizonte considerado se debe a que gran parte de los proyectos desarrollados en el ámbito marítimo tienen vida útil de 25 a 50 años, por lo que en uno y otro caso, la proyección responderá a la condición de oleaje presentada al término o medianía del proyecto respectivamente. Además, dado que la proyección como tendencia lineal empleada para el oleaje es una aproximación simplificada y que se desconoce el comportamiento final del Calentamiento Global, la validez de los resultados se restringe en horizontes muy extensos.

En el caso de las condiciones de ENOS consideradas, de la Figura 37 se observa que las condiciones extremas alcanzadas por el índice ENOS en los 60 años de extensión es cercano a 3 y -2.5 en las fases cálida y fría respectivamente, mientras que la estimación de la condición futura del oleaje sin influencias de ENOS, corresponde precisamente a ENOS en condición Normal.

Dado que por el constante estudio de ENOS se generan pronósticos del comportamiento del fenómeno con 6 meses de antelación (NOAA 2010), es posible revisar junto a la proyección por Calentamiento Global la caracterización del oleaje con una antelación de 6 meses, constituyendo este estudio un mecanismo de previsión y planificación de medidas tendientes a optimizar las operaciones y disminuir los riesgos asociados a las variaciones en las condiciones medias del oleaje.

En esto, la caracterización de la condición estacionaria permite contar con la condición base sobre la cual se aplicarán las influencias de ENOS y del Calentamiento Global a partir de las proyecciones de estos realizadas por los organismos competentes, dado que esta condición supone el oleaje en las condiciones normal y neutra de los mismos. Puesto que, del desarrollo metodológico, las series son destendenciadas a partir de la variación anual obtenida (se asegura condición neutra del Calentamiento Global), solo resta asegurar la obtención del parámetro en la condición normal de ENOS, para lo cual se ha resuelto estimar la media de la influencia de ENOS en los parámetros (Δ_{ENOS}), el cual corresponde a la diferencia de la condición media observada con la presente en la condición normal de ENOS. Característicamente, tanto para el promedio como para la desviación estándar, este fenómeno tiene una influencia en la serie que tiende a aumentar la altura y a disminuir el periodo, mientras que en el caso de la dirección, los valores aumentan en los nodos 31°S y 35°S, mientras que disminuyen en los nodos 37°S y 39°S. La resta de estos valores sobre la condición media observada de la estadística permite obtener la condición estacionaria que asegure la normalidad y neutralidad de los fenómenos.

Fenómeno	Promedio Mensual					Desviación Estándar Mensual				
	Hs[m]	Tp [s]	Tm [s]	Dirp [°]	Dirm [°]	Hs[m]	Tp [s]	Tm [s]	Dirp [°]	Dirm [°]
Calentamiento Global	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↓
Niño	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↑	↑
Niña	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

Figura 61. Influencia general de ENOS y Calentamiento Global en el oleaje.
(Elaboración propia)

Considerando los resultados expuestos en los capítulos 4.1 y 4.2, el análisis de las influencias por separado permite caracterizar los modos en que ambos fenómenos afectan al oleaje, los cuales han sido resumidos de manera genérica en la Figura 61. En esto, la influencia del Calentamiento

Global induce un incremento en la magnitud de la altura significativa y el periodo *peak* en el caso del promedio mensual y en la altura y los periodos en la desviación estándar mensual, mientras que se generan disminuciones de magnitud en todas las direcciones, siendo estas muy bajas en el caso de la desviación estándar de la dirección media. Para el caso del promedio mensual del periodo medio se presentan tanto incrementos como disminuciones de baja magnitud en latitud. En el caso de la fase cálida de ENOS (Niño), se producen incrementos en los valores de todos los parámetros, salvo en la desviación estándar de los periodos que se producen tanto incrementos como disminuciones en latitud, y de baja magnitud en algunos nodos de la desviación estándar de la altura y del promedio del periodo *peak*. Finalmente en el caso de la fase fría de ENOS (Niña), se producen disminuciones de los valores de todos los parámetros del promedio, salvo la altura significativa, en la que se producen incrementos, mientras que para todos los parámetros de la desviación estándar se observan tanto incrementos como disminuciones de baja magnitud en latitud.

Proporcionalmente, la relevancia de la influencia de un fenómeno sobre otro dependerá del caso que se analice, donde las influencias del Calentamiento Global dependen del horizonte en años y las influencias de ENOS del valor del índice que se considere.

Para los casos evaluados en el capítulo 4.3 se tiene que en general la proyección de 25 años induce mayores variaciones que las condiciones extremas de ENOS en la desviación estándar de la altura y de los periodos, mientras que en el promedio de las direcciones y la desviación estándar de la dirección *peak* presenta variaciones de similar magnitud, pero de signo opuesto a la condición Niño extremo. Para la desviación estándar de la dirección media, las mayores variaciones son producidas por la condición Niño extremo y en el promedio los periodos predominan las variaciones de la condición Niña extrema. Por último, el promedio de la altura posee variaciones similares entre las tres condiciones propuestas.

Como es de esperar, las variaciones inducidas por las condiciones extremas de ENOS en ciertos casos se potencian con las inducidas por el Calentamiento Global mientras que en otras tienden a suprimirse. Con todo, la interacción de las influencias de ambos fenómenos plantea un escenario distinto al actual respecto a las condiciones de oleaje, lo que invita (y obliga) a generar una revisión aún más detallada que la planteada en el presente estudio, en vista del desempeño de las obras y proyectos existentes y futuras.

Dado que las variaciones por Calentamiento Global implican una transformación constante de las condiciones de oleaje, los incrementos en la altura y periodo tanto en su valor medio como en su desviación estándar (asociado a la dispersión) implican una condición de oleaje cada vez más energética, que influirá en actividades y fenómenos como la operación de terminales marítimos, el transporte sedimentario costero (influencia en playas), sobrepaso de estructuras de protección, etc. Esto en general implica un incremento en la vulnerabilidad y riesgo de cada proyecto marítimo. Por otro lado, la disminución en la dirección de incidencia y en su dispersión implican una direccionalidad cada vez más tangencial a la costa de Chile, que se traduce en una disminución de la energía del oleaje en la costa por efectos de propagación. Esto puede mejorar las condiciones de abrigo de las zonas protegidas al SW (compensando el incremento energético del oleaje), pero puede aumentar el transporte costero (potenciado con el incremento energético).

Estos efectos pueden verse potenciados o atenuados dependiendo de la condición de ENOS presente en un determinado periodo, ya que en el caso de presentarse un evento Niño se intensificarán la altura y el periodo en su valor medio y dispersión (implicando aumento de la energía), mientras que la dirección tenderá a aumentar su magnitud y dispersión, presentándose en general una condición más desfavorable. En el caso de presentarse un evento Niña, se producirá un aumento de la altura pero una disminución del periodo (lo que puede no generar diferencias sustanciales en la energía del oleaje), mientras que la dirección de incidencia tenderá al sur sin efecto en la dispersión direccional.

Finalmente, dado que los resultados determinados por la metodología del Estudio No Estacionario de Clima Medio de Oleaje en la Costa Central de Chile se encuentran satisfactoriamente descritos

por las influencias de ENOS y del Calentamiento Global en el campo de vientos, y que a partir de esto las proyecciones estimadas dan cuenta de la situación futura a presentarse en esta zona del país, se puede considerar el diagrama de resultados del estudio no estacionario de clima medio de oleaje en la costa central de Chile descrito en la Figura 62 como válido.

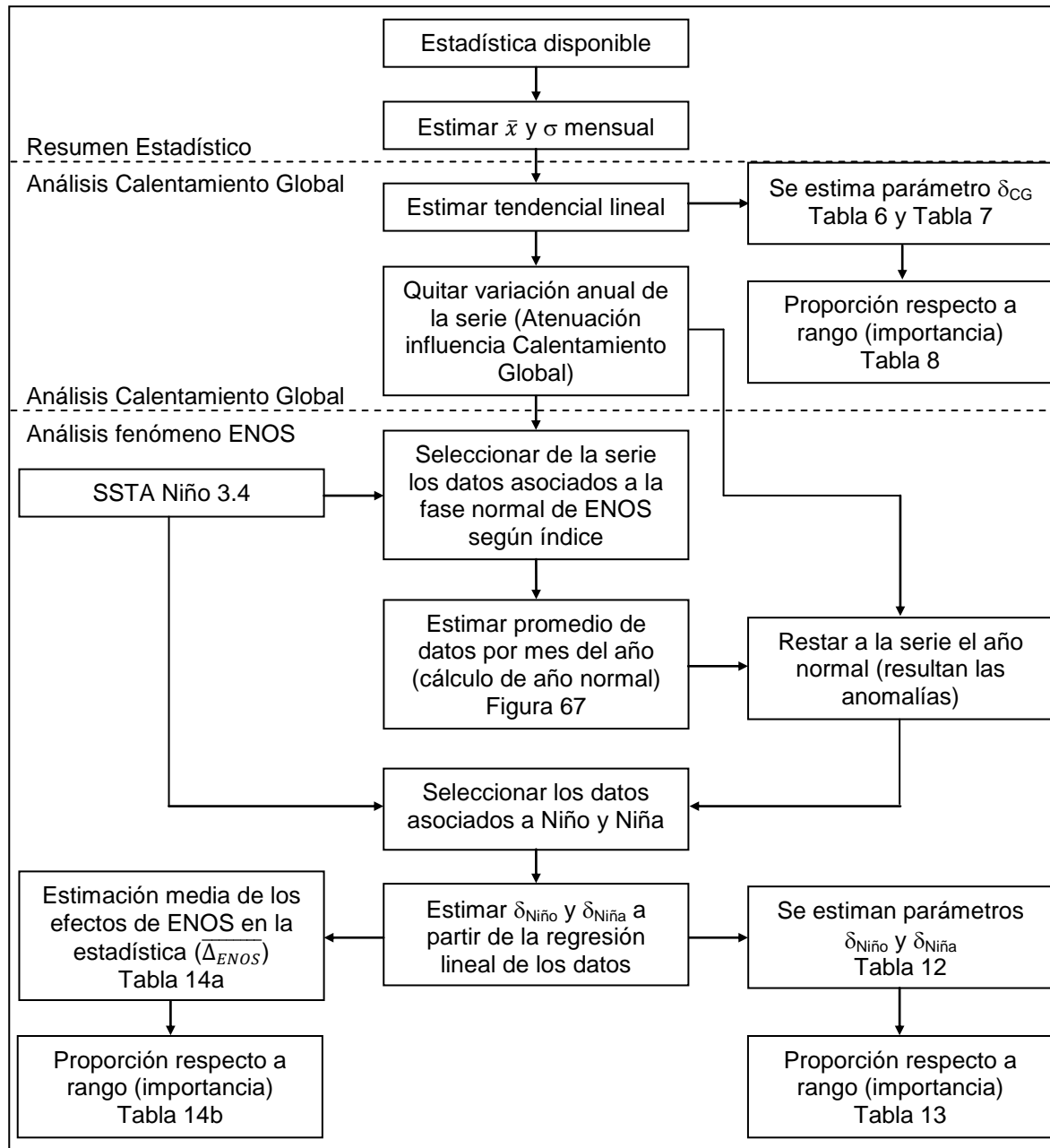


Figura 62. Diagrama de resultados del estudio no estacionario de clima medio de oleaje en la costa central de Chile.

5.2 DISCUSIÓN ASPECTOS METODOLÓGICOS

5.2.1 DEPENDENCIA ENOS - CALENTAMIENTO GLOBAL Y LA VALIDEZ DEL MODELO ADITIVO

La fortaleza del modelo aditivo radica en la capacidad (o posibilidad) de tratar las influencias de ENOS y del Calentamiento Global en el oleaje de manera independiente. No obstante, esta condición no es una afirmación respecto de la independencia entre ambos fenómenos. Por el contrario, puede ser que ambos fenómenos en efecto sean dependientes (dado que funcionan o se desarrollan en virtud del calor o la cantidad de energía presente en parte o todo el planeta), pero esto no implica necesariamente que el grado de influencia de uno en el oleaje dependa de la intensidad alcanzada por el otro.

En este sentido, si el Calentamiento Global influye en ENOS modificando su frecuencia y/o intensidad, no implicando ello una variación de la influencia de este en el oleaje a partir de la relación del valor del índice y la variación del parámetro, entonces el modelo aditivo sigue siendo válido al igual que las metodologías para la identificación de las influencias de los fenómenos en el oleaje.

Por el contrario, de ser afectada la influencia de ENOS en el oleaje por el valor alcanzado por el índice del Calentamiento Global, se configuraría un modelo multiplicativo, invalidándose las metodologías planteadas en este trabajo.

Con todo, mientras el grado de dependencia de las influencias de los fenómenos en el oleaje pueda despreciarse, se puede considerar el modelo aditivo como válido, y puede ampliarse su representatividad al incorporar las influencias asociadas a las estacionalidades, que no se consideraron en este estudio para efectos de simplificación de cálculo.

5.2.2 ACERCA DE LOS ESTADÍGRAFOS QUE SE EMPLEAN

La comparación entre los fenómenos y el oleaje debe desarrollarse en la misma escala temporal para evitar diferencias en los criterios, por lo que se deben obtener índices mensuales que describan el oleaje. Por otro lado, la necesaria verificación de la condición estacionaria sugiere la utilización del promedio y la desviación estándar (en representación de la varianza), donde se deben comparar las obtenidas para toda la estadística con las determinadas en ventanas de tiempo inferiores.

Así, al comparar los valores de los promedios y desviaciones estándar para toda la estadística calculados a partir de la serie original y la de estadígrafos mensuales presentados en la Tabla 2 y Tabla 6 respectivamente, se observa que el promedio es prácticamente el mismo, mientras que en general la desviación estándar total calculada de los valores mensuales está subestimada respecto a la estimada de la estadística original. Esto es consecuente si se considera que matemáticamente la formulación del promedio es fácilmente simplificable cuando se considera el promedio de los promedios (solo se requiere asumir que los meses tienen 30 días, implicando un error aceptable), mientras que en la desviación estándar, la raíz del promedio de las diferencias al cuadrado de cada término respecto a la media está fuertemente influenciada por valores extremos, por lo que un promedio de las desviaciones estándar atenúa aquellos meses más dispersos en consideración que la función la acentúa.

Además de lo anterior, si se pone atención a la representatividad de los estadígrafos respecto al comportamiento de la estadística mensual, en este trabajo se ha empleado al promedio como indicador del comportamiento del oleaje en el mes, mientras que la desviación estándar viene a tratar de cubrir de alguna manera la descripción de la cantidad y característica de los datos en torno al valor principal del mes. Sin embargo, al considerar que el oleaje tiene distintos comportamientos dependiendo del parámetro que se analiza, es posible que el promedio de la estadística no sea el que mejor representa el comportamiento del oleaje. Si se observa la Figura 21

del capítulo 3.2.2, se observa que en general la estadística de los parámetros se presenta asimétrica respecto al valor central, destacando de ellos la dirección *peak*, donde se observa que en general proviene desde el tercer cuadrante en torno al SW pero que en ocasiones cambia cerca de 90° para provenir del cuarto cuadrante. Por el contrario, en el otro sentido la dirección *peak* no pasa del sur (por la configuración geográfica), por lo que este comportamiento supone una distribución de los datos distinta a la distribución normal, produciendo una diferencia entre la media y (por ejemplo) la mediana de la estadística.

Resultaría conveniente explorar otros estadígrafos que no se encuentren influenciados por los valores extremos como en el caso de la media y que sean fieles representantes de la distribución de la estadística. Algunos candidatos son la mediana, correspondiente al valor central de la estadística ordenada de mayor a menor, que es de fácil cálculo y no sensible a valores extremos, otros un tanto más elaborados como la media geométrica (multiplicación de todos los datos aplicándole raíz con índice del número de datos) o la media armónica (total de datos dividido en la suma de la inversa de cada dato) que tienen por ventaja ser poco sensibles a valores extremos, pero por desventaja ser inoperantes con valores cercanos a cero (no es el caso del oleaje), de cálculo más complejo y de significado estadístico menos intuitivo (Pliego 2000).

5.2.3 PERFECCIONAMIENTO Y USOS FUTUROS DE LA METODOLOGÍA

Se debe entender que este trabajo constituye la primera etapa de un macro-proyecto amparado en los resultados conseguidos hasta ahora, ya que la confirmación de la existencia de influencias por parte de ENOS y del Calentamiento Global en el oleaje sienta un precedente relevante que invita a continuar desarrollando investigaciones que apunten a mejorar las proyecciones y reducir las incertidumbres.

Las etapas posteriores debieran considerar la incorporación de información espectral, análisis de estacionalidades, clima extremo, influencias en aguas someras e interiores y análisis de *hindcasting* de clima mensual de oleaje incorporando estadística histórica de ENOS y del Calentamiento Global, lo que permitirá mejorar los pronósticos, la representatividad espacial y temporal, y por sobre todo la comprensión de un fenómeno tan relevante para la ingeniería oceánica como lo es el oleaje.

6 **CONCLUSIONES**

Del estudio surgen las siguientes conclusiones.

Relativo a la importancia de este estudio se concluye:

1. De la recopilación de antecedentes se encuentra que este trabajo es único en cuanto al esfuerzo de caracterizar el oleaje a partir de una visión no estacionaria, uno de los pocos que apuntan a caracterizar el clima de oleaje en la costa central de Chile y, único a nivel nacional y contemporáneo a los esfuerzos de otros países e instituciones en cuanto a la caracterización de las influencias de ENOS y del Calentamiento Global en el oleaje.
2. Se aportan evidencias que confirman que tanto ENOS como el Calentamiento Global influyen los parámetros de oleaje de manera significativa.
3. El estudio no estacionario de clima medio de oleaje permite obtener la caracterización del oleaje bajo distintos escenarios y con previsión de 6 meses a partir de las proyecciones de ENOS por organismos internacionales.

Relativo al oleaje en la costa central de Chile, se concluye:

4. El oleaje característico de la zona central de Chile se compone en orden de importancia del swell SW (generado en el frente polar antártico), sea (generado en la interacción de las depresiones con el anticiclón semi permanente del Pacífico sur) y swell NW (generado en el frente polar ártico).
5. Los valores típicos que presenta son de 2 [m] a 3 [m] de altura significativa, 12 [s] a 14 [s] de periodo peak, 8 [s] a 10 [s] de periodo medio, 213.75° a 236.25° (SW) de dirección peak y dirección media.
6. Latitudinalmente hacia el sur la altura de ola es mayor y la dirección tiende al W, mientras que hacia el norte la dirección tiende al S. Los periodos presentan poca variación entre nodos.
7. En cuanto a la similitud latitudinal de las series por parámetros, la correlación estimada aumenta hacia el sur y disminuye en la medida que se distancian los nodos. Para todos los parámetros, la mejor correlación se presenta entre los nodos 37°S y 39°S (llegando a 0.96 en la dirección media), seguida de la existente entre el nodo 31°S y 35°S. Las peores se presentan entre los nodos 37°S y 39°S, 31°S y 37°S, y 35°S y 39°S.
8. Las condiciones máximas presentan alturas de ola de 5 [m] a 9 [m], con periodos peak de 8 [s] a 16 [s] y periodos medios de 8 [s] a 10 [s], mientras que las direcciones peak y media presentan valores entre las marcas de clase SW y NW.

Relativo a la Influencia del Calentamiento Global en el oleaje, se concluye:

9. Las influencias del Calentamiento Global en el oleaje son determinadas a partir de la estimación de la tendencia lineal de la serie, obteniendo variaciones anuales por parámetro.
10. En general las influencias del Calentamiento Global en el oleaje consisten en incrementos del promedio y desviación estándar de la altura significativa y periodo peak, mientras que se producen disminuciones en los mismos parámetros de las direcciones. En el caso del periodo medio, se presentan tanto incrementos como disminuciones en el valor medio y solo incrementos en la desviación estándar.
11. En general la magnitud de las variaciones por parámetro no se encuentran relacionadas con la latitud.
12. Para el promedio mensual, las variaciones anuales van en la altura significativa de 0.006 [m] a 0.003 [m], en el periodo peak de 0.008 [s] a 0.020 [s], en el periodo medio de -0.004 [s] a 0.012 [s], en la dirección peak de -0.492° y -0.629° y en la dirección media de -0.121° a -0.327°.

13. Para la desviación estándar mensual, las variaciones anuales van en la altura significativa de 0.003 [m] a 0.008 [m], en el periodo peak de 0.016 [s] a 0.028 [s], en el periodo medio de 0.006 [s] a 0.009 [s], en la dirección peak de -0.239° a -0.277° y en la dirección media de 0° y -0.034° .
14. Las variaciones de la magnitud de un parámetro en la extensión de la estadística (22 años) no representan más del 22% del rango de valores de la serie mensual (diferencia entre el valor máximo y mínimo), siendo los parámetros de dirección peak (de 16.4% a 20.1%) y desviación estándar del periodo peak (de 13.6% a 21.3%) los que presentan las mayores proporciones, mientras que el periodo medio (menores a 7.6%) y la desviación estándar de la dirección media (menores a 2.2%) son las que representan las menores proporciones. Los restantes parámetros fluctúan entre 3.3% y 15.9%.
15. Las variaciones en los parámetros del oleaje pueden ser explicadas por las influencias del Calentamiento Global en los patrones del viento.

Relativo a la selección de índice ENOS, se concluye:

16. El índice SSTA Niño 3.4 fue de los índices considerados el que presentó la mayor correlación promedio con la estadística de oleaje (0.129), presentándose las mejores correlaciones promedio en los promedios mensuales de la dirección *peak*, dirección media y periodo medio (0.19, 0.19 y 0.18 respectivamente) y en la desviación estándar de la dirección peak (0.17). Para todos los parámetros destacan el nodo 35°S (0.17) y los promedios mensuales (0.16).

Relativo a la Influencia de ENOS en el oleaje, se concluye:

17. Respecto a la determinación del año normal según ENOS por parámetro, el 50.8% de los meses con estadística cumplen con esta condición, por lo que se utilizan el 49.2% de manera directa para la determinación de las influencias de ENOS en el oleaje.
18. En general la condición Niño induce en el oleaje incremento en el valor de todos los parámetros considerados salvo en la desviación estándar de los periodos, donde se producen tanto incrementos como disminuciones.
19. La condición Niña, induce disminuciones en los promedios mensuales de los periodos y direcciones, y aumentos en la altura significativa, mientras que para las desviaciones estándar, en todos los parámetros se producen tanto incrementos como disminuciones.
20. Por parámetro, en general tienen distinta sensibilidad a las fases de ENOS al presentarse variaciones por unidad de índice distintas entre condición Niño y Niña.
21. En general la magnitud de las variaciones por parámetro no se encuentran relacionadas con la latitud.
22. Las variaciones por unidad del índice SSTA Niño 3.4 para el promedio mensual, en la condición Niño van en la altura significativa de 0.056 [m] a 0.077 [m], en el periodo peak de 0.009 [s] a 0.137 [s], en el periodo medio de 0.061 [s] a 0.231 [s], en la dirección peak de 3.145° a 5.999° y en la dirección media de 2.497° a 4.641° ; mientras que en la condición Niña van en la altura significativa de -0.032 [m] a -0.133 [m], en el periodo peak de 0.198 [s] a 0.294 [s], en el periodo medio de 0.244 [s] a 0.406 [s], en la dirección peak de 2.642° a 3.239° y en la dirección media de 1.995° a 2.931° .
23. Las variaciones por unidad del índice SSTA Niño 3.4 para la desviación estándar mensual, en la condición Niño van en la altura significativa de 0.001 [m] a 0.055 [m], en el periodo peak de -0.005 [s] a 0.043 [s], en el periodo medio de -0.031 [s] a 0.019 [s], en la dirección peak de 2.073° a 4.631° y en la dirección media de 0.854° a 3.019° ; mientras que en la condición Niña van en la altura significativa de -0.065 [m] a 0.007 [m], en el periodo peak de -0.059 [s] a 0.142 [s], en el periodo medio de -0.022 [s] a 0.110 [s], en la dirección peak de -0.434° a 4.155° y en la dirección media de -0.232° a 0.724° .

24. Las variaciones por unidad de índice representan del rango de valores de las series mensuales respectivas típicamente entre el 4% y 9%, con 10.76% como máximo en la condición Niño, mientras que en la condición Niña representan típicamente entre el 5% y 10%, con 11.96% como máximo.
25. Los valores máximos del índice SSTA Niño 3.4 en los 60 años de estadística disponible son cercanos a 3 y -2.5, por lo que las variaciones por condiciones extremas de ENOS son 2.5 veces las variaciones por unidad de índice en la condición Niño y 2 veces en la condición Niña, llegando a representar como máximo el 26.90% y el 23.92% del rango del parámetro correspondiente respectivamente.
26. La media de la estadística de oleaje bajo la influencia exclusiva de ENOS no equivale a la condición media de oleaje bajo la condición normal de ENOS, dado que las influencias totales del mismo sobre el oleaje no son simétricas en la longitud estadística, resultando la media de los efectos de ENOS en la estadística ($\overline{\Delta_{ENOS}}$) distinto de cero.
27. La media de los efectos de ENOS en la estadística para el promedio mensual va en la altura significativa de 0.044 [m] a 0.067 [m], en el periodo peak de -0.044 [s] a -0.120 [s], en el periodo medio de -0.035 [s] a -0.088 [s], en la dirección peak de -0.705° a 1.565° y en la dirección media de -0.185° a 1.278°; mientras que para la desviación estándar mensual va en la altura significativa de -0.004 [m] a 0.051 [m], en el periodo peak de -0.117 [s] a -0.023 [s], en el periodo medio de -0.100 [s] a 0.012 [s], en la dirección peak de -1.179° a 2.817° y en la dirección media de -0.081° a 1.697°.
28. La media de los efectos de ENOS en la estadística representa a lo sumo el 7.72% del rango de datos del parámetro correspondiente, teniendo en general proporciones entre 2% y 4%.
29. Las variaciones en los parámetros del oleaje pueden ser explicadas por las influencias de ENOS en los patrones del viento.

Relativo al pronóstico de clima medio de oleaje con el estudio no estacionario, se concluye:

30. Los escenarios de proyección de 25 años a contar del término de la estadística bajo las condiciones Niño extremo (con valor de índice SSTA Niño 3.4 = 3), normal y Niña extrema (con valor de índice SSTA Niño 3.4 = -2.5) son suficientes para caracterizar el clima medio esperable en futuro medio y sus rangos posibles.
31. La condición estacionaria del oleaje presenta en general un comportamiento latitudinal similar al obtenido de la media de la estadística, con disminuciones del valor del parámetro en todas las latitudes del promedio de la altura y aumentos en todos los periodos; teniendo los restantes parámetros, comportamientos desiguales en latitud.
32. El escenario de 25 años con fase Normal de ENOS presenta un incremento generalizado de la altura y el periodo y una disminución de la dirección, tanto en el promedio como en la desviación estándar, para todos los nodos respecto a la condición estacionaria; salvo en la desviación estándar de la dirección media, donde la disminución es marginal.
33. El escenario de 25 años con fase Niño extremo de ENOS (SSTA Niño 3.4 = 3) presenta en general magnitudes superiores a los presentes en el escenario en condición normal de ENOS, por ende, las variaciones de este escenario respecto a la condición estacionaria son de mayor valor en el caso de la altura y el periodo, mientras que en las direcciones las disminuciones son menores.
34. El escenario de 25 años con fase Niña extremo de ENOS (SSTA Niño 3.4 = -2.5) presenta valores del promedio mensual de los periodos y direcciones menores a los presentados en los otros dos escenarios, mientras que la altura significativa es en general de valor similar a los presentados bajo la proyección con Niño extremo, al igual que en la desviación estándar de los periodos. Por el contrario, la desviación estándar de la altura significativa y las direcciones tienen valía similar a la de la proyección con fase normal de ENOS.

35. Los escenarios propuestos presentan variaciones respecto a la condición estacionaria en general en torno a 20% con máximo de 45% respecto al rango de valores del parámetro respectivo.
36. Para los tres escenarios y la condición estacionaria, por parámetro, se tiene en la altura significativa que los valores del escenario normal de ENOS son siempre menores a los escenarios de ENOS extremos en el valor medio y los extremos de la banda $\pm 1 \sigma$, mientras que los valores de la condición estacionaria son siempre los menores en el valor medio y el límite superior, mientras que el inferior depende del nodo que se analice.
37. Para los periodos y direcciones, la proyección en la condición normal de ENOS es siempre mayor y menor respectivamente en su valor medio que en la condición estacionaria a excepción del periodo medio en el nodo 31°S y 35°S, mientras que siempre el valor medio en la condición Niña y Niño es menor y mayor respectivamente que en la condición normal, dando cuenta además que siempre los límites superior e inferior de las bandas de $\pm 1 \sigma$ tienen un orden de menor a mayor de la fase fría a la cálida.
38. Individualmente, en el periodo peak la banda $\pm 1 \sigma$ es significativamente mayor en todas las condiciones proyectadas a la de la condición estacionaria, mientras que en el periodo medio presentan una relativa uniformidad en latitud y fase de ENOS.
39. En el caso de la dirección, destaca para el parámetro peak la alta influencia de la fase cálida en el incremento del promedio y dispersión del parámetro, a la vez que la fase fría induce una reducción, salvo en la dispersión de los nodos 31°S y 35°S, que se mantiene relativamente invariable. En cuando a la dirección media, a la influencia de ENOS en el promedio destacada en el parámetro peak se suma la similitud de la dispersión direccional en las fases de ENOS hacia el sur, pero que hacia el norte se reduce salvo en la fase cálida.

Relativo al estudio no estacionario de clima medio de oleaje, se concluye:

40. La estadística de oleaje no cumple la condición estacionaria porque el promedio y la desviación estándar en distintas ventanas anuales y mensuales no son iguales al promedio y desviación estándar de toda la serie, evidenciando su condición no estacionaria.
41. Las variaciones del oleaje están relacionadas con los fenómenos ENOS y Calentamiento Global debido a que estos influyen las condiciones de viento en las zonas de generación del oleaje.
42. El estudio no estacionario de clima medio de oleaje permite obtener estimaciones mensuales a partir de los índices de ENOS y de las proyecciones del Calentamiento Global, que permiten obtener pronósticos con algunos meses de antelación y planificación de medidas de contingencia y mitigación de los proyectos en curso.
43. El estudio no estacionario de clima medio de oleaje en la costa central de Chile permite elevar el nivel de comprensión del oleaje.

7 RECOMENDACIONES

A raíz de este estudio surgen una serie de recomendaciones que apuntan a mejorar el desarrollo de distintos aspectos que fueron simplificados para obtener esta primera aproximación. Se señalan a continuación actividades que apuntan a ratificar los resultados, a aumentar su precisión y a expandir la validez y utilidad de este estudio tanto en el oleaje como en otros fenómenos:

1. Generar un plan de medición de oleaje en aguas profundas en distintos puntos de la costa de Chile. Más allá de la utilidad que esto daría a la verificación de los resultados este estudio (realizado con estadística de Hindcasting), Chile requiere de una red de monitoreo del oleaje que permita contar, por un lado, con estadística extensa temporal y espacialmente que ayude a mejorar la comprensión del fenómeno y con ello a optimizar las distintas actividades que se realicen en las costas del país, y por otro, a implementar un sistema de monitoreo en tiempo real que, entre otras cosas, permita alertar con mayor precisión de tiempo y magnitud la ocurrencia de marejadas y de condiciones benévolas. Como alternativa (o complemento), realizar un plan de instrumentación en aguas someras, dentro de los que se pueden aprovechar los muelles de penetración, sifones de captación, u otras estructuras permanentes en bajas profundidades en el mar.
2. Realizar estudios en fuentes primarias de información cualitativa como bitácoras de capitanías de puerto, faros, etc., que permitan tener una noción de las características del oleaje en años y lugares en los que no se dispone de información, o bien para contrastar o complementar con las mediciones existentes. Esto permite corroborar los resultados obtenidos por el estudio en cuanto a las variaciones de los parámetros por efectos de ENOS y del Calentamiento Global.
3. Replicar el estudio con información espectral de oleaje, dado que tiene mayor precisión en cuanto a la descripción del estado de mar, un estudio de oleaje con información espectral permitiría describir el comportamiento del oleaje por los tipos que llegan a Chile de manera independiente, a saber, *swell* SW, *swell* NW y *sea*, y así mejorar los pronósticos generales.
4. Incluir al estudio los efectos de las estacionalidades. Las variaciones cíclicas gobernadas por la dinámica de los cuerpos celestes dan una mejor aproximación al comportamiento del fenómeno, ya que de una serie desestacionalizada es más fácil identificar las no estacionariedades que se presentan en la serie residual, lo que facilita y mejora la estimación de las influencias de ENOS y el Calentamiento Global en el oleaje. En esto hay que señalar, que ciertos ciclos no se manifestarán en una serie que se encuentra espacialmente distante de la zona de generación, ya que, por ejemplo, las variaciones impuestas por el día y la noche (que sí se manifestarían en la zona de generación) se perderían en la serie por los efectos de la propagación del oleaje. Así, es recomendable evaluar aquellos ciclos con periodo superior al tiempo que demora el oleaje en llegar desde la zona de generación hasta el punto de medición.
5. Para identificar las influencias de ENOS en el oleaje, se recomienda explorar otros índices que tengan una descripción más generalizada del fenómeno que los utilizados en el presente estudio como el multivariado MEI (USGS 2005). También, se recomienda utilizar los índices semanales de ENOS (NOAA 2010), los que permitirán además tener una mejor aproximación con el clima extremo.
6. Analizar estadística *hindcasting* de vientos en distintos puntos del Pacífico (pertinentes a las costas de Chile), ya que estos son útiles para las zonas interiores con oleaje *sea*.
7. Por último, se recomienda revisar es el análisis no estacionario de clima extremo de oleaje, el cual fue desechado de este estudio por poseer una caracterización temporal inferior a la poseen los fenómenos ENOS y Calentamiento Global. Sin embargo, es posible realizar una comparación en términos de la cantidad de eventos extremos asociados al índice de ENOS del mes correspondiente o bien su evolución en los años para el Calentamiento Global. Este estudio es relevante, ya que condiciona el diseño estructural en las obras marítimas.

8 REFERENCIAS

Avaria S., J. Carrasco, J. Rutllant y E. Yáñez. 2004 (eds). *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus Efectos en Chile*. CONA, Chile. Disponible en web <http://www.cona.cl/libroelnino/lenol.htm> (fecha visita: marzo 2011). 265pp.

Contreras M. 2001. *Introducción al análisis de series de tiempo para Oceanografía y Geo-ciencias*. Estudios y documentos, N° 15/01, Universidad Católica de Valparaíso, Chile. 141pp.

Fuenzalida H. 1983. *La Atmósfera Inconstante, Circulación general de la atmósfera. Fasciculos para la comprensión de la ciencia, las humanidades y la tecnología*, vol 47, Consejo de rectores de las universidades chilenas. 107pp.

Garreaud R. y M. Falvey. 2008. *The coastal wind of western subtropical South America in future climate scenarios*. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.1716

Glantz, M. 1998. *Corrientes de Cambio: El impacto de "El Niño" sobre el Clima y la Sociedad*. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. 141pp.

Goda Y. 2000. *Random seas and design of maritime structures*. *Advances series on ocean engineering*, vol 15, World Scientific Publishing Co. 443pp

Greenpeace. 2010. *Cambio Climático: Futuro Negro para los Glaciares*. Campaña clima Diciembre 2010, disponible en web <http://www.greenpeace.org/raw/content/argentina/cambio-climatico/cambio-climatico-futuro-negro-3.pdf> (fecha visita: marzo 2011). 34p.

Holthuijsen L. H. 2007. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press. 387pp.

Houghton J. 1992. *Física de Atmósferas Planetarias*. Instituto Nacional de Meteorología, España. 270pp.

IPCC. 2007. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, disponible en web http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf (fecha visita: marzo 2011). 104pp.

Liu Z. y P. Frigaard. 2001. *Generation and analysis of random waves*. Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning, Instituttet for Vand, Jord og Miljøteknik, Aalborg Universitet. 76pp.

NASA. 2010. *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP)*, National Aeronautics and Space Administration, disponible en web <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/> (fecha visita: marzo 2011)

NOAA. 2010. *Monthly atmospheric & SST índices*, National Oceanic and Atmospheric Administration, disponible en web <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/> (fecha visita: marzo 2011).

NSIDC. 2011. *Sea Ice Index*, National Snow and Ice Data Center: disponible en web http://nsidc.org/data/seaice_index/index.html (fecha visita: marzo 2011).

OCEANOR. 2008a. *Calibration of Wave Spectra in Two Locations off the Chilean Coast. Informe de calibración presentado por Fugro OCEANOR a HydroChile S.A..* 25pp.

OCEANOR. 2008b. *Offshore directional wave data in 6 locations off Chile. Informe de cotización presentado por Fugro OCEANOR a HydroChile S.A..* 32pp.

Ochi M. 1998. *Ocean Waves. Ocean technology series, N° 6, Cambridge.* 319pp.

Parzen E. 1999. *Stochastic Processes. Classics, in applied Mathematics, vol 24.* 324pp.

Pliego F. J. 2000. *Introducción a la Estadística económica y empresarial, teoría y práctica. Editorial AC, Madrid.* 600pp.

Schneider H. SF. *Tipos de tiempo de Chile Central, Contribución a la enseñanza. Instituto Central de Geografía, Universidad de Concepción, Chile.* 17pp.

SHOA. 2005. *Publicación N° 3201, Instrucciones oceanográficas N° 1: Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, disponible en web <http://www.shoa.cl/servicios/descargas/pdf/pub3202.pdf> (fecha visita: marzo 2011).* 23pp.

Silva R. 2005. *Análisis y descripción estadística de oleaje. Serie de docencia SD/49, Instituto de ingeniería UNAM, Universidad Nacional Autónoma de México, disponible en web previa inscripción <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/Buscarnpublicacion.aspx> (fecha visita: marzo 2011).* 179pp.

Stewart R. 2006: *Introduction to Physical Oceanography. Department of Oceanography, Texas A & M University.* 344pp.

Svendsen, I. A. 2006. *Introduction to nearshore hydrodynamics. Advances series on ocean engineering, vol 24, World Scientific Publishing Co.* 722pp

Trenberth K., J. Fasullo, J. Kiehl. 2008. *Earth's global energy budget. American Meteorological Society, DOI: 10.1175/2008BAMS2634.1.*

UNICAN. 2000. *Documento de referencia, volumen 1: Dinámicas. Universidad de Cantabria, España.* 580pp

UNFCCC. 2004. *Cambio Climático, Carpeta de Información. Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, disponible en web http://unfccc.int/resource/docs/publications/infokit_2004_sp.pdf: (fecha visita marzo 2011).* 65pp.

USGS. 2005. *Spatial and Temporal Variations in Oceanographic and Meteorologic Forcing Along the Central California Coast, 1980–2002: Scientific Investigations Report 2005–5085. U.S. Geological Survey, disponible en web <http://pubs.usgs.gov/sir/2005/5085/> (fecha visita: marzo 2011).* 45pp.

Werlinger C. 2004, (ed). *Biología marina y oceanografía: Conceptos y procesos, tomo 1. Consejo Nacional del libro y la lectura – Universidad de Concepción, Chile.* 390pp

9 ANEXOS

9.1 FIGURAS

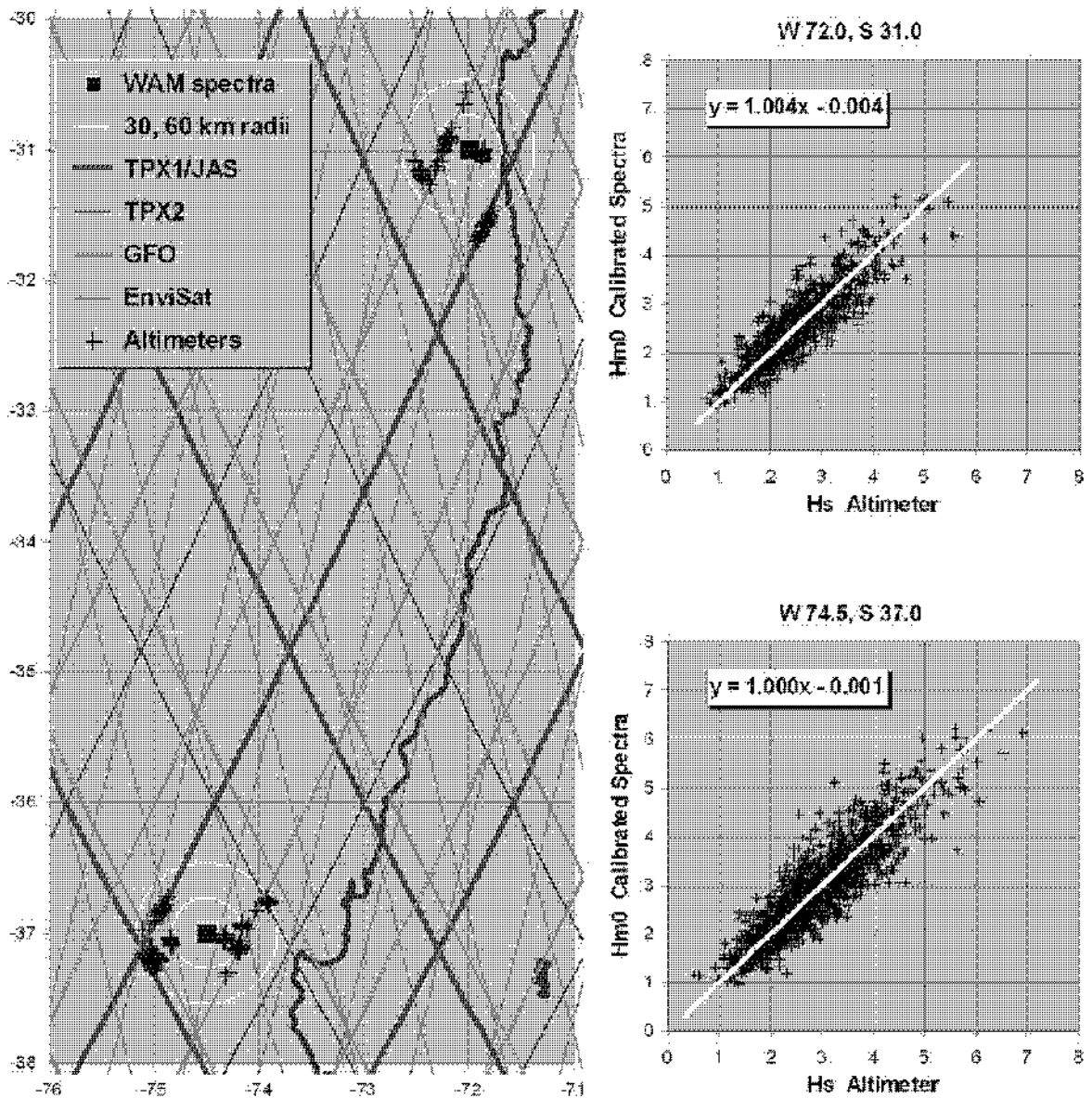


Figura 63. Puntos de calibración del modelo ECMWF WAM en la costa central de Chile (nodos 31°S y 37°S), los *tracks* de altimetría satelital utilizados y los ajustes asociados. (OCEANOR 2008a)

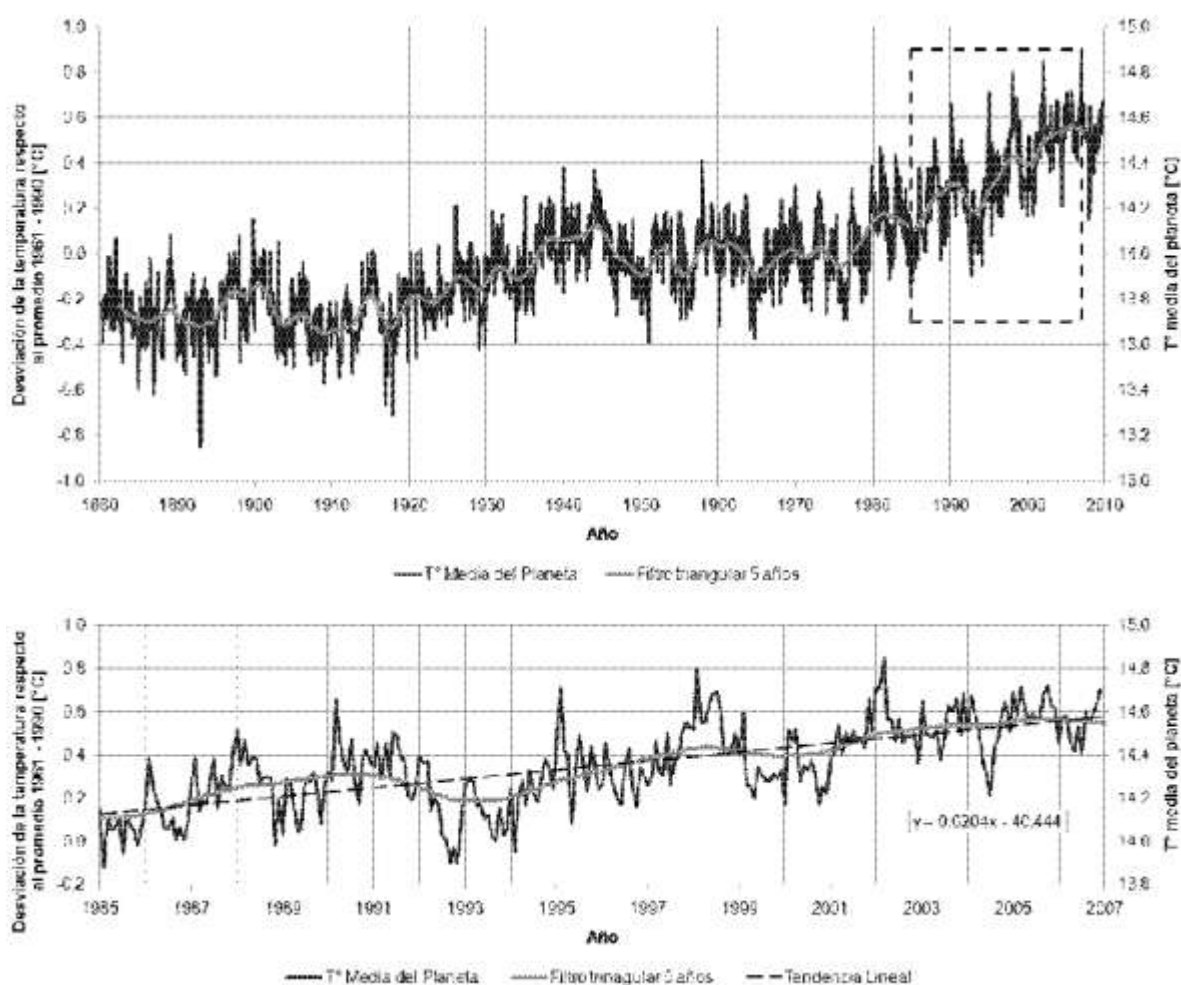
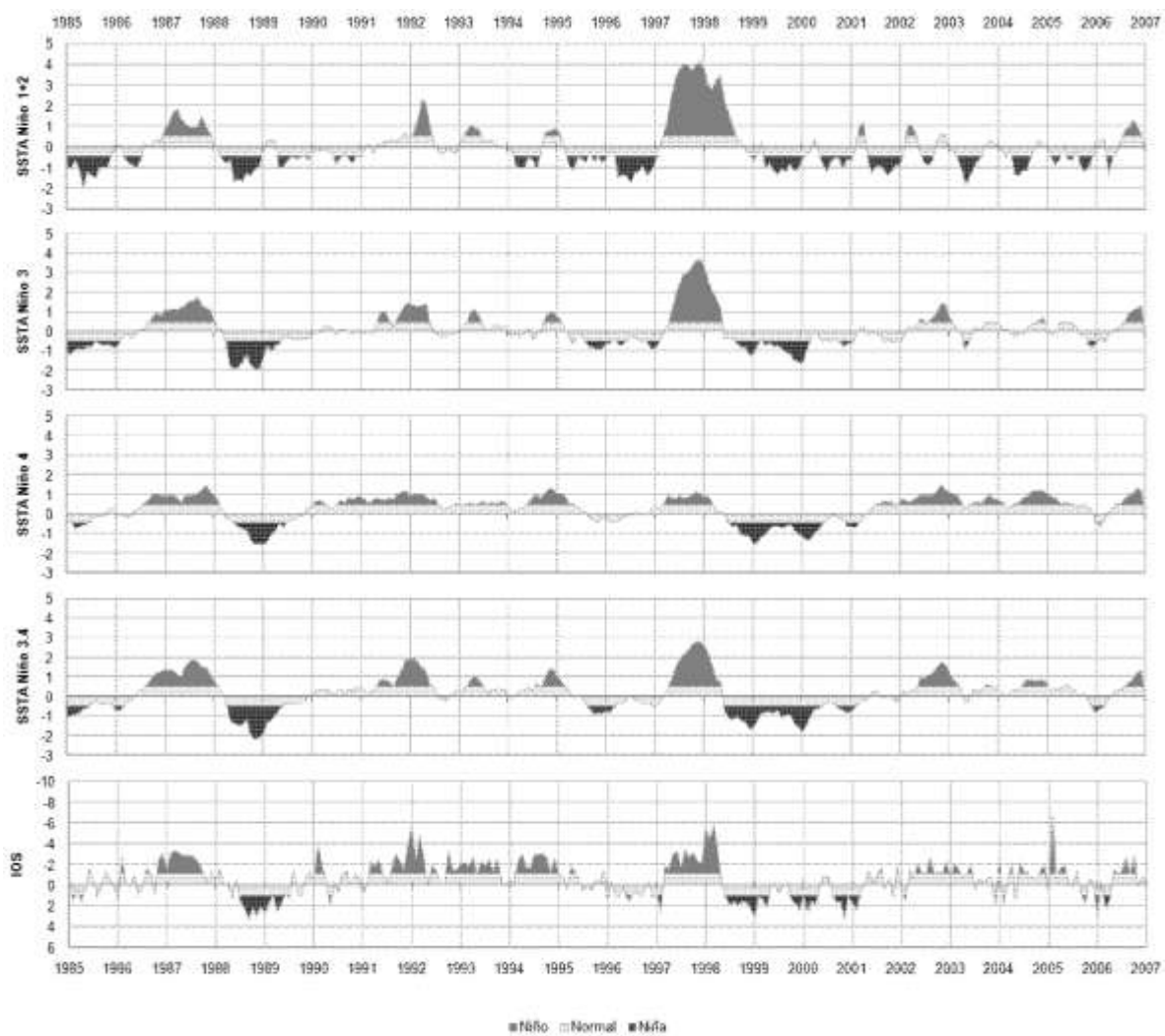


Figura 64. Temperatura media del planeta con filtro triangular de 5 años entre 1880 y 2010 (arriba) y detalle del lapso de interés entre 1985 y 2007 con tendencia lineal (abajo). (Elaboración propia a partir de NASA 2010)



**Figura 65. Series de índices que describen ENOS, contemporánea a la estadística de oleaje.
(Elaboración propia)**

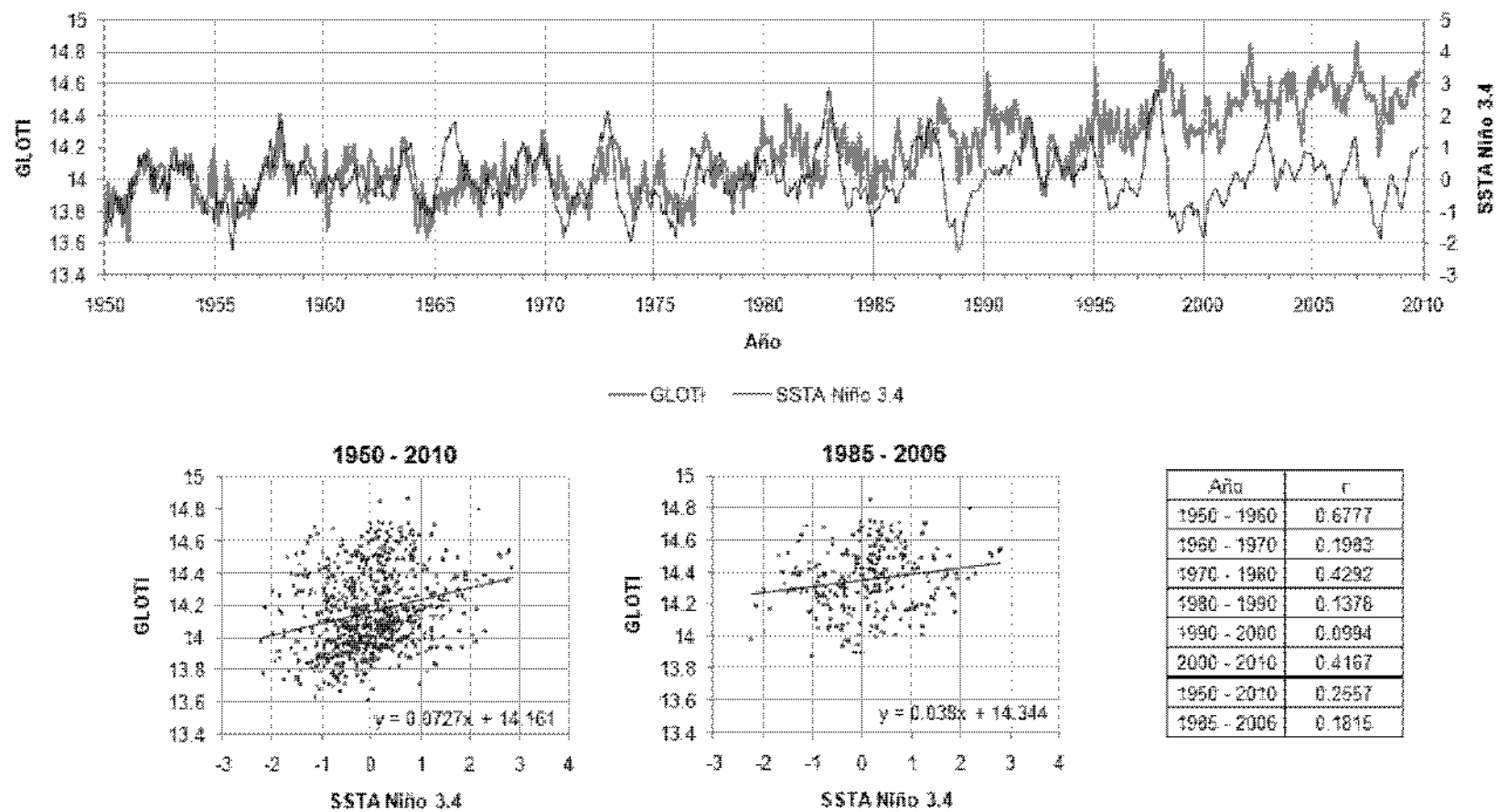


Figura 66. Comparación entre índices SSTA Niño 3.4 y GLOTI.
(Elaboración propia)

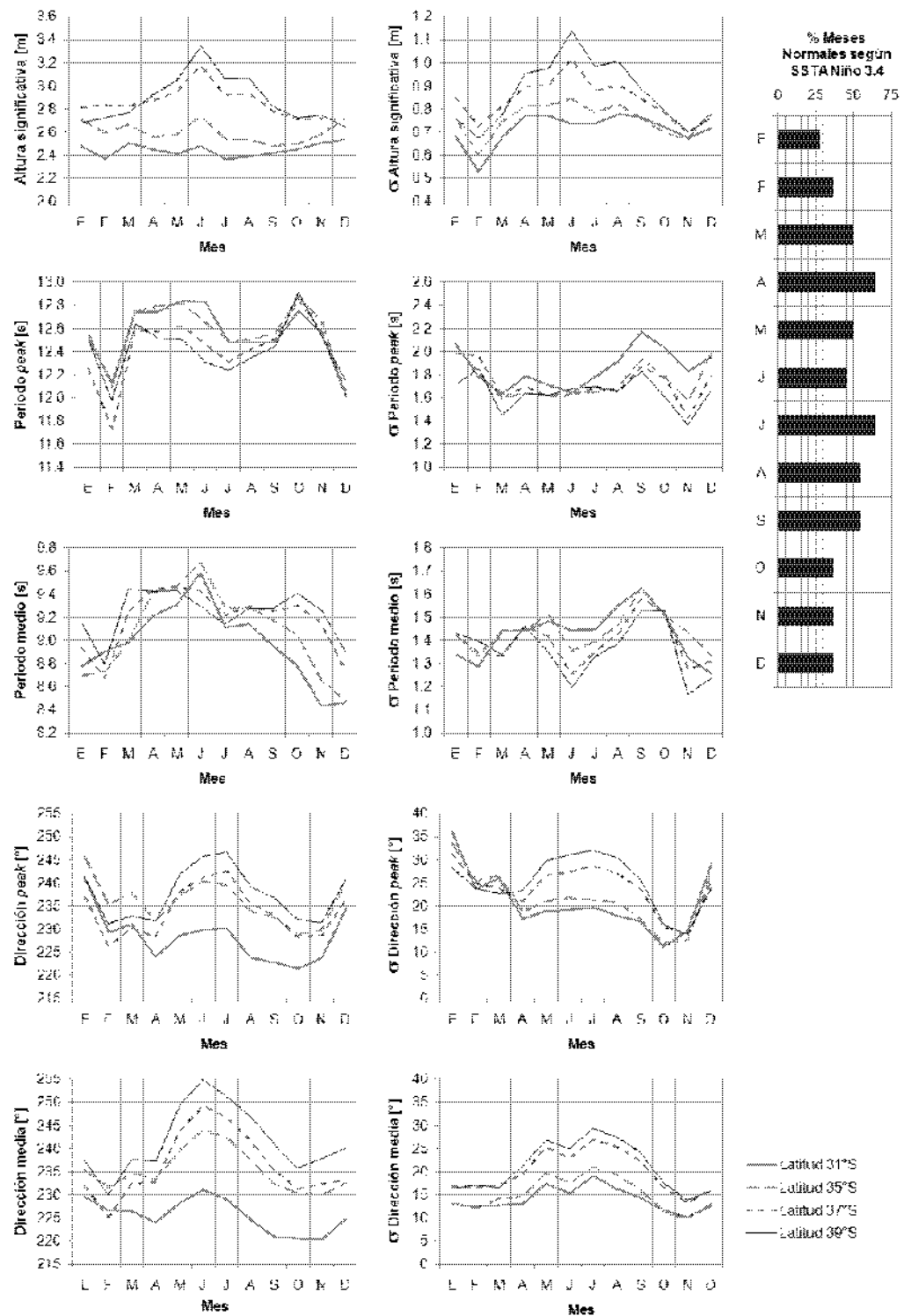


Figura 67. Promedios por parámetro y nodo para los meses normales según SSTA Niño 3.4 y los números de meses normales considerados.
(Elaboración propia)

9.2 TABLAS

Tabla 20. Valores asociados a una probabilidad de ocurrencia para cada nodo y parámetro.

	Altura Significativa				Periodo Peak				Periodo Medio				Dirección Peak				Dirección Media			
%	Nodo 31	Nodo 35	Nodo 37	Nodo 39	Nodo 31	Nodo 35	Nodo 37	Nodo 39	Nodo 31	Nodo 35	Nodo 37	Nodo 39	Nodo 31	Nodo 35	Nodo 37	Nodo 39	Nodo 31	Nodo 35	Nodo 37	Nodo 39
0	0.67	0.54	0.06	0.51	5.36	4.99	5.06	5.44	5.19	5.07	5.02	4.92	163.7	174.0	158.5	97.0	183.3	186.9	166.4	132.5
2	1.16	1.23	1.33	1.32	7.43	7.51	7.64	7.77	6.30	6.24	6.44	6.47	191.1	200.0	188.2	192.0	197.2	206.3	196.7	200.3
4	1.31	1.40	1.50	1.50	7.93	8.21	8.27	8.54	6.54	6.49	6.69	6.73	196.0	203.5	193.2	198.5	200.6	209.5	200.6	205.2
6	1.41	1.50	1.62	1.62	8.49	8.77	8.72	9.34	6.71	6.67	6.87	6.91	198.5	206.3	197.2	202.0	203.0	211.9	203.6	209.0
8	1.49	1.59	1.71	1.71	9.03	9.44	9.37	9.93	6.85	6.82	7.02	7.06	200.7	209.4	200.4	205.5	204.8	213.5	206.2	212.0
10	1.55	1.66	1.79	1.79	9.52	10.02	10.02	10.23	6.96	6.94	7.14	7.20	202.5	213.0	203.4	209.5	206.3	214.9	208.6	214.4
12	1.61	1.72	1.86	1.86	10.05	10.41	10.33	10.48	7.07	7.04	7.25	7.33	204.1	215.3	206.6	214.2	207.5	216.2	210.7	216.6
14	1.67	1.78	1.93	1.92	10.43	10.74	10.63	10.72	7.17	7.14	7.36	7.46	205.8	217.2	210.0	216.7	208.6	217.5	212.6	218.6
16	1.72	1.83	1.99	1.98	10.80	10.95	10.84	10.89	7.26	7.24	7.47	7.58	207.4	218.6	214.4	218.7	209.7	218.6	214.4	220.3
18	1.77	1.88	2.04	2.04	11.02	11.11	11.00	11.03	7.36	7.34	7.58	7.69	209.3	219.9	216.9	220.1	210.8	219.6	216.1	222.0
20	1.82	1.93	2.09	2.09	11.19	11.24	11.14	11.15	7.44	7.45	7.68	7.80	212.0	221.1	218.6	221.3	211.8	220.7	217.8	223.6
22	1.86	1.98	2.14	2.14	11.33	11.37	11.26	11.27	7.53	7.55	7.78	7.91	214.2	222.2	219.9	222.4	212.7	221.7	219.4	225.1
24	1.90	2.02	2.19	2.19	11.48	11.51	11.38	11.38	7.61	7.65	7.88	8.02	215.8	223.1	221.1	223.2	213.7	222.6	220.9	226.5
26	1.94	2.07	2.24	2.24	11.64	11.68	11.50	11.49	7.70	7.74	7.98	8.12	217.1	223.8	222.0	223.9	214.5	223.6	222.3	227.9
28	1.99	2.11	2.28	2.28	11.78	11.80	11.64	11.62	7.78	7.84	8.08	8.23	218.3	224.3	222.7	224.6	215.4	224.5	223.6	229.2
30	2.03	2.15	2.32	2.32	11.89	11.90	11.77	11.74	7.86	7.95	8.20	8.34	219.4	224.8	223.4	225.2	216.2	225.4	225.0	230.4
32	2.06	2.19	2.37	2.37	11.98	11.99	11.86	11.83	7.96	8.06	8.31	8.44	220.4	225.2	224.1	225.9	217.1	226.3	226.3	231.5
34	2.10	2.23	2.41	2.41	12.07	12.07	11.94	11.91	8.05	8.17	8.41	8.54	221.3	225.6	224.6	226.5	217.9	227.2	227.5	232.6
36	2.14	2.28	2.45	2.46	12.15	12.14	12.02	11.99	8.15	8.29	8.51	8.63	222.0	226.1	225.2	227.2	218.7	228.0	228.6	233.7
38	2.18	2.32	2.50	2.50	12.23	12.21	12.10	12.07	8.25	8.40	8.60	8.72	222.7	226.5	225.7	227.8	219.6	228.9	229.8	234.8
40	2.21	2.36	2.54	2.54	12.31	12.29	12.17	12.13	8.35	8.51	8.69	8.81	223.2	227.0	226.3	228.4	220.4	229.8	230.9	235.6
42	2.25	2.40	2.58	2.58	12.39	12.35	12.23	12.20	8.45	8.61	8.79	8.90	223.6	227.5	226.9	229.0	221.3	230.7	231.9	236.6
44	2.29	2.44	2.63	2.63	12.47	12.43	12.30	12.27	8.54	8.72	8.88	8.98	224.0	227.9	227.5	229.7	222.1	231.6	232.9	237.6
46	2.33	2.48	2.67	2.67	12.55	12.51	12.37	12.34	8.64	8.82	8.97	9.07	224.4	228.4	228.1	230.4	222.9	232.4	233.8	238.4
48	2.37	2.52	2.72	2.72	12.64	12.60	12.45	12.41	8.73	8.93	9.06	9.15	224.8	229.0	228.7	231.1	223.7	233.3	234.8	239.3
50	2.41	2.56	2.76	2.76	12.76	12.70	12.52	12.48	8.82	9.02	9.15	9.23	225.2	229.6	229.3	231.8	224.5	234.1	235.7	240.2
52	2.45	2.60	2.81	2.81	12.88	12.80	12.60	12.55	8.92	9.13	9.24	9.32	225.6	230.2	230.0	232.6	225.4	234.9	236.6	241.0
54	2.49	2.65	2.85	2.85	12.96	12.91	12.70	12.64	9.02	9.23	9.33	9.40	226.0	230.8	230.7	233.6	226.3	235.7	237.6	241.9
56	2.53	2.69	2.90	2.90	13.03	12.99	12.80	12.73	9.13	9.33	9.42	9.48	226.4	231.5	231.5	234.6	227.1	236.6	238.6	242.8
58	2.57	2.73	2.94	2.95	13.10	13.06	12.91	12.84	9.22	9.43	9.51	9.56	226.9	232.4	232.4	235.9	228.0	237.4	239.5	243.7
60	2.61	2.78	2.99	3.00	13.18	13.14	12.99	12.92	9.32	9.52	9.60	9.64	227.5	233.3	233.4	237.4	228.8	238.3	240.5	244.6
62	2.65	2.83	3.04	3.04	13.25	13.21	13.06	13.01	9.42	9.62	9.68	9.72	228.0	234.5	234.6	239.0	229.6	239.2	241.4	245.6
64	2.69	2.87	3.09	3.09	13.31	13.28	13.14	13.08	9.52	9.71	9.76	9.80	228.7	235.8	236.0	241.1	230.5	240.2	242.3	246.7
66	2.74	2.92	3.14	3.15	13.38	13.35	13.21	13.16	9.62	9.81	9.85	9.88	229.4	237.3	237.8	242.8	231.5	241.1	243.3	247.8
68	2.78	2.97	3.19	3.20	13.47	13.42	13.29	13.24	9.73	9.91	9.94	9.96	230.3	239.3	240.0	244.4	232.5	242.1	244.4	249.0
70	2.83	3.02	3.25	3.26	13.54	13.50	13.37	13.32	9.82	10.01	10.03	10.05	231.3	241.8	242.2	245.8	233.4	243.0	245.6	250.3
72	2.87	3.08	3.31	3.32	13.63	13.59	13.45	13.40	9.92	10.11	10.12	10.13	232.5	243.7	243.9	247.0	234.4	244.0	246.8	251.5
74	2.93	3.13	3.37	3.39	13.73	13.67	13.53	13.48	10.03	10.20	10.21	10.23	233.9	245.3	245.4	248.2	235.5	245.1	248.0	252.9
76	2.98	3.19	3.44	3.46	13.84	13.78	13.62	13.57	10.15	10.30	10.31	10.32	235.8	246.7	246.9	249.3	236.6	246.2	249.4	254.3
78	3.03	3.25	3.51	3.53	13.98	13.91	13.73	13.67	10.26	10.40	10.41	10.42	238.6	248.0	248.3	250.5	237.8	247.3	250.9	255.9
80	3.09	3.32	3.58	3.61	14.16	14.07	13.85	13.78	10.38	10.51	10.51	10.52	241.7	249.3	249.6	251.9	239.1	248.5	252.5	257.5
82	3.16	3.39	3.66	3.69	14.27	14.23	14.00	13.92	10.51	10.63	10.62	10.62	244.0	250.4	250.9	253.7	240.3	249.7	254.1	259.6
84	3.23	3.47	3.75	3.78	14.40	14.35	14.19	14.10	10.63	10.75	10.73	10.73	246.1	251.6	252.5	256.6	241.7	251.2	256.1	261.8
86	3.31	3.55	3.84	3.89	14.52	14.48	14.32	14.27	10.76	10.89	10.85	10.85	248.0	253.1	255.0	260.4	243.1	252.8	258.5	264.4
88	3.40	3.65	3.95	4.00	14.66	14.61	14.47	14.42	10.91	11.03	10.99	10.98	249.8	256.3	259.0	268.2	244.8	254.9	261.3	267.7
90	3.50	3.76	4.07	4.14	14.83	14.77	14.63	14.58	11.07	11.17	11.15	11.12	252.1	264.1	267.3	277.4	246.7	257.3	264.7	271.7
92	3.61	3.88	4.21	4.29	15.04	14.97	14.82	14.76	11.26	11.35	11.32	11.29	257.8	284.4	278.6	285.0	249.1	260.5	268.9	276.3
94	3.76	4.03	4.39	4.48	15.42	15.33	15.06	15.00	11.49	11.55	11.54	11.51	302.8	305.7	292.4	302.0	252.1	264.3	274.6	283.8
96	3.95	4.24	4.65	4.77	15.88	15.84	15.60	15.52	11.77	11.84	11.84	11.80	308.4	309.0	307.5	309.0	256.8	270.3	284.5	294.3
98	4.29	4.59	5.07	5.28	16.40	16.38	16.15	16.09	12.25	12.32	12.30	12.21	310.8	311.2	311.4	316.3	264.1	284.2	300.7	310.9
100	5.89	8.04	8.47	9.16	23.94	23.94	23.94	23.94	14.53	14.31	19.96	14.29	362.9	369.3	376.9	400.5	349.9	359.7	379.2	379.6

Tabla 21. Frecuencias relativas asociadas a cada parámetro y nodo.

Altura Significativa					Periodo Peak					Periodo Medio					Dirección Peak					Dirección Media				
Rango	Nodo 31	Nodo 35	Nodo 37	Nodo 39	Rango	Nodo 31	Nodo 35	Nodo 37	Nodo 39	Rango	Nodo 31	Nodo 35	Nodo 37	Nodo 39	Rango	Nodo 31	Nodo 35	Nodo 37	Nodo 39	Rango	Nodo 31	Nodo 35	Nodo 37	Nodo 39
0 - 0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	4 - 5	0.00	0.00	0.00	0.00	4 - 5	0.00	0.00	0.00	0.00	157.50	0.01	0.00	0.02	0.07	157.50	0.00	0.00	0.01	0.05
0.5 - 1	0.71	0.56	0.24	0.28	5 - 6	0.06	0.08	0.03	0.03	5 - 6	0.65	0.82	0.40	0.34	168.75	0.03	0.00	0.13	0.11	168.75	0.00	0.00	0.01	0.03
1 - 1.5	7.53	5.38	3.67	3.72	6 - 7	0.86	0.85	0.56	0.53	6 - 7	10.00	10.31	7.23	6.74	180.00	0.80	0.06	1.18	0.77	180.00	0.03	0.00	0.09	0.07
1.5 - 2	20.20	16.74	12.37	12.43	7 - 8	3.27	2.56	2.60	1.99	7 - 8	22.19	19.74	18.69	16.48	191.25	3.74	0.81	4.50	2.28	191.25	1.84	0.11	1.99	0.98
2 - 2.5	25.91	24.03	21.58	21.44	8 - 9	3.68	3.03	3.46	2.47	8 - 9	20.62	18.54	20.28	20.77	202.50	12.23	6.50	7.15	6.14	202.50	11.27	2.92	7.53	4.41
2.5 - 3	22.29	22.21	22.45	22.07	9 - 10	3.90	3.39	3.23	3.35	9 - 10	19.82	20.37	22.66	24.36	213.75	13.06	9.73	8.13	7.53	213.75	24.29	14.45	12.33	9.28
3 - 3.5	13.31	15.74	17.38	17.10	10 - 11	5.97	6.64	7.99	9.13	10 - 11	15.77	17.76	18.77	19.60	225.00	38.86	36.42	32.87	29.96	225.00	26.79	24.36	17.53	15.65
3.5 - 4	6.37	8.87	11.14	10.84	11 - 12	14.54	15.60	17.44	18.52	11 - 12	8.09	9.25	8.73	8.74	236.25	11.34	16.55	15.59	17.94	236.25	20.07	25.71	23.51	23.38
4 - 4.5	2.41	4.03	6.04	6.18	12 - 13	22.70	24.08	24.92	25.72	12 - 13	2.38	2.56	2.69	2.51	247.50	10.75	15.94	15.09	16.72	247.50	10.26	18.81	17.92	20.50
4.5 - 5	0.95	1.58	2.81	2.97	13 - 14	23.22	22.93	21.73	21.13	13 - 14	0.44	0.61	0.52	0.42	258.75	1.88	4.02	4.89	5.72	258.75	3.49	7.66	8.92	11.60
5 - 5.5	0.29	0.57	1.47	1.47	14 - 15	13.42	13.02	11.60	11.10	14 - 15	0.04	0.04	0.03	0.03	270.00	0.41	0.96	1.84	2.27	270.00	1.08	3.06	4.45	5.80
5.5 - 6	0.05	0.18	0.46	0.75	15 - 16	5.01	4.61	3.93	3.70	15 - 16	0.00	0.00	0.00	0.00	281.25	0.35	1.19	2.15	2.87	281.25	0.35	1.11	2.09	2.89
6 - 6.5	0.00	0.07	0.22	0.35	16 - 17	2.12	2.00	1.66	1.58	16 - 17	0.00	0.00	0.00	0.00	292.50	0.27	0.64	0.88	1.18	292.50	0.22	0.65	1.41	1.98
6.5 - 7	0.00	0.02	0.11	0.21	17 - 18	0.93	0.86	0.64	0.55	17 - 18	0.00	0.00	0.00	0.00	303.75	2.93	3.40	2.40	2.64	303.75	0.12	0.43	0.86	1.28
7 - 7.5	0.00	0.01	0.05	0.14	18 - 19	0.17	0.17	0.10	0.10	18 - 19	0.00	0.00	0.00	0.00	315.00	3.16	3.15	2.09	2.12	315.00	0.09	0.36	0.67	0.92
7.5 - 8	0.00	0.00	0.02	0.04	19 - 20	0.11	0.12	0.08	0.07	19 - 20	0.00	0.00	0.00	0.00	326.25	0.04	0.12	0.26	0.39	326.25	0.08	0.20	0.37	0.61
8 - 8.5	0.00	0.00	0.01	0.02	20 - 21	0.02	0.01	0.01	0.01	20 - 21	0.00	0.00	0.00	0.00	337.50	0.10	0.27	0.44	0.67	337.50	0.02	0.11	0.21	0.36
8.5 - 9	0.00	0.00	0.00	0.00	21 - 22	0.02	0.02	0.01	0.01	21 - 22	0.00	0.00	0.00	0.00	348.75	0.03	0.15	0.19	0.34	348.75	0.01	0.05	0.09	0.13
9 - 9.5	0.00	0.00	0.00	0.00	22 - 23	0.01	0.01	0.01	0.01	22 - 23	0.00	0.00	0.00	0.00	360.00	0.01	0.08	0.09	0.15	360.00	0.00	0.01	0.03	0.04
9.5 - 10	0.00	0.00	0.00	0.00	23 - 24	0.02	0.02	0.02	0.02	23 - 24	0.00	0.00	0.00	0.00	371.25	0.00	0.01	0.10	0.12	371.25	0.00	0.00	0.01	0.03
															382.50	0.00	0.00	0.00	0.01	382.50	0.00	0.00	0.00	0.01

Tabla 22. Tablas de frecuencia altura significativa *versus* periodo *peak* para todos los nodos.

NODO 31		PERIODO PEAK [s]														f	f _{acum}
ENTRADA	NOTA	0	2	4	5	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+		
0	0.5															0.71	0.71
0.5	1					0.11	0.34	0.19	0.03	0.03						7.53	8.24
1	1.5			0.01	0.05	0.50	3.71	2.56	0.55	0.14	0.01	0.00				20.20	28.44
1.5	2			0.04	0.33	0.78	7.07	8.87	1.72	0.31	0.06	0.01	0.01			25.91	54.34
2	2.5			0.01	1.08	1.10	5.25	14.17	3.63	0.56	0.08	0.02	0.02			22.29	76.63
2.5	3				1.60	1.38	2.70	11.19	4.73	0.62	0.06	0.00				13.31	89.94
3	3.5				0.79	1.61	0.93	5.43	3.90	0.53	0.03	0.00				6.37	96.31
3.5	4				0.23	1.22	0.29	1.86	2.37	0.38	0.02					2.41	98.71
4	4.5				0.04	0.51	0.11	0.50	0.95	0.29	0.00	0.00				0.95	99.66
4.5	5				0.01	0.26	0.07	0.11	0.37	0.12	0.01					0.29	99.95
5	5.5					0.08	0.03	0.02	0.09	0.05	0.00					0.05	100.00
5.5	6					0.03	0.01		0.00	0.01							
6	6.5																
6.5	7																
7	7.5																
7.5	8																
f				0.06	4.13	7.58	20.51	45.91	18.42	3.05	0.27	0.04	0.03			100	
f _{acum}				0.06	4.19	11.77	32.27	78.19	96.61	99.66	99.93	99.97	100.00				

NODO 35		PERIODO PEAK [s]														f	f _{acum}
ENTRADA	NOTA	0	2	4	5	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+		
0	0.5															0.56	0.56
0.5	1					0.07	0.26	0.17	0.04	0.02	0.00					5.36	5.94
1	1.5			0.01	0.02	0.47	2.78	1.61	0.37	0.11	0.01					16.74	22.68
1.5	2			0.04	0.17	0.68	6.82	7.35	1.40	0.22	0.06	0.01	0.01			24.03	46.71
2	2.5			0.02	0.64	0.82	6.11	13.18	2.69	0.46	0.08	0.01	0.02			22.21	68.92
2.5	3			0.00	0.98	0.82	3.64	12.39	3.73	0.57	0.06	0.01				15.74	84.66
3	3.5				0.97	1.16	1.52	7.46	4.09	0.52	0.03	0.00				8.87	93.54
3.5	4				0.51	1.10	0.64	3.17	3.02	0.40	0.03					4.03	97.57
4	4.5				0.11	0.74	0.28	1.18	1.42	0.30	0.01	0.00				1.58	99.15
4.5	5				0.02	0.35	0.08	0.36	0.58	0.18	0.01					0.57	99.72
5	5.5				0.01	0.13	0.04	0.10	0.22	0.07						0.18	99.91
5.5	6					0.05	0.03	0.03	0.07	0.01						0.07	99.97
6	6.5					0.02	0.02	0.01	0.01							0.02	99.99
6.5	7					0.01	0.00		0.00							0.01	100.00
7	7.5					0.00	0.00									0.00	100.00
7.5	8																
f				0.08	3.41	6.41	22.23	47.02	17.64	2.87	0.29	0.03	0.03			100	
f _{acum}				0.08	3.49	9.90	32.13	79.15	96.79	99.65	99.94	99.97	100.00				

NODO 37		PERIODO PEAK [s]														f	f _{acum}
ENTRADA	NOTA	0	2	4	5	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+		
0	0.5															0.00	0.00
0.5	1					0.05	0.10	0.07	0.02							0.24	0.24
1	1.5			0.01	0.02	0.34	2.02	1.01	0.22	0.05						3.67	3.91
1.5	2			0.01	0.11	0.67	6.23	4.41	0.72	0.17	0.05					12.37	16.28
2	2.5			0.01	0.43	0.66	7.79	10.49	1.83	0.39	0.05					21.58	37.86
2.5	3			0.00	0.88	0.66	4.83	12.86	2.74	0.42	0.06	0.01	0.01			22.45	60.31
3	3.5			0.00	0.99	0.83	2.41	9.44	3.33	0.35	0.01	0.00				17.38	77.69
3.5	4				0.53	1.30	1.09	4.91	2.99	0.32	0.01					11.14	88.83
4	4.5				0.16	1.06	0.45	2.62	2.04	0.31	0.00	0.00				6.04	94.87
4.5	5				0.03	0.64	0.23	0.78	0.94	0.17	0.01					2.81	97.68
5	5.5				0.00	0.31	0.12	0.40	0.48	0.16	0.00					1.47	99.15
5.5	6				0.00	0.09	0.07	0.14	0.12	0.03						0.46	99.61
6	6.5					0.05	0.05	0.06	0.04	0.01						0.22	99.83
6.5	7					0.01	0.03	0.03	0.04							0.11	99.93
7	7.5					0.01	0.01	0.01	0.02							0.05	99.98
7.5	8					0.00	0.01	0.01								0.02	100.00
f				0.03	3.16	6.69	25.43	48.66	15.53	2.39	0.18	0.01	0.02			100	
f _{acum}				0.03	3.20	9.88	35.31	81.96	97.49	99.78	99.97	99.98	100.00				

NODO 39		PERIODO PEAK [s]														f	f _{acum}
ENTRADA	NOTA	0	2	4	5	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+		
0	0.5															0.28	0.28
0.5	1					0.00	0.07	0.12	0.07	0.02						3.72	4.00
1	1.5			0.01	0.02	0.41	2.02	0.98	0.23	0.05	0.01					12.44	16.43
1.5	2			0.01	0.10	0.73	6.30	4.40	0.69	0.16	0.05	0.00				21.45	37.88
2	2.5			0.01	0.37	0.66	8.28	10.82	1.75	0.28	0.05	0.02	0.02			22.08	59.95
2.5	3			0.01	0.60	0.71	5.10	12.79	2.41	0.40	0.05					17.11	77.06
3	3.5				0.70	0.81	2.81	9.32	3.13	0.33	0.01	0.00				10.84	87.90
3.5	4				0.53	0.88	1.35	4.99	2.83	0.25	0.01					6.18	94.08
4	4.5				0.16	0.70	0.71	2.32	2.00	0.27	0.00					2.97	97.05
4.5	5				0.02	0.43	0.36	1.02	0.94	0.19	0.01	0.00				1.47	98.51
5	5.5				0.00	0.20	0.23	0.49	0.44	0.11	0.00					0.75	99.26
5.5	6				0.11	0.16	0.23	0.20	0.06	0.00						0.35	99.61
6	6.5					0.06	0.09	0.10	0.07	0.02						0.21	99.82
6.5	7					0.03	0.08	0.07	0.03	0.01						0.14	99.96
7	7.5					0.01	0.04	0.04	0.04							0.04	100.00
7.5	8					0.00	0.01	0.02	0.01								
f				0.03	2.52	5.81	27.85	48.85	14.80	2.12	0.17	0.02	0.02			100	
f _{acum}				0.03	2.55	8.37	36.01	82.86	97.66	99.78	99.95	99.98	100.00				

Tabla 23. Tablas de frecuencia altura significativa *versus* periodo medio para todos los nodos.

NODO 31		PERIODO MEDIO [s]														f	f acum
EXCITE	ALTEZA	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+		
0	0.5															0.71	0.71
0.5	1				0.00	0.11	0.54	0.06								7.63	8.24
1	1.5				0.10	1.44	4.94	1.04	0.01							20.20	28.44
1.5	2				0.30	4.36	9.79	5.66	0.06							25.91	54.34
2	2.5				0.23	7.87	9.25	8.18	0.36							22.29	76.63
2.5	3				0.01	8.84	7.13	5.36	0.94	0.01						13.31	89.94
3	3.5					5.84	4.52	2.14	0.80	0.01						6.37	96.31
3.5	4					2.69	2.41	0.87	0.38	0.02						2.41	98.71
4	4.5					0.77	1.10	0.34	0.19	0.00						0.95	99.66
4.5	5					0.22	0.50	0.15	0.07	0.01						0.29	99.95
5	5.5					0.02	0.22	0.05								0.05	100.00
5.5	6					0.00	0.04	0.01									
6	6.5																
6.5	7																
7	7.5																
7.5	8																
f					0.65	32.19	40.45	23.86	2.81	0.04						100	
f acum					0.65	32.83	73.28	97.14	99.96	100.00							

NODO 35		PERIODO MEDIO [s]														f	f acum
EXCITE	ALTEZA	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+		
0	0.5															0.56	0.56
0.5	1				0.00	0.11	0.38	0.07								5.38	5.94
1	1.5				0.09	1.01	3.55	0.72	0.00							16.74	22.68
1.5	2				0.29	3.19	9.00	4.22	0.04							24.03	46.71
2	2.5				0.33	5.94	9.45	8.06	0.26							22.21	68.92
2.5	3				0.10	7.19	6.83	7.32	0.78							15.74	84.66
3	3.5				0.02	6.37	4.62	3.86	0.87	0.01						8.87	93.54
3.5	4					3.82	2.70	1.67	0.67	0.01						4.03	97.57
4	4.5					1.67	1.36	0.67	0.32	0.02						1.58	99.15
4.5	5					0.53	0.64	0.26	0.16	0.00						0.57	99.72
5	5.5					0.14	0.24	0.11	0.07	0.01						0.18	99.91
5.5	6					0.04	0.09	0.05	0.01							0.07	99.97
6	6.5					0.01	0.05	0.01								0.02	99.99
6.5	7					0.01	0.01	0.00								0.01	100.00
7	7.5						0.01									0.00	100.00
7.5	8						0.00										
f					0.62	30.05	38.91	27.01	3.17	0.04						100	
f acum					0.62	30.87	69.78	96.79	99.96	100.00							

NODO 37		PERIODO MEDIO [s]														f	f acum
EXCITE	ALTEZA	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+		
0	0.5															0.00	0.00
0.5	1				0.01	0.07	0.14	0.02								0.24	0.24
1	1.5				0.05	0.64	2.68	0.30								3.67	3.91
1.5	2				0.15	2.28	7.95	1.99	0.00							12.37	16.28
2	2.5				0.15	4.65	10.25	6.43	0.11							21.58	37.86
2.5	3				0.03	5.86	8.42	7.79	0.36							22.45	60.31
3	3.5				0.01	5.52	5.73	5.45	0.66	0.00						17.38	77.69
3.5	4					3.82	3.34	3.07	0.90	0.01						11.14	88.83
4	4.5					1.99	1.95	1.47	0.61	0.01						6.04	94.87
4.5	5					0.79	1.24	0.49	0.29	0.00						2.81	97.68
5	5.5					0.23	0.74	0.26	0.23	0.00						1.47	99.15
5.5	6					0.05	0.29	0.09	0.63	0.00						0.46	99.61
6	6.5					0.02	0.13	0.05	0.01	0.00						0.22	99.83
6.5	7					0.00	0.05	0.05	0.01							0.11	99.93
7	7.5						0.03	0.02								0.05	99.98
7.5	8						0.02	0.00								0.02	100.00
f					0.40	25.92	42.94	27.49	3.21	0.03						100	
f acum					0.40	26.32	69.26	96.75	99.97	100.00	100.00	100.00					

NODO 39		PERIODO MEDIO [s]														f	f acum
EXCITE	ALTEZA	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+		
0	0.5															0.28	0.28
0.5	1				0.02	0.10	0.13	0.03								3.72	4.00
1	1.5				0.03	0.71	2.69	0.29								13.44	15.43
1.5	2				0.16	2.61	7.75	1.91	0.01							21.45	37.88
2	2.5				0.12	4.46	10.63	6.16	0.08							22.08	59.95
2.5	3				0.03	5.29	8.71	7.77	0.27							17.11	77.06
3	3.5					4.63	6.15	5.73	0.59							10.84	87.90
3.5	4					3.05	3.75	3.32	0.72	0.01						6.18	94.08
4	4.5					1.52	2.24	1.66	0.75	0.01						2.97	97.05
4.5	5					0.56	1.42	0.71	0.28	0.01						1.47	98.51
5	5.5					0.18	0.78	0.34	0.16	0.00						0.75	99.26
5.5	6					0.07	0.43	0.20	0.05	0.00						0.35	99.61
6	6.5					0.03	0.22	0.09	0.01							0.21	99.82
6.5	7					0.01	0.14	0.06	0.00							0.14	99.96
7	7.5					0.00	0.07	0.06	0.00							0.04	100.00
7.5	8						0.02	0.02									
f					0.34	23.23	45.13	26.35	2.93	0.03						100	
f acum					0.34	23.57	68.70	97.04	99.97	100.00							

Tabla 24. Tablas de frecuencia altura significativa *versus* dirección *peak* para todos los nodos.

NODO 31		ALTURA SIGNIFICATIVA [m]														f	f acum
DIRECCION	NAUTA	0.5	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6		
E																	
ESE																	
SE																	
SSE																	
S																	
SSW																	
SW																	
WSW																	
W																	
WWW																	
NW																	
NNW																	
N																	
NNE																	
NE																	
ENE																	
f																	
f acum																	

NODO 35		ALTURA SIGNIFICATIVA [m]														f	f acum
DIRECCION	NAUTA	0.5	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6		
E																	
ESE																	
SE																	
SSE																	
S																	
SSW																	
SW																	
WSW																	
W																	
WWW																	
NW																	
NNW																	
N																	
NNE																	
NE																	
ENE																	
f																	
f acum																	

NODO 37		ALTURA SIGNIFICATIVA [m]														f	f acum
DIRECCION	NAUTA	0.5	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6		
E																	
ESE																	
SE																	
SSE																	
S																	
SSW																	
SW																	
WSW																	
W																	
WWW																	
NW																	
NNW																	
N																	
NNE																	
NE																	
ENE																	
f																	
f acum																	

NODO 39		ALTURA SIGNIFICATIVA [m]														f	f acum
DIRECCION	NAUTA	0.5	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6		
E																	
ESE																	
SE																	
SSE																	
S																	
SSW																	
SW																	
WSW																	
W																	
WWW																	
NW																	
NNW																	
N																	
NNE																	
NE																	
ENE																	
f																	
f acum																	

Tabla 25. Tablas de frecuencia altura significativa *versus* dirección media para todos los nodos.

NODO 31		ALTURA SIGNIFICATIVA [m]														f	f acum
DIRECCION	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6	+		
0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6	+				
DIRECCION MEDIA [°]																	
E																0.38	0.38
ESE																22.79	24.18
SE																51.16	75.34
SSE																21.36	96.70
S				0.01	0.02	0.07	0.12	0.07	0.05	0.02	0.01	0.01				0.40	99.34
SSW	0.01	0.43	1.86	4.56	6.38	5.12	3.20	1.38	0.60	0.22	0.03					22.79	24.18
SW	0.41	3.91	11.00	13.79	11.86	6.71	2.64	0.71	0.21	0.04	0.01					51.16	75.34
WSW	0.29	2.89	6.60	6.59	3.39	1.60	0.36	0.17	0.07	0.01						21.36	96.70
W	0.01	0.31	0.71	0.82	0.48	0.18	0.08	0.03	0.02							2.64	99.34
WNW			0.00	0.02	0.11	0.10	0.11	0.03	0.02	0.01						0.40	99.74
MW					0.01	0.02	0.06	0.06	0.02	0.01	0.01					0.19	99.93
HNW								0.02	0.03	0.01	0.00					0.06	100.00
N																0.00	100.00
NNE																	100.00
NE																	100.00
ENE																	100.00
f	0.71	7.53	20.20	25.91	22.29	13.31	6.37	2.41	0.95	0.29	0.05					100	
f acum	0.71	8.24	28.44	54.34	76.63	89.94	96.31	98.71	99.66	99.95	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100	

NODO 35		ALTURA SIGNIFICATIVA [m]														f	f acum
DIRECCION	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6	+		
0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6	+				
DIRECCION MEDIA [°]																	
E																0.02	0.02
ESE																8.24	8.27
SE																47.06	55.27
SSE																35.69	90.96
S						0.00		0.01	0.01							6.78	97.74
SSW			0.03	0.42	1.17	1.67	1.88	1.53	0.91	0.46	0.13	0.03	0.01			1.33	99.07
SW	0.31	2.10	6.65	10.32	10.75	8.93	5.05	2.04	0.63	0.20	0.03					0.69	99.76
WSW	0.22	2.78	8.23	10.42	7.86	3.70	1.60	0.55	0.22	0.08	0.03	0.00				0.21	99.97
W	0.03	0.46	1.36	1.93	1.57	0.80	0.30	0.19	0.07	0.04	0.03	0.01				0.03	100.00
WNW			0.01	0.07	0.17	0.30	0.27	0.20	0.17	0.07	0.03	0.02	0.02				
MW				0.01	0.02	0.06	0.14	0.15	0.12	0.05	0.06	0.03	0.02				
HNW						0.01	0.02	0.02	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02				
N									0.00	0.01	0.00	0.00	0.01				
NNE																	
NE																	
ENE																	
f	0.56	5.38	16.74	24.03	22.21	15.74	8.87	4.03	1.58	0.57	0.18	0.09				100	
f acum	0.56	5.94	22.68	46.71	68.92	84.66	93.54	97.57	99.15	99.72	99.91	100.00	100.00	100.00	100.00	100	

NODO 37		ALTURA SIGNIFICATIVA [m]														f	f acum
DIRECCION	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6	+		
0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6	+				
DIRECCION MEDIA [°]																	
E																0.01	0.01
ESE																0.55	0.56
SE																14.75	15.30
SSE																30.96	51.26
S																34.97	86.23
SSW	0.00	0.01	0.00	0.01	0.04	0.09	0.11	0.16	0.09	0.03	0.01	0.01				9.22	95.45
SW	0.09	1.42	4.14	8.04	8.31	6.83	4.09	1.94	0.67	0.35	0.04	0.04				2.79	98.24
WSW	0.11	1.87	6.09	9.19	8.45	4.78	2.48	1.07	0.46	0.28	0.09	0.08				1.26	99.51
W	0.03	0.24	1.34	2.07	1.96	1.52	0.78	0.54	0.36	0.20	0.09	0.09				0.43	99.93
WNW	0.00	0.01	0.10	0.30	0.58	0.52	0.54	0.34	0.15	0.11	0.08	0.04				0.07	100.00
MW			0.00	0.02	0.07	0.12	0.26	0.23	0.18	0.14	0.11	0.05	0.08				
HNW				0.00	0.02	0.06	0.06	0.06	0.08	0.07	0.05	0.04	0.03				
N						0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01				
NNE																	
NE																	
ENE																	
f	0	0.24	3.67	12.37	21.58	22.45	17.38	11.14	6.04	2.81	1.47	0.46	0.39			100	
f acum	0.00	0.24	3.91	16.28	37.86	60.31	77.69	88.83	94.87	97.68	99.15	99.61	100.00	100.00	100.00	100	

NODO 39		ALTURA SIGNIFICATIVA [m]														f	f acum
DIRECCION	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6	+		
0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6	+				
DIRECCION MEDIA [°]																	
E																0.01	0.01
ESE																0.04	0.05
SE																0.34	0.39
SSE																9.05	9.45
S																31.82	41.27
SSW	0.01	0.10	0.59	1.38	1.96	2.09	1.64	0.80	0.36	0.09	0.02	0.02				39.92	81.19
SW	0.07	1.21	3.85	6.86	7.32	5.82	3.71	1.75	0.73	0.31	0.12	0.05				12.26	93.45
WSW	0.14	2.00	6.21	10.17	9.24	5.89	3.06	1.82	0.69	0.38	0.18	0.14				3.86	97.31
W	0.05	0.37	1.62	2.49	2.51	2.64	1.21	0.86	0.53	0.28	0.15	0.17				1.82	99.13
WNW	0.01	0.02	0.11	0.39	0.67	0.78	0.67	0.47	0.32	0.18	0.12	0.11				0.73	99.86
MW	0.00	0.00	0.02	0.08	0.22	0.30	0.34	0.32	0.21	0.13	0.09	0.12				0.14	100.00
HNW				0.01	0.01	0.05	0.07	0.12	0.12	0.10	0.08	0.06	0.12				
N					0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02				
NNE																	
NE																	
ENE																	
f	0.28	3.72	12.44	21.45	22.08	17.11	10.64	6.18	2.97	1.47	0.75	0.74				100	
f acum	0.28	4.00	16.43	37.88	59.95	77.06	87.70	94.08	97.05	98.51	99.26	100.00	100.00	100.00	100.00	100	

Tabla 26. Tablas de frecuencia dirección *peak* versus periodo *peak* para todos los nodos.

NODO 31		PERIODO PEAK [s]														f	f _{acum}
DIRECCION	NAUTA	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+		
E	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+				
ESE																0.01	0.01
SE					0.01											2.05	2.05
SSE						0.01										19.52	21.57
S			0.03	1.41	0.59	0.01	0.00	0.01	0.01							54.81	76.39
SSW			0.03	2.59	5.57	4.89	4.78	1.48	0.17	0.00						15.76	92.15
SW				0.02	0.63	9.98	30.80	11.70	1.59	0.08	0.01	0.00				1.11	93.26
WSW				0.00	0.29	4.55	7.75	2.77	0.37	0.02	0.01					0.91	94.17
W					0.22	0.56	0.30	0.03	0.00							5.66	99.84
WW					0.02	0.11	0.12	0.19	0.31	0.13	0.03			0.01		0.15	99.98
WNW					0.03	0.07	0.40	2.09	2.12	0.78	0.15	0.02	0.02			0.02	100.00
NW					0.05	0.09											
NNW				0.00	0.01	0.01											
NNE																	
NE																	
ENE																	
f				0.06	4.13	7.58	20.51	45.91	18.42	3.05	0.27	0.04	0.03			100	
f _{acum}				0.06	4.19	11.77	32.27	78.19	96.61	99.66	99.93	99.97	100.00				

NODO 35		PERIODO PEAK [s]														f	f _{acum}
DIRECCION	NAUTA	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+		
E	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+				
ESE																0.20	0.20
SE																10.44	10.64
SSE																64.16	64.80
S			0.01	0.17	0.03											24.08	88.88
SSW			0.06	2.59	2.89	2.16	2.10	0.57	0.06	0.00						2.79	91.67
SW				0.31	1.75	11.04	29.99	10.54	1.35	0.07	0.00					1.72	93.38
WSW				0.00	0.36	6.59	12.70	3.91	0.48	0.03	0.01	0.00				6.04	99.43
W				0.00	0.51	1.62	0.58	0.07	0.00							0.45	99.88
WW				0.04	0.40	0.42	0.31	0.39	0.13	0.03						0.12	100.00
WNW				0.07	0.16	0.38	2.23	2.17	0.84	0.16	0.02	0.03					
NW				0.01	0.16	0.26	0.02										
NNW				0.00	0.06	0.06	0.00										
NNE																	
NE																	
ENE																	
f				0.08	3.41	6.41	22.23	47.02	17.64	2.87	0.29	0.03	0.03			100	
f _{acum}				0.08	3.49	9.90	32.13	79.15	96.79	99.65	99.94	99.97	100.00	100.00			

NODO 37		PERIODO PEAK [s]														f	f _{acum}
DIRECCION	NAUTA	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+		
E	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+				
ESE																0.02	0.02
SE																3.22	3.24
SSE					0.01	0.01										12.37	15.61
S			0.01	1.57	1.50	0.10	0.02	0.01	0.01							46.89	64.30
SSW			0.01	1.02	2.33	4.06	4.03	0.85	0.07	0.01						23.61	87.92
SW				0.02	0.38	10.41	27.24	9.45	1.14	0.05	0.00					4.66	92.58
WSW				0.01	0.45	6.77	12.41	3.55	0.41	0.03	0.00	0.00				2.49	95.07
W				0.02	0.53	2.63	1.39	0.09	0.01							4.00	99.07
WW				0.03	0.60	0.98	0.46	0.28	0.11	0.02						0.66	99.73
WNW				0.10	0.41	0.42	1.11	1.30	0.56	0.09	0.00	0.02				0.27	100.00
NW				0.01	0.24	0.37	0.05										
NNW				0.01	0.14	0.11	0.02										
NNE																	
NE																	
ENE																	
f				0.03	3.16	6.69	25.43	48.66	15.53	2.30	0.18	0.01	0.02			100	
f _{acum}				0.03	3.20	9.88	35.31	81.96	97.49	99.78	99.97	99.98	100.00				

NODO 39		PERIODO PEAK [s]														f	f _{acum}
DIRECCION	NAUTA	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+		
E	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+				
ESE					0.01											0.01	0.01
SE					0.03											0.03	0.03
SSE			0.00	0.02												0.02	0.05
S				0.02												0.02	0.07
SSW			0.01	1.04	0.66	0.12	0.03		0.01							1.77	1.84
SW			0.00	0.64	1.31	3.88	3.36	0.66	0.06	0.00						9.92	11.77
WSW				0.02	0.52	10.55	26.97	8.61	0.99	0.04	0.00					46.80	58.56
W				0.02	0.58	7.87	13.95	3.81	0.43	0.03	0.01	0.00				26.70	85.27
WW				0.02	0.67	3.14	1.87	0.17	0.01							5.88	91.15
WNW				0.00	0.05	0.75	1.42	0.51	0.31	0.11	0.02					3.17	94.31
NW				0.00	0.17	0.62	0.46	1.06	1.24	0.52	0.08	0.02	0.02			4.19	98.50
NNW				0.01	0.29	0.61	0.16									1.07	99.58
N				0.00	0.19	0.19	0.04									0.42	100.00
NNE																	
NE																	
ENE																	
f				0.03	2.52	5.81	27.65	48.85	14.80	2.12	0.17	0.02	0.02			100	
f _{acum}				0.03	2.55	8.37	36.01	82.86	97.66	99.78	99.95	99.98	100.00				

Tabla 27. Tablas de frecuencia dirección media *versus* periodo medio para todos los nodos.

NODO 31		PERIODO MEDIO [s]														f	f acum
DIRECCION	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+			
MEOTA	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+				
E																	
ESE																	
SE																	
SSE																	
S				0.01	0.35	0.02									0.38		
SSW				0.52	17.45	5.13	0.63	0.03							23.75		
SW				0.10	12.71	23.07	12.47	1.97	0.04						51.16		
WSW				0.00	0.69	10.23	9.76	0.68	0.00						21.36		
W				0.01	0.38	1.13	1.00	0.12							2.64		
WNW				0.01	0.33	0.06		0.01							0.40		
MW				0.00	0.17	0.02									0.19		
HNW					0.06	0.00									0.06		
N					0.00										0.00		
NNE																	
NE																	
ENE																	
f				0.65	32.19	40.45	23.86	2.81	0.04								
f acum				0.65	32.83	73.28	97.14	99.96	100.00						100		

NODO 35		PERIODO MEDIO [s]														f	f acum
DIRECCION	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+			
MEOTA	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+				
E																	
ESE																	
SE																	
SSE																	
S				0.00	0.02										0.02		
SSW				0.35	6.91	0.95	0.03	0.00							8.24		
SW				0.30	18.34	17.25	9.32	1.68	0.03						47.00		
WSW				0.01	2.23	16.69	15.51	1.25	0.00						35.69		
W				0.01	0.94	3.47	2.15	0.22							6.78		
WNW				0.03	0.89	0.38	0.01	0.02							1.33		
MW				0.04	0.54	0.11									0.69		
HNW				0.00	0.16	0.04									0.21		
N					0.02	0.01									0.03		
NNE																	
NE																	
ENE																	
f				0.62	30.05	38.91	27.01	3.17	0.04								
f acum				0.62	30.87	69.78	96.79	99.96	100.00						100		

NODO 37		PERIODO MEDIO [s]														f	f acum
DIRECCION	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+			
MEOTA	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+				
E																	
ESE																	
SE																	
SSE					0.01										0.01		
S				0.02	0.51	0.02									0.55		
SSW				0.22	11.07	2.97	0.43	0.05	0.01		0.00				14.75		
SW				0.06	7.29	15.62	10.97	1.99	0.02						35.96		
WSW				0.01	2.10	17.41	14.36	1.09	0.00						34.97		
W				0.01	1.95	5.46	1.72	0.08							9.22		
WNW				0.02	1.74	1.01	0.02								2.79		
MW				0.04	0.89	0.34	0.00								1.26		
HNW				0.02	0.33	0.09									0.43		
N				0.00	0.05	0.02									0.07		
NNE																	
NE																	
ENE																	
f				0.40	25.92	42.94	27.49	3.21	0.03		0.00						
f acum				0.40	26.32	69.26	96.76	99.97	100.00	100.00	100.00				100		

NODO 39		PERIODO MEDIO [s]														f	f acum
DIRECCION	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+			
MEOTA	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	+				
E																	
ESE																	
SE																	
SSE					0.01										0.01		
S					0.04										0.04		
SSW				0.01	0.34	0.00									0.34		
SW				0.18	6.87	1.58	0.38	0.04							9.05		
WSW				0.03	6.33	13.79	9.90	1.66	0.03						31.82		
W				0.01	2.76	20.22	15.78	1.16	0.00						39.92		
WNW				0.02	2.77	7.23	2.17	0.07							12.26		
MW				0.03	2.28	1.52	0.03								3.86		
HNW				0.04	1.23	0.55	0.00								1.82		
N				0.02	0.49	0.21									0.73		
NNE				0.00	0.11	0.03									0.14		
NE																	
ENE																	
f				0.34	23.23	45.13	26.35	2.93	0.03								
f acum				0.34	23.57	68.70	97.04	99.97	100.00						100		

Tabla 28. Valores máximos y mínimos de las series mensuales de cada parámetro (a) y diferencia entre máximos y mínimos (rango) de cada serie (b).

a)	Promedio Mensual									
	H _s [m]		T _p [s]		T _m [s]		Dir _p [°]		Dir _m [°]	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Latitud										
31°S	3.19	1.68	14.35	10.95	10.61	7.39	289.15	209.25	254.75	209.39
35°S	3.56	1.69	14.42	10.97	10.59	7.20	288.07	218.84	268.99	217.88
37°S	3.98	1.97	14.06	10.63	10.70	7.22	268.29	213.81	269.52	215.59
39°S	4.23	1.98	13.91	10.69	10.57	7.30	270.27	216.53	276.61	222.56

	Desviación Estándar Mensual									
	H _s [m]		T _p [s]		T _m [s]		Dir _p [°]		Dir _m [°]	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Latitud										
31°S	1.13	0.34	3.64	0.74	2.21	0.83	49.35	3.62	34.27	6.21
35°S	1.53	0.39	3.77	0.63	2.05	0.75	48.34	4.73	39.94	5.31
37°S	1.48	0.46	3.28	0.69	2.21	0.88	48.44	4.37	42.13	9.66
39°S	1.56	0.44	3.14	0.72	2.14	0.83	49.05	4.83	42.95	9.21

b)	Promedio Mensual					Desviación Estándar Mensual				
	H _s [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]	H _s [m]	T _p [s]	T _m [s]	Dir _p [°]	Dir _m [°]
Latitud										
31°S	1.51	3.40	3.22	79.90	45.36	0.79	2.90	1.38	45.73	28.06
35°S	1.87	3.45	3.39	69.23	51.11	1.14	3.14	1.30	43.60	34.63
37°S	2.01	3.43	3.47	54.48	53.93	1.02	2.59	1.33	44.07	32.48
39°S	2.25	3.23	3.27	53.75	54.06	1.12	2.42	1.31	44.22	33.74