



Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

# **INFLUENCIA DEL MODO ANULAR AUSTRAL SOBRE EL OLEAJE INCIDENTE EN LAS COSTAS DE CHILE.**

**Marcelo Andrés Godoy Apablaza**

Junio 2018

# **APROBACIÓN**

## **INFLUENCIA DEL MODO ANULAR AUSTRAL SOBRE EL OLEAJE INCIDENTE EN LAS COSTAS DE CHILE.**

Marcelo Andrés Godoy Apablaza

### **COMISIÓN REVISORA**

### **NOTA**

### **FIRMA**

Dra. Catalina Aguirre Galaz  
Profesora guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Claudia Pincheira Araya  
Meteoróloga SERVIMET

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Mauricio Molina Pereira  
Ingeniero Civil Oceánico

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## **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 renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

---

Marcelo Godoy Apablaza

---

Catalina Aguirre Galaz

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera expresar mis sinceros agradecimientos a:

Mis padres Andrea y Marcelo por su amor incondicional y su constante esfuerzo por nuestra familia, por creer en mí en todo momento, y por todo lo que han hecho para hacer de mi cada día alguien mejor. Espero hacerlos sentir orgullosos.

Gracias a mis hermanos, Diego, Yoshua y Martina por acompañarme siempre en cada etapa de este viaje y por poder tenerlos cerca.

Gracias a mi novia Vanessa por mantener siempre su alegría y apoyarme durante toda mi carrera, por inspirarme a ser alguien mejor y ser una gran compañera de vida.

Gracias a mi profesora guía Catalina Aguirre quien en todo momento tuvo la mejor disposición a mis preguntas, por su dedicación, tiempo y por compartir conmigo su pasión por la investigación. Sin duda este trabajo y gran parte de lo que he aprendido ha sido exitoso gracias a ella. Siempre le estaré agradecido.

Finalmente gracias a todas las personas que de una u otra manera han colaborado con la realización de esta memoria, especialmente a quienes que con sus comentarios o sugerencias han mejorado este trabajo.

*Con todo mi amor y cariño a mis padres y hermanos.*

*Lo único imposible es aquello que no intentas.*

# **CONTENIDOS**

RESUMEN.....	.xii
ABSTRACT.....	xiii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 OBJETIVOS Y ALCANCES.....	3
3 FUNDAMENTO TEÓRICO.....	5
3.1 ANTECEDENTES GENERALES .....	5
3.2 ANTECEDENTES DEL MODO ANULAR AUSTRAL.....	6
3.3 CARACTERIZACIÓN DEL MODO ANULAR AUSTRAL.....	9
3.4 RELACIÓN ENTRE EL MODO ANULAR AUSTRAL Y LOS SISTEMAS ATMOSFÉRICOS DEL HEMISFERIO SUR .....	11
3.5 RELACIÓN ENTRE EL MODO ANULAR AUSTRAL Y EL CLIMA DE OLEAJE DEL HEMISFERIO SUR .....	13
4 METODOLOGÍA.....	17
4.1 FUENTES DE INFORMACIÓN.....	17
4.2 PROCESAMIENTOS DE LOS DATOS.....	20
5 RESULTADOS .....	25
5.1 ÍNDICE SAM .....	25
5.2 CLIMATOLOGÍAS.....	26
5.2.1 PARAMETROS ATMOSFÉRICOS.....	27
5.2.2 PARAMETROS DE RESUMEN.....	27
5.2.3 ESPECTROS DE OLEAJE.....	30
5.3 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ESTACIONAL.....	31
5.3.1 PARAMETROS ATMOSFÉRICOS.....	31
5.3.2 PARAMETROS DE RESUMEN.....	32
5.4 POTENCIA DEL OLEAJE .....	34
5.5 ANÁLISIS DE COMPUESTO .....	36
5.5.1 PARAMETROS ATMOSFÉRICOS.....	36
5.5.2 PARAMETROS DE RESUMEN.....	38
5.5.3 DATOS ESPECTRALES.....	42
5.6 CLIMA EXTREMO.....	44
5.6.1 RESULTADOS DISTRIBUCIÓN GEV .....	44

5.6.2	ANALISIS DE COMPUESTO DISTRIBUCIÓN GEV. ....	45
5.6.3	DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD FRENTE A LAS COSTAS DE CHILE.....	49
5.6.4	TRAYECTORIAS DE CICLONES EXTRATROPICALES DEL HEMISFERIO SUR.....	51
6	DISCUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....	54
7	CONCLUSIONES.....	56
8	REFERENCIAS.....	59
9	ANEXOS.....	65

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 3-1. Ubicación geográfica de alguno de los indicadores climáticos más estudiados	5
Figura 3-2. El Mapa muestran el mar de Amundsen-Bellingshausen en la región del Océano Austral. Las ubicaciones de los mares Bellingshausen, Amundsen y Ross están marcados, así como la barrera de hielo de Ross, las regiones de Ellsworth Land y Marie Byrd Land, West Antarctica, y la Península Antártica	6
Figura 3-3. Valores estacionales del índice SAM desarrollado por Marshall (2003). La curva negra muestra las variaciones decenales	9
Figura 3-4. Esquema explicativo en las fases opuestas del SAM. En colores se muestran las anomalías de presión a nivel medio del mar y con flechas se representa el fortalecimiento o debilitamiento en los vientos superficiales	10
Figura 3-5. Análisis de compuesto en la densidad de ciclones considerando la diferencia entre las fases positivas, negativas y neutras del SAM. Los valores estadísticamente significativos con un 90% de confianza están limitados por líneas negras	13
Figura 3-6. Mapas de correlación estacional hs con el Índice SAM para verano (DJF); Otoño (MAM); Invierno (JJA) y Primavera (SON). La correlación significativa positiva o negativa (con 95% del nivel de confianza) están limitadas por una línea negra sólida	15
Figura 3-7. Correlación entre las anomalías mensuales de hs y el índice SAM. Las áreas sombreadas indica una correlación significativa con un 95% de nivel de confianza	15
Figura 4-1. La salida de los datos espectrales frente a la costa de Chile aparece indicada con cuadrados azules, mientras que los puntos extraídos frente a la costa aparecen con círculos rojos	18
Figura 4-2. Ejemplo de salida de Hs [m] para los datos de altimetría satelital frente a la costa de Chile	19
Figura 4-3. Valores mensuales del índice SAM, calculado utilizando presión a nivel medio del mar NCEP CFSR	20
Figura 4-4. Ilustración de (a) los parámetros del ciclón y (b) determinación del radio	24
Figura 5-1. Correlación del índice SAM calculado utilizando NCEP CFSR y Marshall (2003)	26
Figura 5-2. Correlación de la PNM zonal a los 40° y 65°S en los datos derivados del índice SAM calculado utilizando NCEP CFSR y Marshall (2003)	26
Figura 5-3. Climatología de la PNM utilizando NCAR CFSR 1979-2010	27
Figura 5-4. Climatología del viento superficial utilizando NCAR CFSR 1979-2010	27
Figura 5-5. Climatología estacional de hs para Verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON) utilizando RADS (superior) y "CAWCR WAVE HINDCAST" (inferior). Los vectores muestran la dm del oleaje en cada estación	28
Figura 5-6. Climatología estacional de Tm (superior), Tp (inferior) para Verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON) utilizando "CAWCR WAVE HINDCAST" 29	29

Figura 5-7. Climatología estacional Espectro latitud 30°S para Verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON) utilizando “CAWCR WAVE HINDCAST” .....	30
Figura 5-8. Mapa de correlación estacional entre las anomalías mensuales de PNM y el índice SAM. Correlación positiva o negativa (con un 95% de confianza) .....	31
Figura 5-9. Mapa de correlación estacional entre las anomalías mensuales del viento superficial y el índice SAM. Correlación positiva o negativa (con un 95% de confianza)...	31
Figura 5-10. Mapa de correlación entre las anomalías mensuales (384 meses) de hs (superior), Tm (inferior) con el índice SAM. Se muestran las áreas con una correlación de un 95% de confianza .....	32
Figura 5-11. Mapa de correlación estacional entre las anomalías mensuales de hs y el índice SAM. base de datos RADS (superior), “CAWCR WAVE HINDCAST” (inferior). Se muestran las áreas con una correlación positiva de un 95% de confianza .....	33
Figura 5-12. Mapa de correlación estacional entre las anomalías mensuales de Tm (superior), Tp (inferior) y el índice SAM. utilizando “CAWCR WAVE HINDCAST”. Se muestran las áreas con una correlación positiva de un 95% de confianza .....	34
Figura 5-13. Mapa Potencia del oleaje para las fases opuestas del índice SAM. Potencia calculada utilizando “CAWCR WAVE HINDCAST” para el periodo en el que el índice SAM es mayor al 80% (Superior) y menor al 20% (Inferior) .....	35
Figura 5-14. Variación porcentual en la potencia del oleaje entre las fases opuestas del SAM .....	36
Figura 5-15. Mapa análisis de compuestos estacional en las anomalías de PNM para Verano (DEF); Otoño (MAM); Invierno (JJA); Primavera (SON). Anomalías de PNM para el periodo en que el índice SAM CFSR es mayor al 80% (Superior) y menor al 20% (Inferior) .....	37
Figura 5-16. Mapa análisis de compuestos estacional en las anomalías del viento superficial para el periodo en que el índice SAM CFSR es mayor al 80% (Superior) y menor al 20% (Inferior) .....	37
Figura 5-17. Mapa análisis de compuesto estacional en las anomalías de hs para las fases opuestas del índice SAM. Anomalías de hs calculadas utilizando “CAWCR WAVE HINDCAST” para el periodo en el que el índice SAM CFSR es mayor al 80% (Superior) y menor al 20% (Inferior) .....	39
Figura 5-18. Mapa análisis de compuesto estacional en las anomalías de Tm para las fases opuestas del índice SAM. Anomalías de Tm calculadas utilizando “CAWCR WAVE HINDCAST” para el periodo en el que el índice SAM CFSR es mayor al 80% (Superior) y menor al 20% (Inferior) .....	40
Figura 5-19. Mapa análisis de compuesto estacional en las anomalías de Tp para las fases opuestas del índice SAM. Anomalías de Tp calculadas utilizando “CAWCR WAVE HINDCAST” para el periodo en el que el índice SAM CFSR es mayor al 80% (Superior) y menor al 20% (Inferior) .....	41
Figura 5-20. Análisis de compuesto espectral (m <sup>2</sup> ) latitud 30°S para el periodo en que el índice SAM es mayor al 80%. (izquierda) y menor al 20% (derecha) .....	43

Figura 5-21. Distribución estacional parámetro de localización ( $\mu_0$ ) del ajuste GEV en la altura de olas extremas obtenido de CSIRO “CAWCR WAVE HINDCAST” .....	45
Figura 5-22. Distribución estacional parámetro de escala ( $\sigma_0$ ) del ajuste GEV en la altura de olas extremas obtenido de CSIRO “CAWCR WAVE HINDCAST” .....	45
Figura 5-23. Parámetro de localización ( $\mu_0$ ) para el periodo en que el índice SAM CFSR es mayor al 80% (superior) y menor al 20% (inferior) del índice SAM .....	46
Figura 5-24. Análisis de compuesto en la variación porcentual en los extremos estacionales de la altura de olas extremas para el parámetro de localización ( $\mu_0$ ) .....	47
Figura 5-25. Parámetro de escala ( $\sigma_0$ ) para el periodo en que el índice SAM CFSR es mayor al 80% (superior) y menor al 20% (inferior) del índice.....	48
Figura 5-26. Análisis de compuesto en la variación porcentual en los extremos estacionales de la altura de olas extremas para el parámetro de escala ( $\sigma_0$ ) .....	49
Figura 5-27. Función de probabilidad de altura significativa frente a Chile central. Valor P entre las fases opuestas del SAM para la serie cada 3 horas (Ps1) y la serie con los máximos mensuales (Ps2) .....	50
Figura 5-28. Climatología con la densidad de los sistemas (número promedio de sistemas encontrados por análisis en un área de $10^3$ (grados latitud) <sup>2</sup> ) presentes sobre el hemisferio sur. ....	52
Figura 5-29. Mapa con la densidad de los sistemas (número promedio de sistemas encontrados por análisis en un área de $10^3$ (grados latitud) <sup>2</sup> ) para los meses de invierno. A) periodo en que el índice SAM es mayor al 80%, B) menor al 20% .....	53
Figura 5-30. Diferencia entre las fases opuestas del SAM (SAM positivo-SAM negativo).53	
Figura 9-1. Climatología estacional Espectro latitud 10°S para Verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON) utilizando “CAWCR WAVE HINDCAST” .....	65
Figura 9-2. Climatología estacional Espectro latitud 20°S para Verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON) utilizando “CAWCR WAVE HINDCAST” .....	66
Figura 9-3. Climatología estacional Espectro latitud 40°S para Verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON) utilizando “CAWCR WAVE HINDCAST” .....	67
Figura 9-4. Climatología estacional Espectro latitud 50°S para Verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON) utilizando “CAWCR WAVE HINDCAST” .....	68
Figura 9-5. Análisis de compuesto estacional en las anomalías de hs para las fases opuestas del índice SAM para el periodo en el que el índice SAM CFSR es mayor al 80% (Izquierda) y menor al 20% (Derecha).....	69
Figura 9-6. Análisis de compuesto espectral ( $m^2$ ) latitud 10°S para el periodo en que el índice SAM es mayor al 80%. (izquierda) y menor al 20% (derecha) .....	70
Figura 9-7. Análisis de compuesto espectral ( $m^2$ ) latitud 20°S para el periodo en que el índice SAM es mayor al 80%. (izquierda) y menor al 20% (derecha) .....	71
Figura 9-8. Análisis de compuesto espectral ( $m^2$ ) latitud 40°S para el periodo en que el índice SAM es mayor al 80%. (izquierda) y menor al 20% (derecha) .....	72

Figura 9-9. Análisis de compuesto espectral ( $m^2$ ) latitud $50^\circ S$ para el periodo en que el índice SAM es mayor al 80%. (izquierda) y menor al 20% (derecha) .....	73
Figura 9-10 Función de probabilidad de altura significativa frente al norte de Chile. Valor P entre las fases opuestas del SAM para la serie cada 3 horas ( $Ps_1$ ) y la serie con los máximos mensuales ( $Ps_2$ ) .....	74
Figura 9-11. Función de probabilidad de altura significativa frente al sur de Chile. Valor P entre las fases opuestas del SAM para la serie cada 3 horas ( $Ps_1$ ) y la serie con los máximos mensuales ( $Ps_2$ ) .....	75

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 7-1: RESUMEN.....	56
-------------------------	----

## **RESUMEN**

En este trabajo se analizan los impactos de la oscilación climática del Modo Anular Austral (SAM) sobre el clima de oleaje incidente en las costas de Chile. El SAM es el modo dominante de la variabilidad atmosférica entre latitudes extratropicales y altas del hemisferio sur. Los cambios en él, afectan la fuerza y posición en el cinturón de los vientos del Oeste, junto con la trayectoria de las tormentas y la densidad de los sistemas ciclónicos sobre el hemisferio sur. Los vientos del Oeste constituyen un importante sistema de circulación global que domina la dinámica del clima a latitudes medias y corresponden a la principal área de generación del oleaje que se propaga hasta las costas de Chile. Para el desarrollo de este estudio se utilizaron datos derivados de Altimetría satelital (RADS), datos espectrales y parámetros de resumen de la base de datos "CAWCR Wave hindcast 1979-2010" desarrollada por la oficina australiana de meteorología y CSIRO. Se estudió la influencia del SAM sobre la variabilidad del oleaje en el hemisferio sur, con un énfasis regional y estacional, con especial atención en las costas de Chile, utilizando herramientas estadísticas como análisis de correlación y análisis de compuesto entre el índice SAM y las anomalías en los campos atmosféricos superficiales, parámetros de resumen del oleaje y datos espectrales. Además, se presenta un análisis de la variabilidad espacial y temporal de las alturas significativas máximas de las olas a nivel mensual utilizando un modelo estadístico basado en la distribución de valores extremos (GEV). Finalmente, se presenta un análisis entre el SAM y la distribución espacial de los sistemas ciclónicos presentes sobre el hemisferio sur, utilizando el software cyclone tracking scheme desarrollado por Murray y Simmonds (1991 y documentos posteriores) de la universidad de Melbourne.

Los resultados del análisis de correlación muestran una relación significativa y además positiva entre las anomalías mensuales de la altura significativa y el índice SAM, particularmente durante los meses de invierno y primavera. Esta correlación se asocia con un aumento de la altura y período del oleaje de mar de fondo (swell) en el océano Pacífico, extendiéndose hacia latitudes medias y bajas, e incluso hacia el hemisferio norte debido a la propagación del oleaje. El análisis de compuesto en las anomalías de altura significativa confirma que existe una fuerte relación en ambas fases del SAM. Los resultados muestran que la altura de ola significativa aumenta progresivamente con una fuerte variación latitudinal hacia el extremo sur del país, debido a la intensificación en las tormentas y el fortalecimiento en los vientos del Oeste hacia el sur. Durante la fase positiva existe un incremento superior a los 80 [cm] en promedio en el océano Austral, mientras que para las costas de Chile central la influencia de la señal promedio es del orden de los 40 a 60 [cm]. Por el contrario, durante la fase negativa existe una disminución en promedio a 20-40 [cm] de las alturas significativas. Lo cual es consistente con el aumento en el gradiente de presión hacia altas latitudes y el debilitamiento en los vientos del Oeste.

La potencia del oleaje frente a Chile central es en promedio 100 a 120 [kW/m] durante una fase positiva del SAM, mientras que en la zona sur la potencia del oleaje es de aproximadamente 140 a 170 [kW/m]. Por otra parte, durante las fases negativas del SAM el flujo de energía disminuye considerablemente en magnitud, presentando una energía promedio entre 40 a 80 [kW/m] frente a Chile central, mientras que, en la zona sur se observan valores entorno a los 80 a 100 [kW/m]. Estas diferencias entre ambas fases del

SAM permiten explicar cerca de un 30 - 40% de la variabilidad interanual en la potencia frente a la costa de Chile central, mientras que en la zona sur hasta un 60% durante invierno.

Un análisis de compuesto de los datos espectrales del oleaje (un punto frente a las costas de Perú y otros cuatro frente a las costas de Chile) revela que el SAM influye sobre la energía del oleaje de mar de fondo que proviene del Suroeste, como también lo hace sobre el oleaje generado por el viento local.

Los resultados del análisis de clima extremo, revelan que el promedio en la altura de ola significativa extrema aumenta progresivamente hacia altas latitudes, encontrando valores promedios durante todo el año. Durante el verano, esta altura de ola es ligeramente menor a los 7 [m], mientras que en el resto del año supera los 8 [m] en altas latitudes. El SAM en el océano Austral puede explicar durante los meses de verano e invierno austral diferencias de un 10% en la altura de ola significativa extrema frente a las costas de Chile central y entre un 10% a un 20% al sur de los 50°S en todas las estaciones.

## **ABSTRACT**

This paper analyzes the impacts of the climate oscillation of Southern Annular Mode (SAM) on the wave climate incident on the coasts of Chile. SAM is the dominant mode of atmospheric variability between extratropical and high latitudes of the southern hemisphere. Changes in it affect the strength and position in the belt of the West winds, along with the trajectory of storms and the density of cyclonic systems over the southern hemisphere. West winds constitute an important system of global circulation who dominates the climate dynamics at middle latitudes and correspond to the main wave generation area that spreads to the coasts of Chile.

For this study's development, data derived from Satellite Altimetry (RADS), spectral data and summary parameters of the database "CAWCR Wave hindcast 1979-2010" developed by the Australian Bureau of Meteorology and CSIRO were used. The influence of the SAM on the variability of weather in the southern hemisphere was studied, with emphasis on regional and seasonal, with special attention on the coasts of Chile, using statistical tools such as correlation analysis and composite analysis between the SAM index and anomalies in surface atmospheric fields, wave summary parameters and spectral data. In addition, an analysis of the spatial and temporal variability of the maximum significant wave heights at monthly level is presented using a statistical model based on the distribution of extreme values (GEV). Finally, an analysis is presented between the SAM and the spatial distribution of the cyclonic systems present in the southern hemisphere, using the automatic cyclone tracking scheme developed by Murray and Simmonds (1991, and subsequent papers) of the University of Melbourne.

The results of the correlation analysis show a significant and positive relationship between the monthly anomalies of the significant height and the SAM index, particularly during the winter and spring months. This correlation is associated with an increase in swell wave heights and period in the Pacific Ocean, extending even towards mid and low latitudes, even towards the northern hemisphere due to wave propagation. The Composite Analysis in the anomalies of significant height confirms that there is a strong relationship in both phases of the SAM. The results show that the significant wave height increases progressively with a strong latitudinal variation towards higher latitudes, due to the

intensification in the storms and the strengthening in the winds from the west to the south. During the positive phase there is an increase of more than 80 [cm] on average in the Southern Ocean, while for the central coasts of Chile the influence of the average signal is of the order of 40 to 60 [cm]. On the other hand, during the negative phase there is a decrease on average to 20-40 [cm] of the significant heights. This is consistent with the increase in the pressure gradient towards high latitudes and the weakening of the western winds. The wave power facing central Chile is on average 100 to 120 [kW/m] during a positive phase of the SAM, while in the south zone the wave power is approximately 140 to 170 [kW/m]. On the other hand, during the negative phases of the SAM the flow of energy decreases considerably in magnitude, presenting an average energy between 40 to 80 [kW/m] facing central Chile, meanwhile, in the southern zone, values go around 80 a 100 [kW/m]. These differences between the two phases of the SAM allow 30-40% of the interannual variability in the power off the coast of central Chile, while in the southern zone up to 60% during winter.

A composite analysis of the wave's spectral data (one point off the coast of Peru and another four off the coast of Chile) reveals that the SAM influences the wave energy of the bottom sea coming from the Southwest, as it does over the waves generated by the local wind.

The results of the extreme climate analysis reveal that the average intensity in the wave height significantly increases progressively towards high latitudes, finding intense average values throughout the year. During the summer, the significant wave height extreme is slightly less than 7 [m], while in the rest of the year it exceeds 8 [m] at high latitudes. The SAM in the Southern Ocean can explain during the summer and southern winter months' differences of 10% in the significant wave height extreme off the coasts of central Chile and between 10% to 20% south of the 50° S in all seasons.