



## CAMBIO CLIMÁTICO CONTEMPORÁNEO Y UNA CONJETURA SOBRE LA RELACIÓN ANTÁRTICA - SUDAMÉRICA A TRAVÉS DEL OLEAJE

CONTEMPORARY CLIMATE CHANGE AND CONJECTURE ABOUT THE RELATIONSHIP ANTARCTIC - SOUTH AMERICA THROUGH THE WIND WAVES

**M. Sc. Manuel Contreras López\***

Universidad de Playa Ancha  
Valparaíso – Chile  
Manuel.contreras@upla.cl

**Mg. GE. Jimmy Cevallos Zambrano\*\***

Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí  
Manta – Ecuador  
jimmycev@hotmail.com

**FECHA DE RECEPCIÓN:** 12 octubre 2013 – **FECHA DE ACEPTACIÓN:** 20 noviembre 2013

**RESUMEN:** El objetivo de este trabajo es ilustrar algunos de los efectos del cambio climático contemporáneo sobre el territorio Antártico, que podrían explicar los drásticos cambios que se evidencian en Isla Greenwich, en el entorno de la estación científica ecuatoriana Pedro Vicente Maldonado. Uno de estos efectos sería el cambio de posición de la zona de generación de oleaje de fondo del sur. Este cambio en la posición de la zona de generación es consistente con el cambio de dirección del oleaje incidente en Chile central y Galápagos, lo que es verificado mediante el análisis de series de tiempo de 19 años de extensión de oleaje reconstruido.

**PALABRAS CLAVES:** Palabras Claves: Calentamiento global – El Niño – Oscilación Sur – Oleaje de Fondo – Isla Greenwich

**ABSTRACT:** The aim of this paper is to illustrate some of the effects of contemporary climate change on the Antarctic territory, which could explain the drastic changes that are evident in Greenwich Island in the vicinity of the base summer Ecuatorian Pedro Vicente Maldonado. One of these effects is the change in position of generation area of southern swell. This change in the position of the generation area is consistent with the change in direction of the incident swell in central Chile and the Galapagos Islands, which is verified by analyzing time series of 19-year extension of reconstructed wind waves.

**KEY WORDS:** Global Warming – El Niño – Southern Oscillation – Swell – Greenwich Island

---

\* **Correspondencia:** Manuel Contreras López. Universidad de Playa Ancha, Facultad de Ingeniería – Centro de Estudios Avanzados. Traslaviña n° 450, Viña del Mar, Chile.

\*\* **Correspondencia:** Jimmy Cevallos Zambrano. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Departamento de Medio Ambiente. Vía San Mateo s/n, Manta, Ecuador.

**Proyecto INAE – SENESCYT N° I-05-12:** “Relaciones de Procesos Físicos del Calentamiento Global y Cambio Climático entre la Antártica y el Ecuador”. Instituto Antártico Ecuatoriano - Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, Ecuador.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático contemporáneo se ha transformado en la causa central de diversos efectos ambientales, económicos y sociales que afectan al planeta y sus diversas regiones.<sup>1</sup> Sin embargo recién se comienzan a establecer y comprender las teleconexiones y relaciones que se pueden generar entre diversas localidades del planeta.

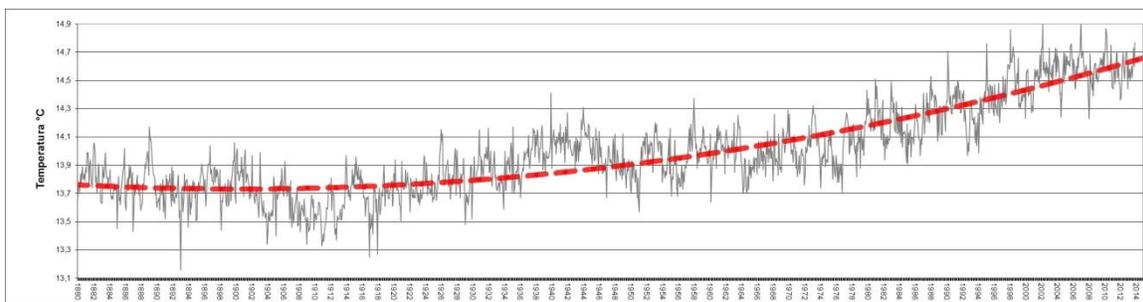
El efecto del cambio climático global es particularmente notorio en la Antártica. La evidencia instrumental muestra que el calentamiento atmosférico contemporáneo, en la península Antártica adquiere tendencias singulares con respecto a otras regiones del planeta, siendo uno de los tres puntos con mayor gradiente de temperatura.<sup>2</sup> Dado que el clima antártico modela en gran medida el clima global, estos cambios deben tener repercusiones en el continente Sudamericano. Por otra parte, en el pasado la Antártica fue un continente verde, con una biodiversidad no muy diferente a la que presentan actualmente Nueva Zelandia, Argentina o Chile. La separación de Sudamérica de la Antártica fue un evento que transformó el clima global, condicionando la vida, el ambiente y el paisaje de Sudamérica y en particular de Chile y Ecuador. Los severos efectos productos de los cambios paleoclimáticos y sus evidentes relaciones en el litoral del Pacífico Sur Oriental (PSO), motivan a preguntar sobre los efectos y relaciones que se pueden encontrar entre la Antártica y el litoral del PSO con el cambio climático contemporáneo.

El objetivo del presente trabajo es contextualizar los efectos del cambio climático contemporáneo en la Antártica y explorar las conexiones existentes Antártica y Sudamérica productos del calentamiento global.

## 2. CAMBIO CLIMÁTICO CONTEMPORÁNEO

La evidencia instrumental muestra el aumento de la temperatura del planeta en los últimos treinta y cuatro años (Gráfico n° 1), y es sumamente probable que la influencia humana haya sido la causa dominante de este calentamiento observado desde mediados del siglo XX.

GRÁFICO N° 1



CAMBIOS EN LA TEMPERATURA MEDIA DEL PLANETA Y ANOMALÍA DE LA MISMA, DESDE EL AÑO 1880 HASTA NOVIEMBRE DE 2013. SE PUEDE APRECIAR COMO EN 130 AÑOS, EL PLANETA HA AUMENTADO SU TEMPERATURA EN 0,8° C.

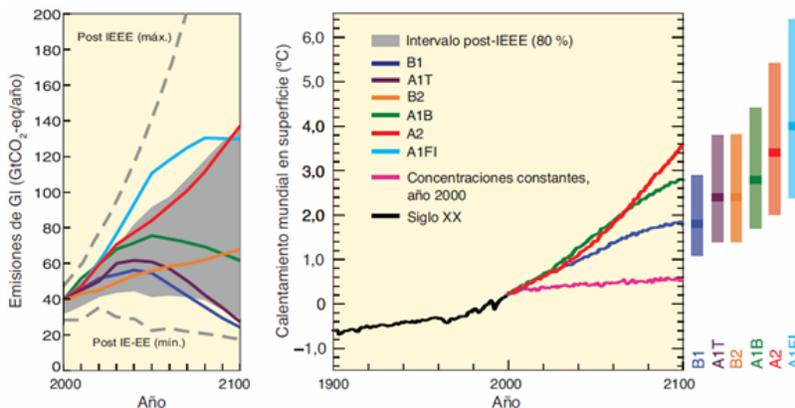
Fuente: National Aeronautics and Space Administration.

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 gases de efecto invernadero (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 Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), en el año 2000<sup>3</sup>, que presenta distintos escenarios agrupados en cuatro familias ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ) 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 resumen a continuación:

1.  $A_1$ : 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 ( $A_1F_1$ ), energías de origen no fósil ( $A_1T$ ), y equilibrio entre las distintas fuentes ( $A_1B$ ).
2.  $B_1$ : Describe un mundo convergente, con la misma población mundial que  $A_1$ , pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información.
3.  $B_2$ : 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.  $A_2$ : Describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento, y cambio tecnológico lento.

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 ( $B_1$  y  $A_1T$ ) hasta escenarios en la que las emisiones son el triple del que se presenta en la actualidad ( $A_2$ ), estos escenarios implican que en los casos extremos la temperatura media del planeta se incrementará entre  $1.8^{\circ}\text{C}$  y  $3.6^{\circ}\text{C}$  para los escenarios  $B_1$  y  $A_2$  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 se elevará, pero hasta  $0.5^{\circ}\text{C}$  respecto del nivel actual. De esta forma, independientemente del escenario considerado, el calentamiento global seguirá actuando hasta un nivel que aún no podemos precisar.

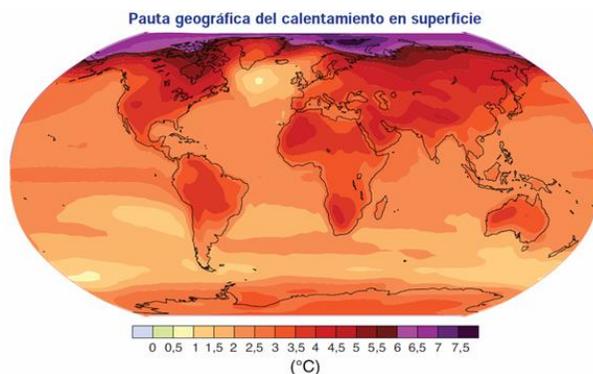
## GRÁFICO N° 2



ESCENARIOS DE EMISIONES DE GEI DE 2000 A 2100 Y PROYECCIONES DE LA TEMPERATURA.  
**Fuente:** Intergovernmental Panel on Climate Change.

Si consideramos el escenario de un crecimiento económico mundial muy rápido con un máximo de la población mundial hacia el año 2050, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes, con un equilibrio entre las fuentes de energía fósil y renovables no convencionales (escenario A<sub>1</sub>B), se puede esperar un aumento de hasta 3°C en el PSO sobre la línea ecuatorial, con respecto a la temperatura media del planeta entre los años 1980 y 1999. En la zona frente a Chile central, este incremento es de 1 a 1.5°C, para superar los 3.5°C en el entorno de la península Antártica (Mapa n° 1). Estas variaciones son menores que las pronosticadas en el hemisferio norte debido principalmente a la menor proporción de tierra presente en el hemisferio sur. Además las grandes masas de agua del PSO, en conjunto con el continente Antártico, actuarían como un amortiguador de las diferencias de temperatura. Sin embargo, es interesante observar lo que ocurriría con la corriente y contra corriente ecuatorial en el océano Pacífico, donde la temperatura se elevaría al menos medio grado con respecto a las masas de agua vecinas, lo que alteraría el desarrollo de fenómenos que inciden en la variabilidad climática global, como es el caso de El Niño – Oscilación Sur.

## MAPA N° 1



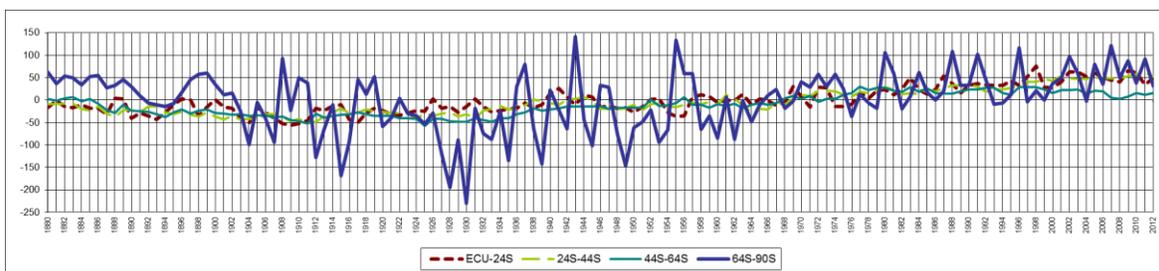
CAMBIOS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL MUNDIAL PROYECTADOS PARA FINALES DEL SIGLO XXI (2090-2099) RESPECTO AL PERIODO 1980-1999 PARA EL ESCENARIO A<sub>1</sub>B.  
**Fuente:** Intergovernmental Panel on Climate Change.

### 3. CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ANTÁRTICA

La península Antártica es una de las regiones más fuertemente afectadas por el cambio climático, al experimentar un aumento en las temperaturas atmosféricas hasta seis veces superiores al promedio mundial observado en las últimas décadas.<sup>4</sup> En la figura 4 se comparan la evolución de las anomalías de temperatura entre los años 1980 y 2013 con respecto a la media de los años 1951-1980. Estas anomalías son calculadas en cuatro bandas del hemisferio sur: 0° - 24°S (Ecuador a Antofagasta), 24° - 44°S (Antofagasta a Chiloé), 44°S - 64°S (Chiloé a la península Antártica) y 64°S - 90°S (península Antártica al Polo Sur). La inspección del gráfico tiempo dependiente de las anomalías comparadas (Gráfico n° 3), revela que: 1) la banda comprendida entre Ecuador y Antofagasta presenta una anomalía oscilante mayor que las bandas comprendidas entre Antofagasta y la península Antártica; y 2) la banda que comprende la península Antártica y el polo Sur presenta un comportamiento cíclico irregular con amplitudes 15 veces mayor a las bandas anteriores, especialmente en la primera mitad del siglo XX: Actualmente, aunque se ha reducido la amplitud de la anomalía, esta es bastante mayor que la presente en las otras bandas.

Esto ha generado alteraciones que no se habían registrado en los últimos 10 mil años, tanto en los glaciares de la región como en sus ecosistemas. Recientemente, la Agencia Espacial Canadiense (CSA), la europea (ESA) y la japonesa (JAXA), publicaron un mapa con los detalles del movimiento del hielo en la Antártica entre los años 2007 y 2009, a partir de un mosaico digital con imágenes satelitales proporcionadas por las agencias mencionadas.<sup>5</sup> Este mapa muestra el importante retroceso de los hielos y aceleración de este proceso en los últimos años. Por otra parte, el océano Austral es el único cuyas aguas rodean todo el globo, lo cual es un elemento crucial para el motor calórico mundial. Los fuertes vientos, las bajas temperaturas y la dinámica del hielo marino antárticos, conducen patrones de corrientes que influyen fuertemente el clima de la Tierra.<sup>6</sup>

GRÁFICO N° 3



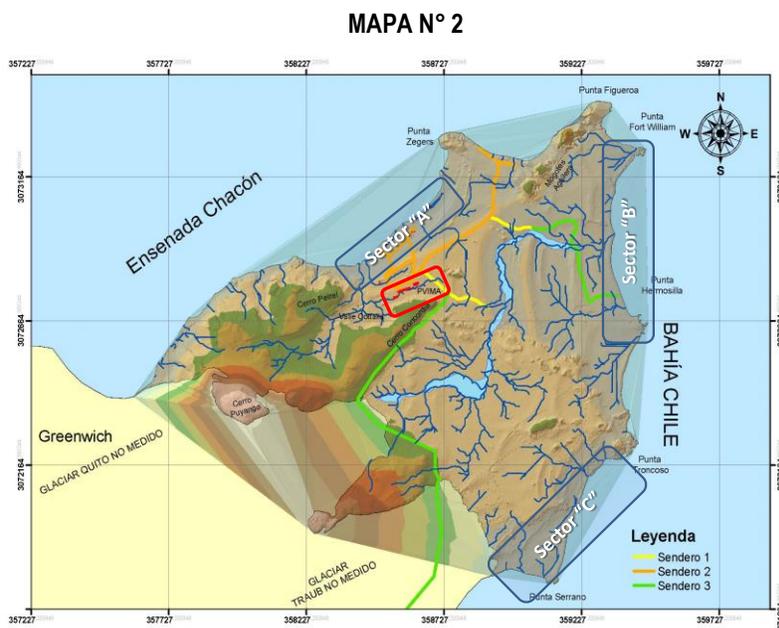
ANOMALÍA DEL ÍNDICE DE TEMPERATURA EN EL HEMISFERIO SUR, SECTORIZADO EN LOS PARALELOS: 0° - 24°S, 24° - 44°S, 44°S - 64°S Y 64°S - 90°S. SE PUEDE APRECIAR QUE LA ANOMALÍA DE TEMPERATURA SE INCREMENTA SEVERAMENTE EN LA ANTÁRTICA (64°S - 90°S) CON RESPECTO A LAS OTRAS LATITUDES.

Fuente: National Aeronautics and Space Administration.

Los cambios experimentados en el continente Antártico en los últimos años, han motivado una serie de estudios, entre los que destaca el reporte “Antarctic Climate Change and the Environment”, desarrollado por el comité científico en investigación antártica,<sup>7</sup> donde se analiza el rol del continente antártico en el clima global, la instrumentación y reportes sobre registros y tendencias de diversos parámetros como nivel del mar, biología marina y terrestre, parámetros meteorológicos,

observaciones de hielos marinos, capa de hielo y permafrost, entre otros. Sin embargo, aunque en cerca de 50 párrafos del informe son mencionados o discutidos los efectos e importancia del oleaje marino, este proceso no es considerado como un parámetro para ser analizado en profundidad. Esta omisión resulta peculiar, toda vez que es el oleaje –considerados como ondas de gravedad forzadas por el viento- el proceso que explica la mayor cantidad de energía potencial y variabilidad de la superficie del océano. De esta forma, parece natural establecer que la variabilidad climática y el cambio climático se expresen también en alteraciones sobre la propagación del oleaje. Esto fue verificado en las costas de Chile por Molina (2011) y Molina *et al.* (2011), trabajos donde se establece que uno de los efectos del cambio climático sería la alteración de la dirección de incidencia del oleaje. Esto significa en la práctica que en el futuro cercano se espera un cambio en los delicados equilibrios hidrodinámicos que sustentan las formaciones de playas, zonas de erosión costera, lugares de convergencia o dispersión de sedimentos, tasas de sedimentación, entre otros<sup>8</sup>, a lo largo de la costa del litoral del PSO.<sup>9</sup> Resultados similares han sido obtenidos también en Australia.<sup>10</sup>

En la base de verano ecuatorial Pedro Vicente Maldonado, se realizaron durante las temporadas estivales del año 2012 y 2013, campañas en terreno para constatar cambios en Punta Fort William, Isla Greenwich, con una metodología semi cuantitativa.<sup>11</sup> En la figura 5 se muestra el emplazamiento de la estación Pedro Vicente Maldonado y los sectores de estudio, “A”, “B” y “C”, localizados en su entorno. La información levantada en estas campañas se puede comparar con los antecedentes de campañas anteriores, como los publicados por Santana y Dumont (2002) y Socola (2002).



EMPLAZAMIENTO DE LA ESTACIÓN CIENTÍFICA ECUATORIANA PEDRO VICENTE MALDONADO (MARCADO EN ROJO) EN LA PUNTA FORT WILLIAM, ENTRE LA ENSENADA CHACÓN Y BAHÍA CHILE EN LA ISLA GREENWICH, PENÍNSULA ANTÁRTICA. SE SEÑALAN LOS SECTORES DE CONTROL (A, B Y C).

Fuente: INAE.

### FOTOGRAFÍAS 1 - 2



SECTOR "A" ENSENADA GUAYAQUIL, INMEDIACIONES DE LA ESTACIÓN CIENTÍFICA "PEDRO VICENTE MALDONADO". IZQUIERDA SITUACIÓN EN FEBRERO DE 2012, CON UNA RIBERA CUBIERTA POR GRAVA. DERECHA: MISMO SECTOR EN FEBRERO DE 2013, DONDE LAS ROCAS Y MATERIAL DE MAYOR TAMAÑO HAN QUEDADO EXPUESTAS (62°26'53.1"S; 59°44'42.1"W)

### FOTOGRAFÍAS 3 - 4



SECTOR "B" EN BAHÍA CHILE, CONOCIDO COMO "CEMENTERIO DE BALLENAS", INMEDIACIONES DE LA BASE "PEDRO VICENTE MALDONADO". IZQUIERDA SITUACIÓN EN FEBRERO DE 2012, CON UNA COLONIA DE LOBOS MARINOS (*ARCTOCEPHALUS AUSTRALIS*) QUE ASCENDÍA A LA DECENA. SE APRECIA UNA CUBIERTA DE MUSGO (*SANANIA UNCINATA*). DERECHA MISMO LUGAR EN FEBRERO DE 2013, SE APRECIA UN ÚNICO INDIVIDUO DE LOBO MARINO, SOBRE UNA CAMA DE ALGAS SECAS (62°26'59.9"S; 59°44'54.1"W).

### FOTOGRAFÍAS 5 - 6



SECTOR "B". IZQUIERDA RIBERA DE LA BAHÍA CHILE CUBIERTA POR GRAVAS, DE ESCASO DIÁMETRO, DURANTE FEBRERO DE 2012. DERECHA, MISMO SECTOR EN FEBRERO DE 2013. SE APRECIA QUE EL SECTOR HA SIDO LAVADO DEL MATERIAL DE PEQUEÑO TAMAÑO, QUEDANDO DESCUBIERTAS ROCAS DE GRAN TAMAÑO (62°27'10.8"S; 59°43'31.0"W).

### FOTOGRAFÍAS 7 - 8



SECTOR "B". DERECHA RIBERA DE LA BAHÍA CHILE, SECTOR CUBIERTO POR ALGAS PARDAS (PALMARIA SPP.) EN FEBRERO DE 2012, IZQUIERDA MISMO SECTOR EN FEBRERO DE 2013. LAS ALGAS HAN REDUCIDO SU COBERTURA, DESCUBRIÉNDOSE UNA PLAYA DE ARENA (62°27'56.5"S; 59°43'33.4"W).

## FOTOGRAFÍAS 9 - 10



SECTOR "C". GLACIAR TRAUB, AL NW DE BAHÍA CHILE, AL FRENTE DE LA BASE NAVAL CAPITÁN ARTURO PRAT, OPERADA POR LA ARMADA DE CHILE EN ISLA GREENWICH. EN FEBRERO DE 2012 EL SECTOR SE ENCONTRABA SIN HIELO; EN CAMBIO EN FEBRERO DE 2013, LA RIBERA ESTABA TOTALMENTE RODEADA DE HIELO (62°27'30.2"S; 59°44'10.6"W).

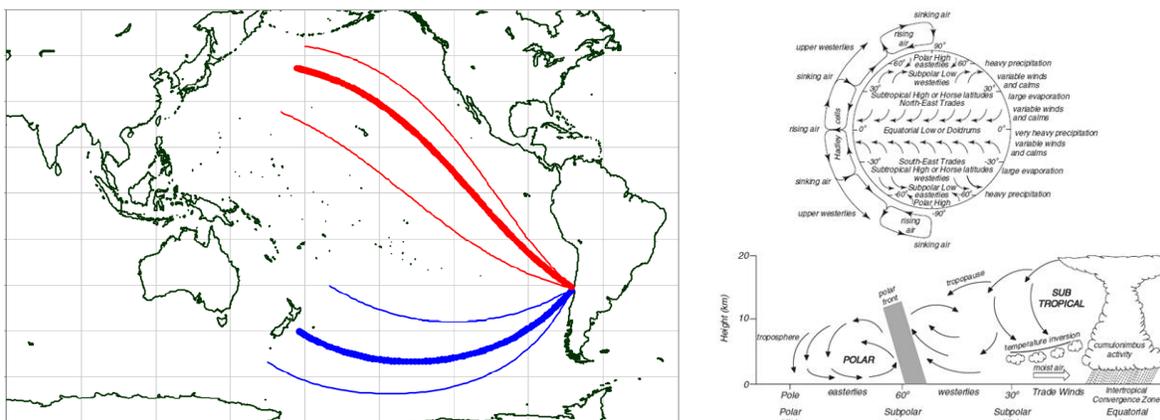
En las fotografías n° 6 a n° 10 se muestran cambios experimentados entre el verano de 2012 y el verano de 2013 en tres puntos cercanos a la estación científica ecuatoriana "Pedro Vicente Maldonado". Las fotografías n° 6 y n° 8 muestran sectores de playa que en el año 2012 estaban cubiertos por una grava de menor tamaño y que por algún proceso en febrero de 2013 se encontraban removidos, dejando al descubierto material de mayor tamaño. En la fotografía n° 7 se muestra como una colonia de lobos marinos fue reducida drásticamente. En la fotografía n° 9 una colonia de algas pardas también se redujo entre el año 2012 y 2013. Por último, en la fotografía n° 10, se muestra los cambios en la cubierta de hielo entre un año y otro en el mismo punto. Estos cambios ratifican las tasas de deshielos observados doce años atrás en el mismo sector, donde el Glaciar Quito perdió 270 m en su eje en el período de 11 años comprendidos entre 1990 y 2001.<sup>12</sup> En las áreas circundantes a la estación científica ecuatoriana en Isla Greenwich, también se han realizado estudios sobre la cobertura vegetal y su riqueza florística, representada en ese entonces por 36 especies de líquenes identificados.<sup>13</sup>

## 4. PROPAGACIÓN DEL OLAJE DE FONDO

El oleaje se genera debido a la acción del viento en forma persistente sobre una determinada porción de la superficie del océano. El viento logra construir las olas a partir de las ondas capilares que se encuentran en la superficie del agua. 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, en donde se presentan vientos que van de oeste a este (figura 11B).<sup>14</sup> Ambas zonas son capaces de generar oleaje que se propaga por toda la extensión del océano Pacífico, llegando a las costas del litoral del Pacífico Sur Oriental como oleaje tipo *swell* por efectos de la propagación.<sup>15</sup> Dado el ángulo de incidencia, se denominan *swell* NW (noroeste) y *swell* SW (suroeste) si provienen del hemisferio Norte y Sur respectivamente (Mapa n° 3 – Esquema n° 1).<sup>16</sup> Dada la cercanía con la zona de generación, el *swell* SW es el que domina todo el año, mientras que el *swell* NW se manifiesta principalmente en verano (invierno en la zona de generación) con baja altura y largo período.

Debido a que no existen suficientes registros de oleaje en la zona, se debe recurrir a obtener estadísticas de oleaje a partir de modelos de Hindcasting, como el WAM (WAVE Model) ejecutado por el Centro Europeo para el pronóstico del tiempo en el mediano plazo (ECMWF). Los datos en este tipo de modelos consisten 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. Por otro lado, el modelo operacional es un modelo WAM que utiliza más de 20 campañas de mediciones satelitales.

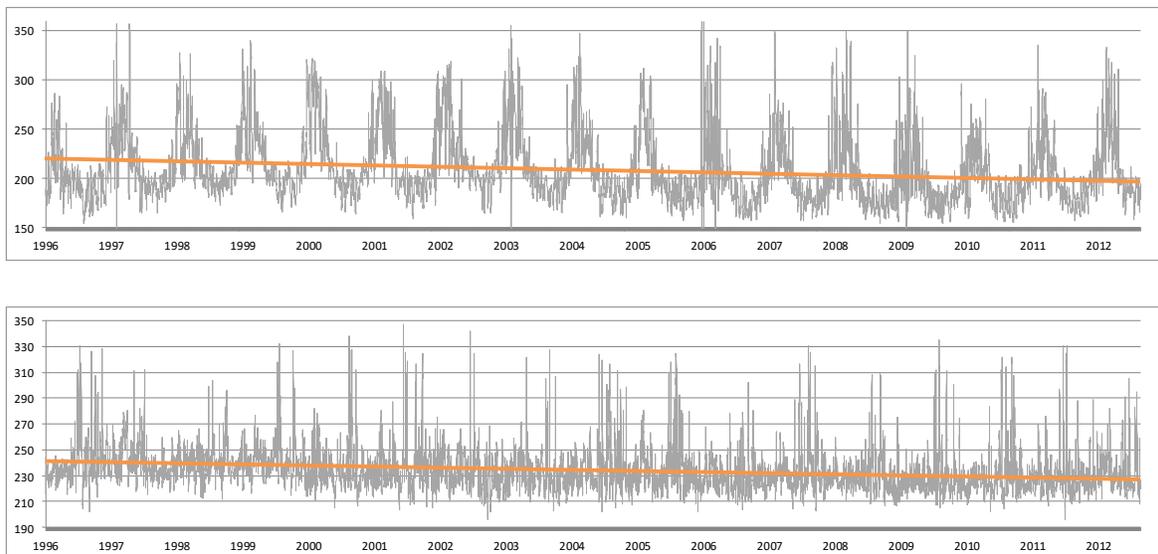
MAPA N° 3 – ESQUEMA N° 1



A) PROPAGACIÓN DEL SWELL NORTE (ROJO) Y SUR (AZUL) QUE LLEGAN AL LITORAL DEL CHILE CENTRAL. SE INDICA VALOR MEDIO (LÍNEA GRUESA) Y PERCENTILES 5% Y 95% (LÍNEA FINA). B) ESQUEMATIZACIÓN DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA GLOBAL. ARRIBA: IDEALIZACIÓN DE CIRCULACIÓN EN UN PLANETA SIN CONTINENTES. ABAJO: VISTA DE LA CIRCULACIÓN LATITUDINAL. FUENTE: ADAPTADO DE STEWART (2008).<sup>17</sup>

Se adquirieron series de tiempo de oleaje reconstruido para Galápagos (1.5°S; 93°W) y Valparaíso (33°S; 72°W), entre los años 1996 y 2013. Las series corresponden a parámetros de resumen cada 6 horas consignando: 1) altura significativa, período y dirección media. Se analizó en un primer paso el comportamiento de la evolución de la dirección media en ambos puntos de estudio (Gráfico n° 4).

**GRÁFICO N° 4**



ARRIBA, DIRECCIÓN MEDIA DEL OLEAJE EN VALPARAÍSO, CHILE; ABAJO DIRECCIÓN MEDIA DEL OLEAJE EN GALÁPAGOS, ECUADOR, ENTRE 1996 Y 2013. EN AMBAS SERIES SE MUESTRA LA TENDENCIA LINEAL AJUSTADA POR MÍNIMOS CUADRADOS.

Los resultados muestran en ambos puntos una tendencia descendente, lo que es consistente con una rotación del oleaje incidente hacia el sur (el oleaje incidente típico del SW se va transformando en un oleaje S). En Galápagos, el oleaje incidente muestra una marcada estacionalidad, que apenas se aprecia en Valparaíso (Gráfico n° 4). En Galápagos, la dirección del oleaje incidente cambia cíclicamente desde direcciones superiores a los 250° (superando los 300° en determinados momentos) a direcciones inferiores de los 200° (en algunos casos se reduce a los 150°). En Valparaíso en cambio, el oleaje cambia entre las direcciones comprendidas entre los 210° y 250°, superando en algunos casos los 300°.

## **5. UNA POSIBLE EXPLICACIÓN PARA EL CAMBIO EN LA DIRECCIÓN DEL OLEAJE INCIDENTE**

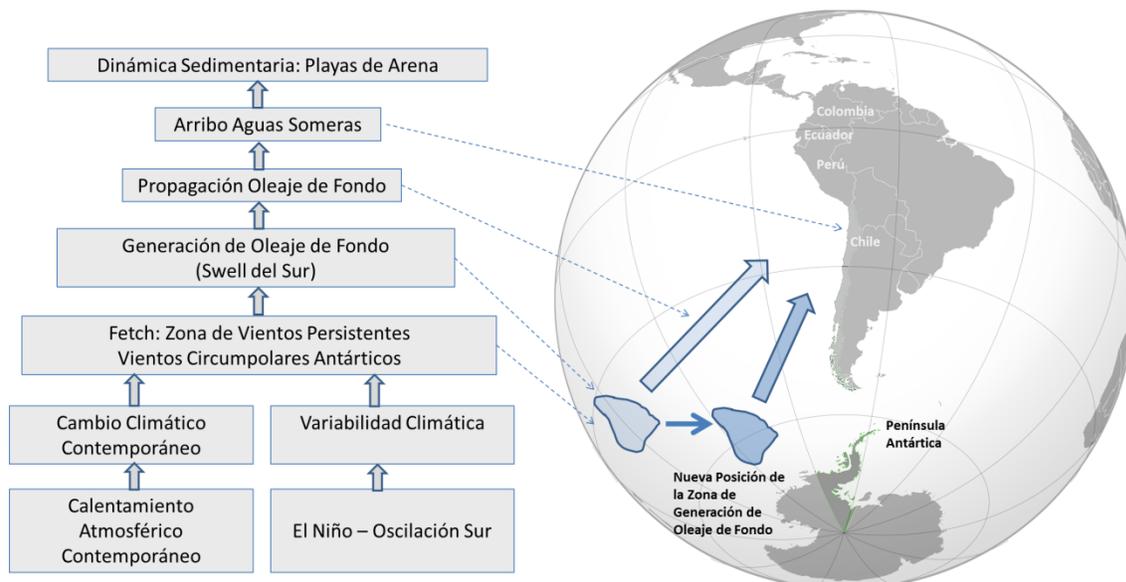
Se ha verificado que el calentamiento global contemporáneo tiene una enorme incidencia sobre las anomalías de temperatura en la Antártida, a niveles superiores que en otros lugares del hemisferio sur. Estas anomalías explican las tasas de cambio en el retroceso de los glaciares circundantes a la estación Pedro Vicente Maldonado, que se puede verificar al comparar el reporte de Santana y Dumont (2002), con las comparaciones entre el verano de 2012 y 2013 en los sectores “A”, “B” y “C”, mostrados en el presente trabajo. De la misma forma se pueden explicar los cambios en la cobertura vegetal.

Por otro lado, Faley y Gareud (2009), muestran que los patrones de circulación de vientos pueden experimentar severos cambios con respecto a la situación histórica. En especial se muestran

las anomalías de la circulación en las cercanías de la Antártica. Al cambiar los gradientes de temperatura, los frentes polares y las regiones donde soplan los vientos de manera persistente, cambiarían de localización. Este cambio se puede traducir a su vez en un desplazamiento de las zonas de generación de oleaje de fondo, o swell del sur, desde sectores cercanos a Australia hacia la península Antártica. Este cambio en las áreas de generación del oleaje, es consistente con las tasas de cambio detectadas en la dirección del oleaje incidente en las costas del PSO. El análisis de una serie de 19 años de oleaje reconstruido, permite estimar que la dirección del oleaje incidente se encontraría cambiando desde el SW (punto de origen cercano a Australia) al S (punto de origen más próximo a la península Antártica), tal como se esquematiza en el Esquema n° 2.

Por otra parte, Molina (2011) y Molina *et al.* (2011), verificaron con series reconstruidas más largas en la costa de Chile central, que el desarrollo del fenómeno El Niño – Oscilación Sur, también es capaz de alterar la dirección de incidencia del oleaje: La presencia de la fase fría (fenómeno La Niña), presenta la misma rotación en la dirección del oleaje incidente que el calentamiento global. Mientras que la presencia de la fase cálida (fenómeno El Niño), revierte la rotación hacia el SW. Esta aparente contradicción se explica bien con un trabajo de Falvey y Garreaud (2009), que explica que el calentamiento global produce un enfriamiento local en el PSO, debido a la acción de las corrientes marinas y diversas respuestas locales.<sup>18</sup>

#### ESQUEMA N° 2



ESQUEMA CONCEPTUAL DE LOS EFECTOS DEL CALENTAMIENTO GLOBAL CONTEMPORÁNEO Y EL DESARROLLO DEL FENÓMENO EL NIÑO – OSCILACIÓN SUR SOBRE LA ZONA DE GENERACIÓN DEL OLAJE DE FONDO DEL SUR. SI LA ZONA DE GENERACIÓN SE ESTÁ ACERCANDO A LA PENÍNSULA ANTÁRTICA, SERÍA CONSISTENTE CON EL CAMBIO DE DIRECCIÓN DEL OLAJE INCIDENTE DETECTADO EN EL LITORAL DEL PACÍFICO SUR ORIENTAL.

El calentamiento global debido a los GEI, explica el cambio climático contemporáneo, a través de modificaciones de la tendencia de parámetros climáticos como el viento. Es decir, se espera un cambio en el comportamiento principal de la serie de tiempo de vientos. Por otra parte, el fenómeno El Niño – Oscilación Sur, explica episodios de variabilidad climática en las dimensiones temporales y

espaciales de parámetros climáticos como el viento. Es decir, se esperan variaciones cíclicas irregulares sobre la serie de tiempo de vientos. De esta forma, de manera combinada el calentamiento global y el ENOS pueden explicar un cambio sobre los vientos que se desarrollan en la zona de generación del swell del sur, contrayendo hacia la Antártica la circunvalación de estos vientos y modificando así la posición de la zona de generación. El cambio de posición explica perfectamente un cambio en la dirección del swell incidente sobre el litoral del PSO (costas de Chile, Perú y Ecuador). Este cambio en el oleaje incidente, puede provocar cambios en el asomeramiento del oleaje, alterando formaciones y tasas de erosión de playas, embancamientos, entre otros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dean, R. G. y R. A. Dalrymple. *Coastal processes with engineering applications* (New York: Cambridge University Press, 2002).
- Falvey, M. y R. Garreaud. "Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006)" *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* Vol. 114 n° D04102, doi:10.1029/2008JD010519 (2009).
- Falvey, M. y Garreaud, R. "The coastal wind of western subtropical South America in future climate scenarios" *International Journal of Climatology* n° 29 (2009).
- Hemer, M. A., J. A. Church y J. R. Hunter. "Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere" *International Journal of Climatology* Vol. 30 n° 4 (Marzo, 2010).
- Holthuijsen, L. H. *Waves in Oceanic and Coastal Waters* (New York: Cambridge University Press, 2007).
- IPCC. *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* (Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra, Suiza), 104 pp.  
[Disponible en: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_sp.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf)].
- Jáuregui, E. "Algunos conceptos modernos sobre la circulación general de la atmósfera" *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* n° 50 (2003).
- Marcos, A., E. Fernández, J. Caló y R. Huespe. "Relevamientos semicuantitativo para el estudio de la morfología de playa" *GEOACTA* n° 34 (2009).
- Molina, M. *Estudio no estacionario de clima medio de oleaje en la costa central de Chile* (Valparaíso: Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil Oceánico de la Universidad de Valparaíso, 2011).
- Molina, M., M. Contreras, P. Winckler, S. Salinas y M. Reyes. "Consideraciones sobre las Variaciones de Mediano y Largo Plazo del Oleaje en el Diseño de Obras Marítimas en Chile Central" *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* Vol. 123 n° 3 (Diciembre, 2011).
- Molina, M. y M. Contreras. "Variabilidad climática y oleaje en el Pacífico Sur Oriental: Costa de Chile" *Revista Universidad Científica del Sur* Vol. 9 n° 3 (Diciembre, 2012).
- National Aeronautics and Space Administration. "Antarctic Ice Flows - A Complete Picture".  
[Disponible en: <http://www.nasa.gov/topics/earth/features/antarctica20110818-image.html>].

Rodrigo, C. "La Corriente Circumpolar Antártica y su influencia en el clima" *Boletín Antártico Chileno* Vol. 27 n° 2 (Diciembre, 2008).

Santana, E. y J-F. Dumont. "Geología de los alrededores de la estación ecuatoriana Pedro Vicente Maldonado (Isla Greenwich) e Isla Dee, Península Antártica" *Acta Antártica Ecuatoriana. PROANTEC* Vol. 5 n°1 (2002).

Scientific Committee on Antarctic Research. *Antarctic Climate Change and the Environment* (Cambridge: Scott Polar Research Institute, 2009).

Socola, J. "Cobertura vegetal en las áreas circundantes a la Estación Pedro Vicente Maldonado" *Acta Antártica Ecuatoriana. PROANTEC* Vol. 5 n° 1 (2002).

Snodgrass, F. E., G. W. Groves, K. Hasselmann, G. R. Miller, W. H. Munk y W. H. Powers. "Propagation of Ocean Swell across the Pacific" *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical, Sciences* Vol. 259 n° 1103 (Mayo, 1966).

Stewart, R. H. *Introduction to Physical Oceanography* (Texas: Texas A & M University, 2008).

Wendt, A., F. Bown, A. Rivera y C. Bravo. "Comportamiento del glaciar Fleming después del retroceso de la plataforma de hielo flotante de Wordie" *Boletín Antártico Chileno* Vol. 29 n° 2 (Diciembre, 2010).

## AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Antártico Ecuatoriano (INAE) a su Director, el Capitán de Navío José Olmedo Morán, y a la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) por el financiamiento y apoyo que se está dando al proyecto (INAE-I-05-12-2), "Relación de Procesos Físicos del Calentamiento Global y Cambio Climático entre la Antártida y Ecuador".

La Dirección General de Investigación de la Universidad de Playa Ancha financió parcialmente este trabajo a través del Proyecto DGI – UPLA N° 01/1213: "Efectos Locales de Cambio Climático en la Zona Costera de la Región de Valparaíso (Chile) y la Provincia de Manabí (Ecuador): Evaluación de la alteración de playas y litoral costero".

El Instituto Oceanográfico de la Armada Ecuatoriana (INOCAR) en conjunto con la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí (ULEAM) facilitaron información valiosa sobre datos horarios del nivel del Mar en la costa Ecuatoriana y registros de Temperatura Superficial del Mar del litoral de Ecuador.

---

<sup>1</sup> Comunicado de prensa del IPCC. "La influencia humana en el clima es clara, según el informe del IPCC" (27 septiembre 2013), Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

<sup>2</sup> Instituto Antártico Chileno. "Líneas de investigación del Programa Nacional de Ciencia Antártica" [Disponible en: <http://www.inach.cl/proyectos/lineas-investigacion>].

<sup>3</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Third Assessment Report* (New York: Cambridge University Press, 2001), 532.

<sup>4</sup> A. Wendt, F. Bown, A. Rivera y C. Bravo. "Comportamiento del glaciar Fleming después del retroceso de la plataforma de hielo flotante de Wordie" *Boletín Antártico Chileno* Vol. 29 n° 2 (Diciembre, 2010), 7-8.

<sup>5</sup> National Aeronautics and Space Administration. "Antarctic Ice Flows - A Complete Picture" [Disponible en: [www.nasa.gov/topics/earth/features/antarctica20110818-image.html](http://www.nasa.gov/topics/earth/features/antarctica20110818-image.html)].

<sup>6</sup> C. Rodrigo. "La Corriente Circumpolar Antártica y su influencia en el clima" *Boletín Antártico Chileno* Vol. 27 n° 2 (Diciembre, 2008), 15-16.

<sup>7</sup> Scientific Committee on Antarctic Research. *Antarctic Climate Change and the Environment* (Cambridge: Scott Polar Research Institute, 2009), 33-60.

- 
- <sup>8</sup> R. G. Dean y R. A. Dalrymple. *Coastal processes with engineering applications* (New York: Cambridge University Press, 2002), 42-61.
- <sup>9</sup> M. Molina y M. Contreras. "Variabilidad climática y oleaje en el Pacífico Sur Oriental: Costa de Chile" *Revista Universidad Científica del Sur* Vol. 9 n° 3 (Diciembre, 2012), 140-150.
- <sup>10</sup> M. A. Hemer, J. A. Church y J. R. Hunter. "Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere" *International Journal of Climatology* Vol. 30 n° 4 (Marzo, 2010), 475-491.
- <sup>11</sup> A. Marcos, E. Fernández, J. Caló y R. Huespe. "Relevamientos semicuantitativo para el estudio de la morfología de playa" *GEOACTA* n°34 (2009), 117-126.
- <sup>12</sup> E. Santana y J-F. Dumnot. "Geología de los alrededores de la estación ecuatorial Pedro Vicente Maldonado (Isla Greenwich) e Isla Dee, Península Antártica" *Acta Antártica Ecuatoriana. PORANTEC* Vol. 1 n° 1 (2002), 7-32.
- <sup>13</sup> J. Socola. "Cobertura vegetal en las áreas circundantes a la estación Pedro Vicente Maldonado" *Acta Antártica Ecuatoriana, PROANTEC* Vol. 5 n° 1 (2002), 70-80.
- <sup>14</sup> E. Jáuregui. "Algunos conceptos modernos sobre la circulación general de la atmósfera" *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* n° 50 (2003), 121-143.
- <sup>15</sup> L. H. Holthuijsen. *Waves in Oceanic and Coastal Waters* (New York: Cambridge University Press, 2007), 174-177.
- <sup>16</sup> F. E. Snodgrass, G. W. Groves, K. Hasselmann, G. R. Miller, W. H. Munk y W. H. Powers. "Propagation of Ocean Swell across the Pacific" *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical, Sciences* Vol. 259 n° 1103 (Mayo, 1966), 431-497.
- <sup>17</sup> R. H. Stewart. *Introduction to Physical Oceanography* (Texas: Texas A & M University, 2008), 41.
- <sup>18</sup> M. Falvey y R. Garreaud. "Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006)" *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* Vol. 114 n° D04102, doi:10.1029/2008JD010519 (2009). 16 pp.

Las opiniones, análisis y conclusiones del autor son de su responsabilidad y no necesariamente reflejan el pensamiento de *Revista Estudios Hemisféricos y Polares*.

La reproducción parcial de este artículo se encuentra autorizada y la reproducción total debe hacerse con permiso de *Revista Estudios Hemisféricos y Polares*.

Los artículo publicado en *Revista Estudios Hemisféricos y Polares* se encuentran bajo licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0.

