

# Impacto y consecuencias del cambio climático sobre la intensidad del índice de oscilación del Paso de Drake

M. RAMIL\*, M.N. LORENZO<sup>1</sup> y J.J. TABOADA<sup>2</sup>

\**ramil.marta@gmail.com*

<sup>1</sup>*EPhysLab, Facultade de Ciencias, Universidade de Vigo, Ourense, España*

<sup>2</sup>*MeteoGalicia, Xunta de Galicia. Santiago de Compostela, España*

## RESUMEN

El Océano Antártico es uno de los principales motores de la Circulación Termohalina, corriente que recorre todo el planeta. Los océanos del mundo transportan calor alrededor del planeta. El foco principal de hundimiento de las aguas oceánicas se encuentra en el Atlántico norte. Recientemente, se ha observado que el afloramiento de estas aguas podría ocurrir mayoritariamente en el océano Austral y no tanto en el Pacífico Norte, ya que en el Océano Antártico soplan fuertes vientos que junto con la Corriente Circumpolar Antártica afloran aguas desde las profundidades. El objetivo de este trabajo será el estudio de las posibles tendencias en la intensidad de esos vientos y afloramiento en las próximas décadas usando para ello los resultados de 2 modelos ejecutados en el cuarto informe del IPCC. Los resultados de los modelos muestran una tendencia positiva en el afloramiento hacia el futuro que podría favorecer la formación de aguas profundas en el Atlántico Norte.

*Palabras Clave:* DPOI, modelo de circulación general, viento normal, cambio climático, tendencias.

---

## 1. Introducción

La dinámica oceánica puede dividirse en base a dos mecanismos principales de circulación. La circulación debida al forzamiento del viento y la circulación debida a las diferencias de densidad, conocida como circulación termohalina (THC). El primer mecanismo da lugar a las corrientes superficiales y el segundo explicaría las corrientes profundas, más lentas que las superficiales. Gracias a estas últimas el calor es transportado a través de todo el planeta. Desde las áreas polares del norte el agua superficial que se hunde fluye hacia el sur como una corriente de profundidad. Una vez cruzado el ecuador, ésta se mueve hacia el hemisferio austral donde

finalmente se une a la corriente Circumpolar Antártica. Esta corriente la produce el viento y circula hacia el este sin límites continentales, extendiéndose 16000 km. Debido al principio de conservación de masas, el agua profunda que fluye desde el Hemisferio Norte debe ser reemplazada por un flujo de agua superficial hacia el norte. Es en el Hemisferio Sur y en los océanos Índico y Pacífico donde el agua aflora en su mayor parte y las propiedades del océano profundo ascienden lentamente hacia la superficie. El agua superficial forma la rama menos densa de la THC y se combina con las corrientes causadas por el viento en su viaje de retorno hacia el océano Atlántico Norte.

De esta forma en torno a la mitad del transporte de calor en la superficie de la Tierra lo realizan los océanos por lo que suponen una parte muy importante del sistema de control de la temperatura del planeta. Cualquier cambio de contenido de calor en el océano puede tener un efecto considerable sobre el Clima y la Temperatura Global (GCCIP, 1997).

Aunque el mecanismo de hundimiento en las aguas del Atlántico Norte ha sido el referente principal de los estudios de la circulación termohalina la rama de afloramiento también juega un papel importante dentro de la biodiversidad del océano, ya que trae aguas profundas ricas en nutrientes a la superficie. Por otro lado, investigaciones recientes sugieren que la mayor parte del agua profunda que se ha formado en el Atlántico Norte aflora de vuelta a la superficie en el océano Austral al sur de la Corriente Circumpolar Antártica (ACC) y no en el Pacífico Norte (Marshall y Speer, 2012). En particular, dicho afloramiento podría ocurrir en la banda de latitud del Paso de Drake (55-65°S). El Paso de Drake se encuentra dentro del cinturón de vientos del Oeste de latitudes medias. Aquí, el transporte de Ekman en la capa superficial se dirige hacia el Norte y es divergente dentro del canal favoreciendo el afloramiento de las aguas profundas en el mismo (Toggweiler y Samuels, 1995; Toggweiler y Key, 2001).

Los experimentos numéricos con modelos oceánicos de circulación general muestran que gran parte del agua hundida en la termoclina en todo el cinturón circumpolar finalmente se abre paso en el Océano Atlántico, para convertirse en aguas profundas en el Norte del Atlántico. La acción de los vientos en el canal, en el ascenso de aguas profundas desde el interior del océano, se ha demostrado que mejora activamente la formación de aguas profundas en el Atlántico Norte.

Estudios recientes, sostienen que un fortalecimiento de los vientos zonales en el océano Austral intensificaría el fenómeno de afloramiento en el Paso de Drake favoreciendo la formación de aguas profundas en el Atlántico Norte. Basándonos en estos estudios, trataremos de examinar si en el actual contexto de cambio climático se observa alguna tendencia significativa en la intensidad del afloramiento en el Paso de Drake. Para ello, se analizarán las posibles tendencias del índice DPOI (*Drake Passage Oscillation Index*) para el siglo XX y para el siglo XXI en los escenarios A1B, B2 y A2 y se estudiará la relación existente entre este índice y los vientos zonales que se dan en dicha zona, verificando así la relación existente entre dicho índice y el fenómeno de afloramiento. Para ello se hará uso de dos de los principales modelos climáticos utilizados en el cuarto informe del IPCC, en concreto trabajaremos con el modelo ECHAM5 y CCSM3. También compararemos los resultados de estos modelos con los datos del reanálisis del NCEP/NCAR.

El trabajo que aquí se expone se organiza de la siguiente forma: en la sección dos se presenta el área de estudio, datos y métodos empleados, en la sección tres se exponen los resultados obtenidos y finalmente en la sección cuatro se presentan las conclusiones.

## **2. Área de Estudio, Materiales y Métodos**

El presente estudio se centrará en la zona conocida como Paso de Drake. Dicha zona se encuentra entre el extremo sur de América del Sur (56 ° S) y el extremo norte de la península Antártica (62 ° S) y conecta los océanos Atlántico y Pacífico proporcionando la única banda zonal continua de agua en el océano (aparte de en el norte del Océano Ártico en 84 ° N)

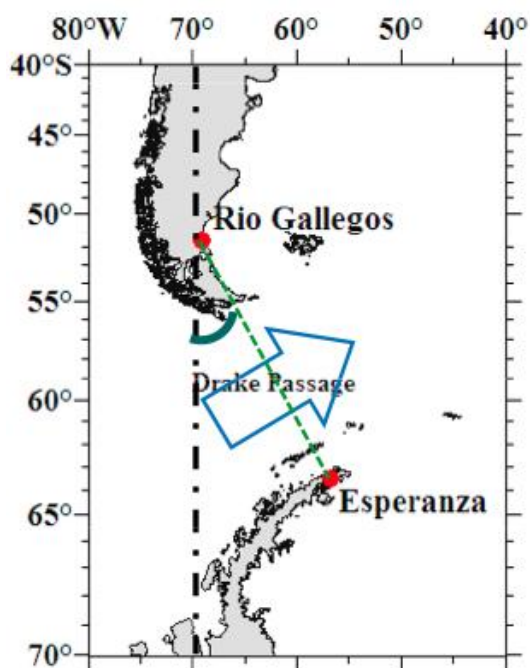


Fig. 1. Área de estudio.

En una banda de latitud sin barreras continentales, los gradientes promedio de presión de este a oeste deben ser cero. Esto ofrece una fuerte restricción al flujo meridional, es decir, no puede haber un balance neto de flujo geostrofico norte-sur en tal banda.

En uno de los primeros artículos científicos escritos acerca de los resultados de un modelo de circulación oceánica general, Gill y Bryan (1971) describieron el efecto del paso de Drake en la circulación termohalina del hemisferio sur. Con el Paso de Drake cerrado, la parte ascendente (hacia los polos) de la rama de la circulación se extiende hacia el sur hasta la Antártida, donde el flujo de la capa superior del océano se enfría y se hunde. A continuación, fluye hacia el interior como una corriente cerca del fondo y, finalmente, aflora hacia la superficie en las latitudes bajas. Con el Paso de Drake abierto, el flujo térmico impulsado hacia la capa superior del océano no puede cruzar la banda de latitud de Paso de Drake. La principal

región de hundimiento y de formación de agua se desplaza hacia las latitudes más al norte del Paso de Drake. Resultados similares son mostrados por Cox (1989).

Los vientos que soplan en la banda de latitud de Paso de Drake producen otro efecto importante. Los vientos del oeste circumpolares impulsan una deriva hacia el norte del transporte de Ekman en las capas cercanas a la superficie.

Como se podrá ver en la sección de resultados, los vientos más fuertes en superficie en el cinturón circumpolar ocurren cerca de 50°S, justo en el norte del Paso de Drake. La fuerza del viento zonal va disminuyendo hacia el sur de tal manera que el transporte de Ekman en la latitud del Paso de Drake es divergente (Hellerman y Rosenstein, 1983). Esto es importante porque el agua superficial fluye hacia el norte de la banda de latitud del Paso de Drake y el agua profunda que fluye hacia los polos para reemplazarla es muy distinta en densidad. Por lo tanto, los vientos, traen aguas profundas hasta la superficie, y obligan a la transformación del agua densa y profunda en agua superficial.

Para realizar el presente trabajo se utilizaron los datos de dos de los modelos climáticos globales (GCM) utilizados en el IPCC, en concreto ECHAM5 y CCSM3 y los datos del reanálisis del NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996).

<b>Modelo</b>	<b>Centro</b>	<b>Resolución atmósfera</b>	<b>Resolución oceáno</b>
ECHAM5	NCAR, USA	1,4°x1,4°, L26	1°x1°, L40
CCSM3	MPIM, Germany	1,9°x1,9°, L31	1,5°x1,5°, L40
Reanálisis	NCEP/NCAR	2,5°x2,5°, L28	

TABLA 1. Características de los modelos y datos utilizados.

Los datos de los modelos se han considerado tanto para el siglo XX entre 1948 y 2000 como para el siglo XXI bajo los escenarios A1B, A2 y B1 entre el año 2001 y 2099.

El escenario A1B describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes y la utilización equilibrada de todo tipo de fuentes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante.

El escenario A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

El escenario B1 describe un mundo convergente con una población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1B, pero

con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preferencia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

El índice DPOI (Drake Passage Oscillation Index) que nos da la fuerza de los vientos del oeste en el Paso de Drake es determinado a partir de las diferencias de presión a nivel del mar (SLP), entre un punto localizado sobre el Río Gallegos en Argentina (51°32'S, 69°17'W), y la Base Esperanza, localizada en la Península Antártica (63°24'S, 56°59'W). (Naganobu *et al.*, 1999), (ver Figura 1).

$$DPOI = SLP(\text{Rio}) - SLP(\text{Esp})$$

Con datos de presión para el siglo XX, entre 1948 y 2000, de los modelos ECHAM5, CCSM3 y de los datos del reanálisis del NCEP/NCAR calculamos las tendencias actuales del índice DPOI. También se calculan las tendencias de dicho índice bajo los escenarios A1B, A2 y B1, entre 2001 y 2099, con los modelos elegidos. Para el cálculo de la significancia estadística de las tendencias se ha utilizado el test de Mann-Kendall. Este test es no paramétrico y es muy utilizado en el

análisis de datos medioambientales (Mann, 1945; Kendall, 1975).

Dado que en nuestro estudio se analizará el incremento o descenso del afloramiento existente en el océano austral en función del valor del índice DPOI, también se ha calculado la relación existente entre dicho índice y el viento normal en la región del Paso de Drake. Para ello se calculó la componente normal del viento en el paso de Drake a través de la expresión:

$$W_n = W_x \cos\theta + W_y \sin\theta \quad \theta = 29,3^\circ$$

donde  $W_x$  y  $W_y$  son los vientos zonales y meridionales en superficie, (ver Figura 2).

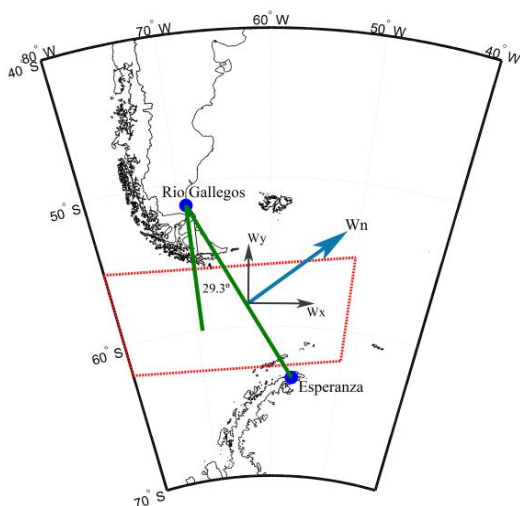


Fig. 2. Representación del viento normal al Paso de Drake.

### 3. Resultados

Como se ha comentado en el apartado anterior utilizamos datos de presión para calcular las tendencias del índice DPOI.

En la Figura 3 se muestra la media móvil a 12 meses del índice DPOI durante el período de 1948 al 2000 para el reanálisis NCEP/NCAR y los dos modelos elegidos del IPCC. Ambos modelos simulan con bastante acuerdo los datos del reanálisis si bien el

ECHAM5 parece subestimar dicho índice mientras el CCSM3 da valores algo superiores a los del reanálisis. No obstante en los 3 casos se observan tendencias positivas para dicho índice durante el periodo actual. Lo que de acuerdo a la literatura existente repercute en un incremento del afloramiento en dicha zona.

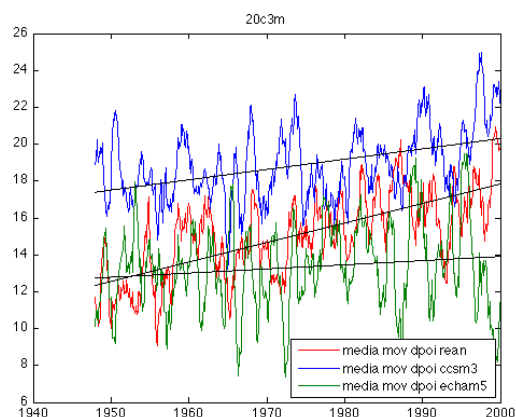


Fig. 3. Series temporales y tendencias de la media móvil a 12 meses del índice DPOI para el reanálisis y los modelos ECHAM5 y CCSM3 en el período 1948-2001.

El siguiente paso es analizar si esas tendencias positivas en el índice DPOI se mantienen en el futuro y en los diferentes escenarios. Para ello se calcula el DPOI para los 3 escenarios mencionados en la sección 2. La Figura 4 (a-c) muestra la media móvil del índice DPOI para el período entre 2001 y 2099, en los escenarios A1B, A2 y B1 respectivamente. Vemos que los tres escenarios aportan resultados similares, con tendencias positivas significativas en todos los casos, lo que proporciona evidencias del incremento del índice DPOI a lo largo del siglo XXI (ver Tabla 2).

Fuente de datos	Escenario	Tendencia DPOI	N
<b>ECHAM5</b>	Siglo XX	0,23	52
	A1B	0,51**	98
	A2	0,55**	98
	B1	0,20**	98
<b>CCSM3</b>	Siglo XX	0,55**	52
	A1B	0,22**	98
	A2	0,13**	98
	B1	0,02	98
<b>Reanálisis NCEP/NCAR</b>	Siglo XX	1,10**	52

TABLA 2. Valores de las tendencias decadales esperadas para el promedio anual del índice DPOI en el siglo XX y en el siglo XXI. (\*\*) tendencias significativas al nivel 0.05 según el test de Mann Kendal.

El ECHAM5 presenta un incremento más pronunciado que el CCSM3.

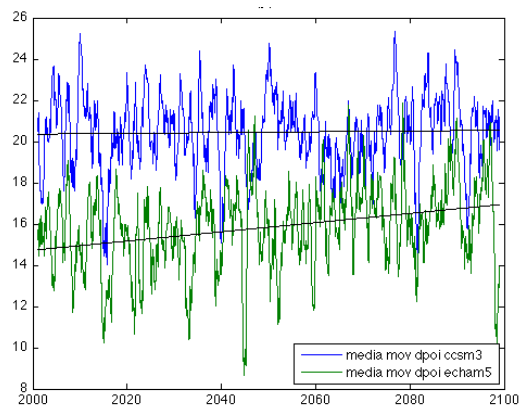
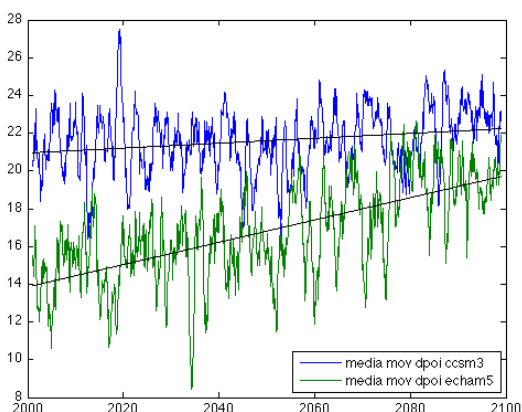
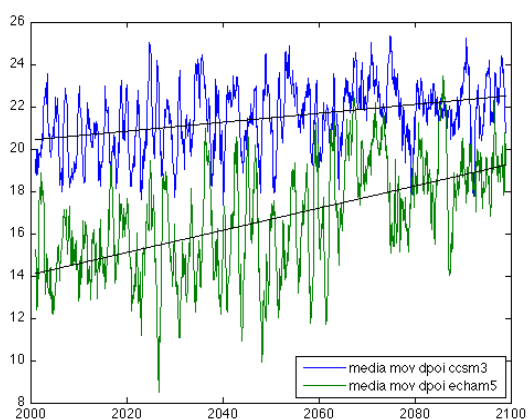


Fig. 4. Series temporales y tendencias de la media móvil a 12 meses del índice DPOI para los modelos ECHAM5 y CCSM3 durante el periodo 2001-2099, en los escenarios A1B, A2 y B1, respectivamente.

Estos resultados corroboran la tendencia positiva observada durante el periodo 1948-2000 para el índice DPOI. Según esto en el próximo siglo el afloramiento en el océano austral parece verse reforzado. Para justificar esta conclusión se ha calculado la relación entre el índice DPOI y el viento normal al Paso de Drake, viento causante del afloramiento en dicha zona. La Tabla 3 muestra los resultados del cálculo de las correlaciones para los distintos periodos y escenarios.

Fuente de datos	Escenario	Periodo	Correlación
ECHAM5	Siglo XX	1960-1999	0,9436
		2001-2050	0,9288
	A1B	2050-2099	0,9394
		2001-2050	0,9227
	A2	2050-2099	0,9392
		2001-2050	0,9329
	B1	2050-2099	0,9405
		Reanálisis NCEP/NCAR	Siglo XX

TABLA 3. Correlaciones entre el viento normal al Paso de Drake y el índice DPOI para los diferentes escenarios y periodos analizados del reanálisis NCEP/NCAR y del modelo ECHAM5. Los resultados para el modelo CCSM3 son similares.

Tal y como se esperaba, la correlación entre ambos es superior a 0.90 en todos los casos, lo que significa que un incremento en el valor del índice DPOI intensifica la acción de los vientos sobre esta zona impulsando un mayor afloramiento de aguas profundas y por consiguiente, de acuerdo a la literatura existente, un incremento en la velocidad de la circulación termohalina.

En la Figura 5 (a-c) se muestran los mapas que representan la diferencia de presión entre el siglo XXI y el siglo XX para cada uno de los escenarios considerados, A1B, A2 y B1, respectivamente, en estos se observa claramente un incremento en la diferencia de presión entre Río Gallegos y Base Esperanza, (ver segmento negro en la Figura 5) . El escenario B1 es el que menos incremento presenta de los tres, lo que concuerda con lo observado en la Figura 4.

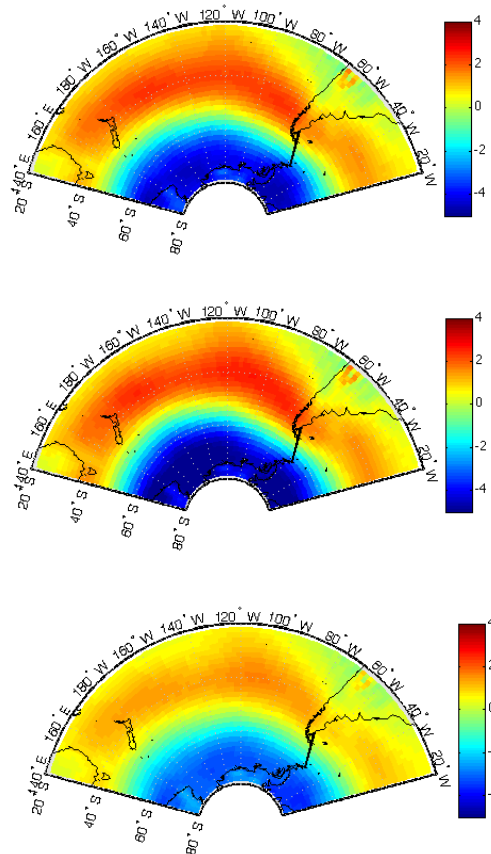


Fig. 5. Diferencias promedio de presión entre el siglo XXI y el siglo XX para cada escenario, A1B, A2 y B1 respectivamente.

En la Figura 6 (a-c) se muestran los mapas de la diferencias promedio de viento zonal y meridional entre el siglo XXI y el siglo XX para cada escenario, vemos que la componente zonal es la

que domina en la zona del Paso de Drake siendo la que sufre mayores incremento en los diferentes escenarios del siglo XXI.

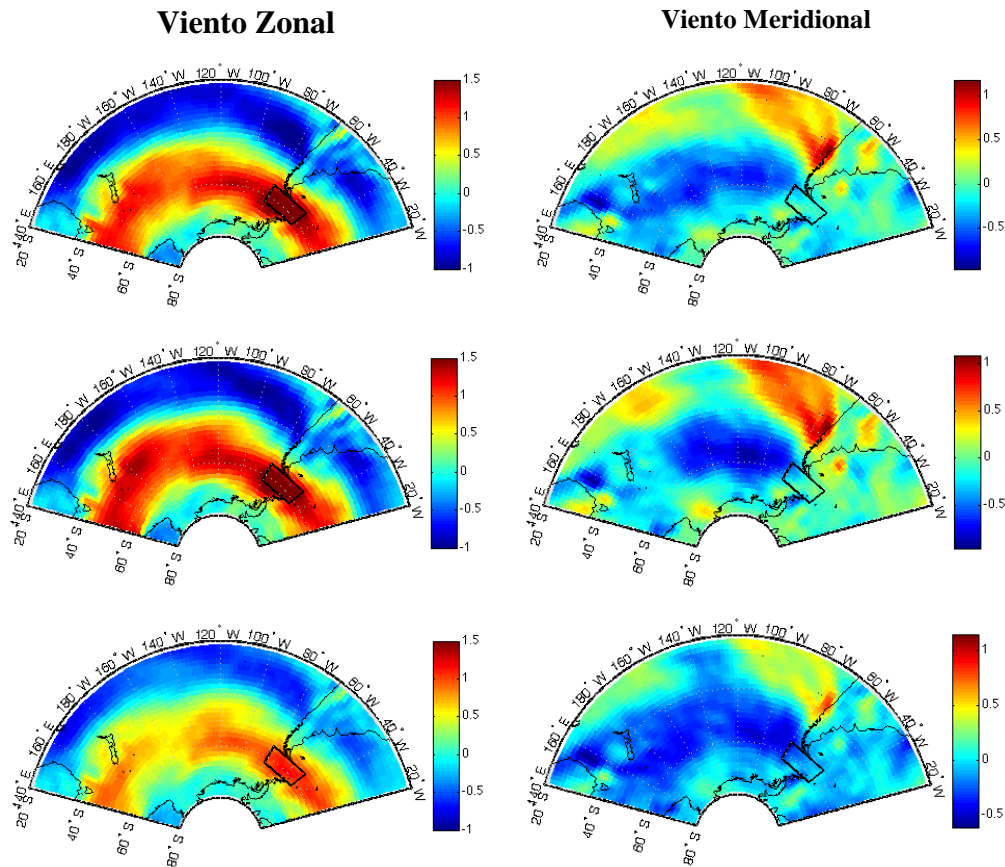


Fig. 6. Diferencias promedio del viento zonal y meridional entre el siglo XXI y el siglo XX para cada escenario, A1B, A2 y B1 respectivamente.

#### 4. Conclusiones

En el presente trabajo se han estudiado los cambios observados en el Paso de Drake tanto en el actual contexto de cambio climático en el que se ha desarrollado el siglo XX como para el siglo XXI a través del análisis del índice DPOI. Los estudios se han hecho para dos modelos del cuarto informe del IPCC bajo los escenarios A1B, A2 y B1. Los resultados de los modelos muestran que el índice DPOI fuertemente relacionado con el afloramiento en el océano Antártico presenta una clara tendencia positiva

tanto en los modelos elegidos como en los datos del reanálisis NCEP/NCAR, tendencia que se mantiene para el futuro en los tres escenarios de cambio climático. Además, las diferencias entre el clima actual y el futuro muestra un fuerte incremento de los vientos zonales en la zona de estudio más acusado en los escenarios A1B y A2 que también se observa en las diferencia de presión entre los puntos considerados para el cálculo del DPOI. Estos resultados, de ser ciertas las investigaciones recientes en las que se considera el océano antártico el foco principal de afloramiento de la circulación



thermohalina, nos llevarían a concluir que en las próximas décadas los modelos apuntan a una intensificación de la formación de aguas profundas en el Atlántico Norte.

## Referencias

- Cox, M., 1989. An idealized model of the world ocean. 1. The global scale water masses. *Journal of Physical Oceanography* 19, 1730–1752.
- GCCIP. 1997. Global Climate Change Information Programme.
- Gill, A.E., Bryan, K., 1971. Effects of geometry on the circulation of a three-dimensional southern hemisphere ocean model. *Deep-Sea Res.* 18, 685–721.
- Hellerman, S., Rosenstein, M., 1983. Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates. *Journal of Physical Oceanography* 13, 1093-1104.
- IPCC, 2007: Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B.Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, (eds.)], 996 pp, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kalnay, E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds B., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D., 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77 (3), 437-472.
- Kendall, M.G., 1975. Rank Correlation Methods. Griffin, London.
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13, 245–259.
- Marshall, J., Speer K., 2012. Closure of the meridional overturning circulation through Southern Ocean upwelling. *Nature Geoscience* 5, 171–180, doi:10.1038/ngeo1391.
- Toggweiler, J. R., Samuels, B., 1995. Effect of Drake Passage on the global thermohaline circulation. *Deep-Sea Research I* 42 (4), 477-500.
- Toggweiler, J.R., Key, R.M., 2001. Ocean Circulation: Thermohaline circulation, J. Steele, S. Thorpe and K. Turekian, eds., London, 2941-2947. (also published in: *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, J.R. Holton, J. Pyle and J.A. Curry, Academic Press, Ltd., London 1549-1555.)
- Naganobu, M., Kutsuwada, K., Sasai, Y., Taguchi, S., Siegel V., 1999. Relationships between Antarctic krill (*Euphausia superba*) variability and westerly fluctuations and ozone depletion in the Antarctic Peninsula area. *Journal of geophysical research* 104 (C9), 20651-20665.