

Un estudio de la actividad de ciclones a mesoescala en las cercanías de la península Antártica.

JORGE F. CARRASCO¹ y DAVID H. BROMWICH²

RESUMEN

Un estudio de la actividad de ciclones a mesoescala en las cercanías de la Península Antártica fue realizado para el período enero 1991 - febrero 1992, usando imágenes satelitales digitales coleccionadas en la Estación Palmer de los Estados Unidos de América. Una actividad significativa de mesociclones fue observada a ambos lados de la península con un máximo en los meses de verano y un mínimo durante el invierno. Las trayectorias de los mesociclones que se detectaron en el sector del mar de Bellingshausen indican que un gran número de ellos se desplaza y cruza el sector del Paso Drake. Resultados revelan que un número mayor de mesovórtices adquieren desarrollo vertical por sobre los 700 hPa en el lado oeste de la península, siendo mucho menor la cantidad en el sector del mar de Weddell. El análisis sinóptico para los días en que al menos un mesovórtice fue observado, indica que éstos se desarrollan dentro de una masa de aire frío, confirmando resultados anteriores.

Palabras clave: ciclón a mesoescala, análisis sinóptico, imágenes satelitales, Antártica.

A study of mesoscale cyclone activity near the Antarctic Peninsula.

JORGE F. CARRASCO¹ and DAVID H. BROMWICH²

ABSTRACT

A study of the mesoscale cyclone activity, based on digital satellite images collected at the U.S. Palmer Station, was carried out near the Antarctic Peninsula during the January 1991 - February 1992 period. A significant activity was observed on both sides of the peninsula with a maximum during the summer months and minimum during the winter. Trajectories of the mesoscale cyclones detected over the Bellingshausen Sea sector, showed that many of them moved toward and across the Drake Passage. Results reveal that more deep mesoscale vortices develop to the west of the peninsula, and much less over the Weddell Sea sector. The synoptic analysis for days in which at least one mesoscale vortex was observed, indicates that they developed within a cold air mass confirming previous results.

Key words: mesoscale cyclone, synoptic analysis, satellite images, Antarctica.

¹ Dirección Meteorológica de Chile, Casilla 717, Santiago - Chile

Universidad de Valparaíso, Departamento de Meteorología y Física, Valparaíso, Chile.

² Polar Meteorology Group, Byrd Polar Research Center and Atmospheric Research Program, The Ohio State University, Columbus, Ohio 43210, USA.

INTRODUCCIÓN

La península Antártica es una barrera montañosa que se extiende casi meridionalmente desde la base del continente (Tierra de Ellsworth) hasta aproximadamente los 63° S. Tiene un ancho promedio de 70 km al norte de los 69° S. y una elevación promedio de 1500 m con cumbres que sobrepasan los 2000 m en su parte media y sur, y que alcanzan cerca de los 800 m en su extremo norte (Schwerdtfeger, 1984). Sus casi 1300 km de extensión norte-sur separa los océanos Pacífico y Atlántico y actúa como una formidable barrera a la circulación del aire. El régimen climático se caracteriza por una circulación semipermanente del viento en superficie que tiene como consecuencia dos climas distintos a ambos lados de la península. Así, los frecuentes vientos de componente norte y noroeste traen aire relativamente cálido y húmedo del Océano Pacífico sobre el lado oeste de la península dando un clima de carácter "templado subpolar", mientras que los frecuentes vientos de componente sur, que afectan su lado este, traen aire frío y seco desde el interior del continente definiendo un clima de carácter "continental frío" (Schwerdtfeger, 1984; Parish, 1977).

Uno de los primeros estudios de ciclones a escala subsinóptica (aquellos cuyo diámetro no excede los 1000 m) en las cercanías de la península Antártica (Figura 1) fue realizado por Lyons (1983) quien estudió principalmente las depresiones (o centros de baja presión) subsinópticas que alcanzaron la zona de Tierra del Fuego. Sus resultados indicaron que estas perturbaciones ciclónicas se desarrollan dentro de una masa de aire frío, desplazándose desde el sector del mar de Bellingshausen hacia el Paso Drake. Aquellos que eventualmente alcanzaron la zona austral produjeron condiciones de tiempo adverso con chubascos y vientos moderados a fuertes. Más tarde, Fitch y Carleton (1992) y Carleton y Fitch (1993) estudiaron ciclogénesis (formación de ciclones) a escala subsinóptica en el sector del Océano Pacífico Sur en las cercanías de la Antártica, en los meses de invierno (junio - agosto) de 1988 y 1989. Sus resultados mostraron que la presencia de estos ciclones estuvo asociada con anomalías negativas del espesor 1000-500 hPa respecto al respectivo promedio estacional (i.e. presencia de una masa de aire relativamente más fría a la media). Esto sugiere que estas depresiones subsinópticas se forman y desarrollan dentro de una masa de aire frío de origen polar confirmando los resultados preliminares de Lyons (1983).

Turner y Row (1989), Heinemann (1990) y Turner y Thomas (1992, 1994) mostraron que la actividad ciclogénica a escala subsinóptica también ocurre en el sector del mar de Weddell, al este de la península. Según Heinemann (1990), la ocurrencia de estos ciclones puede ser asociada con la presencia de una baja sinóptica (ciclón cuyo diámetro horizontal fluctúa entre 1000 y 3000 m) ubicada sobre el mar de Bellingshausen, o al este del mar de Weddell. Estas situaciones sinópticas favorecen, respectivamente, un flujo de aire cálido y húmedo sobre y hacia el área fría del mar de Weddell, y flujo de aire frío y seco desde el interior del continente. Además, en el estudio de Turner y Thomas (1994), que incluye el período septiembre 1983 - febrero 1984, una mayor actividad ciclónica fue encontrada sobre el mar de Bellingshausen respecto a aquel observado en el mismo período sobre el mar de Weddell. Este resultado es opuesto al encontrado por Carrasco y Bromwich (1993), quienes estudiaron prácticamente la misma región pero para el período agosto 1989 - febrero 1990, encontrando mayor actividad en el mar de Weddell. Estos resultados opuestos sugieren una variabilidad interanual en la localización de la máxima actividad ciclónica a escala subsinóptica a ambos lados de la península Antártica. Carrasco y Bromwich (1993) además mostraron que los ciclones subsinópticos observados en el mar de Bellingshausen exhiben en promedio un desplazamiento al noroeste en dirección del Paso Drake, mientras que los observados en el mar de Weddell no presentaron una dirección preferida.

Recientemente, Carrasco (1994) y Turner *et al.* (1996) analizaron respectivamente el comportamiento estacional de ciclones a escala subsinóptica para el año 1991 y el período enero 1993 - febrero 1994. Sus principales resultados indican que los ciclones subsinópticos tienen un promedio de 300 a 400 km de diámetro con una mayor actividad en los meses de verano, y un predominio del tipo "nube coma". En este artículo se resumen los resultados del estudio realizado por Carrasco (1994) acerca de la actividad de ciclones a escala subsinóptica (de aquí en adelante también referidos como mesociclones o mesovórtices) en las cercanías de la península Antártica durante el año 1991 incluyendo enero y febrero de 1992. Los resultados sólo pretenden representar el período en estudio aunque algunas inferencias del comportamiento estacional pueden ser válidas para otros años, a la luz de la comparación con resultados de estudios similares.

MATERIALES Y METODOS

En mayo de 1989, el Centro de Investigaciones del Artico y Antártico (Arctic and Antarctic Research Center) del Scripps Institution of Oceanography, instaló un sistema de recepción satelital en la estación antártica estadounidense Palmer (Palmer Station: 65°S., 64°W.; Van Woert *et al.*, 1992) para la recepción de información proveniente de los satélites meteorológicos de la serie NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration) y DMSP (Defense Meteorology Satellite Program). Copias digitales de los datos originalmente recolectados *in situ* durante 1991 y enero-febrero 1992 (primer año completo disponible) fueron procesados para el análisis e identificación de ciclones a escala subsinóptica. Para ello todas las imágenes disponibles fueron obtenidas en la banda infrarroja del espectro (imagen térmica) y desplegadas en una pantalla de computador con una resolución de 3.3 km por pixel. Esta resolución ha probado ser apropiada para la identificación y seguimiento de los mesovórtices permitiendo además cubrir una extensa área para el análisis simultáneo a ambos lados de la península Antártica y sus alrededores (Carrasco y Bromwich, 1993, 1994).

La Figura 1 muestra el área bajo estudio (enmarcada en línea discontinua). Todos los mesociclones observados por primera vez dentro del área enmarcada fueron contados y ploteados en un mapa de proyección estereográfica; aquellos detectados en más de una imagen fueron ploteados una vez, pero su desplazamiento fue seguido para determinar su trayectoria. Este procedimiento permitió identificar los "días esociclónicos" definidos como aquellos días en los cuales al menos un mesociclón fue observado dentro del área de estudio, ya sea dentro del sector del mar de Bellinghausen (SMB) o del mar de Weddell (SMW) o en ambos. También se identificaron aquellos días para los cuales se observaron mesociclones en el área continental (SC) delimitado al sur de la línea de costa incluyendo la Plataforma de Filchner/Ronne. Promedios mensuales y estacionales para los días meso-ciclogénéticos fueron realizados; aquí sólo los estacionales son presentados y para esto el año se dividió en 5 períodos de acuerdo a la marcha de la temperatura promedio mensual en ambos lados de la península (Schwerdtfeger, 1984 ver su Figura 3.3 pag. 81). Las estaciones fueron identificadas como: término de verano (TV: enero-febrero), transición de otoño (TO: marzo-mayo), invierno (IN: junio-agosto), transición de primavera (TP: septiembre-octubre) e, inicio de verano (IV: noviembre-diciembre). Esta división permite un mejor análisis del comportamiento estacional de los mesociclones a través del año y facilita el análisis a escala sinóptica.

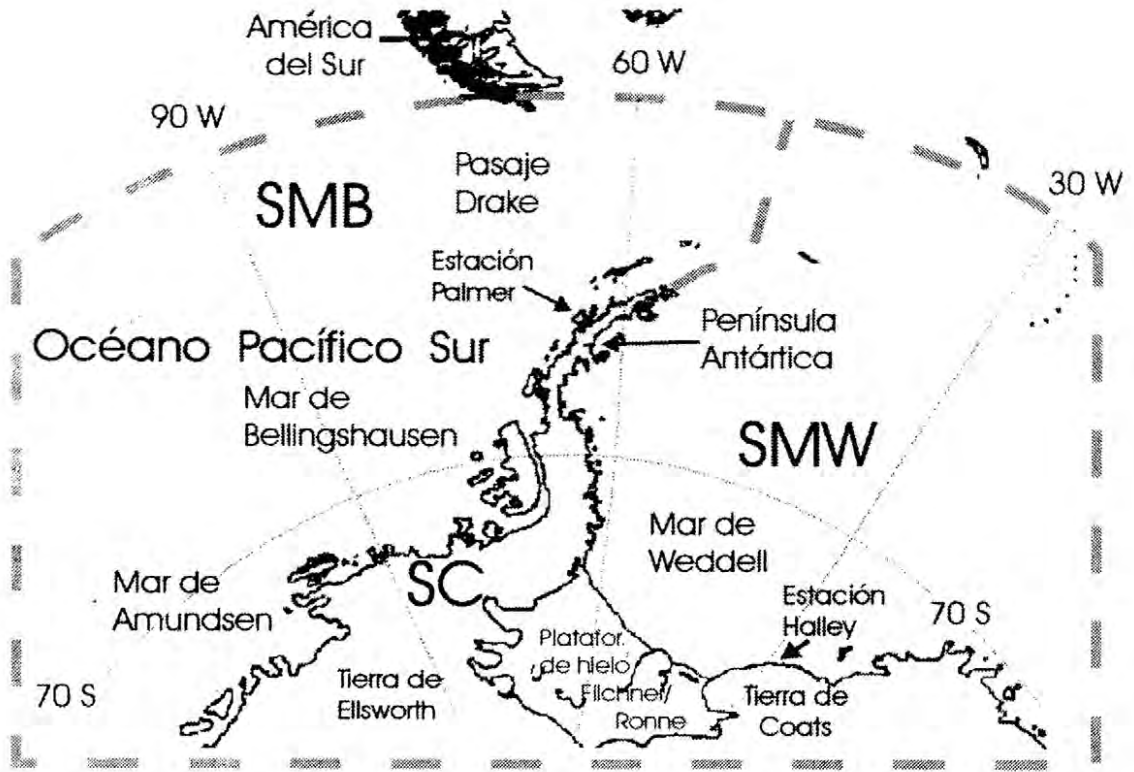


Fig. 1. Mapa de localización. Área enmarcada por línea discontinua indica la región para la cual se tuvo imágenes satelitales. SMB define el sector del mar de Bellingshausen. SMW define el sector del mar de Weddell. SC define el sector continental el cual incluye parte de la Antártica Occidental, la Plataforma de Hielo Filchner/Ronne y parte de la Tierra de Queen Maud.

La identificación de los mesovórtices y sus características se basó en la apariencia ciclónica de la nubosidad y su tonalidad en las imágenes térmicas. Para ello se usaron patrones de reconocimiento descritos en estudios similares (ver por ejemplo: Rasmussen, 1981; Forbes y Lottes, 1985; Carleton y Fitch, 1993; Carrasco y Bromwich, 1994). La caracterización de los mesociclones se limitó a determinar su tipo, su desarrollo vertical y su diámetro horizontal. El grado de desarrollo vertical de los mesovórtices puede ser inferido por la temperatura aparente del tope de la nubosidad asociada, dada por una imagen satelital con fines meteorológicos. En una escala que va desde el negro al blanco, los tonos oscuros representan temperaturas relativamente más cálidas (indicación de nubes de poco desarrollo o nubes bajas) respecto a los tonos más claros (blancos), los que son asociados a temperaturas más frías que indican topes de la nubosidad más altos (nubes medias y/o altas). Para un número aleatorio de mesovórtices se obtuvo la temperatura del tope de la nubosidad (TTN) para una estimación cuantitativa del desarrollo vertical de los mesovórtices. El promedio de las TTN fue comparado con la temperatura promedio climatológica de verano e invierno a lo largo del meridiano 100°W, obtenida por Crutchen *et al.* (1971). En el Cuadro 1 se describen los tipos de mesociclones observados en este estudio, mientras que en la Figura 2 se ilustran esquemáticamente algunos ejemplos.

Cuadro 1

Descripción de los patrones nubosos asociados con ciclones a mesoescala observados en imágenes infrarrojas.

TIPO	DESCRIPCIÓN	EJEMPLO
1) Nube coma	Forma similar a una nube frontal	Fig. 2 A
2) Nube espiral	Dos o más bandas nubosas que se proyectan a centro común	Fig. 2 B
3) Carrusel	Anillos de pequeños vórtices	Fig. 2 C
4) Masa ovalada sólida	Nubosidad ciclónica sin centro aparente	Fig. 2 D
5) Nubes convectivas	Nubes cúmulos o cúmulos nimbus agrupadas para formar una banda o masa nubosa	Fig. 2 E

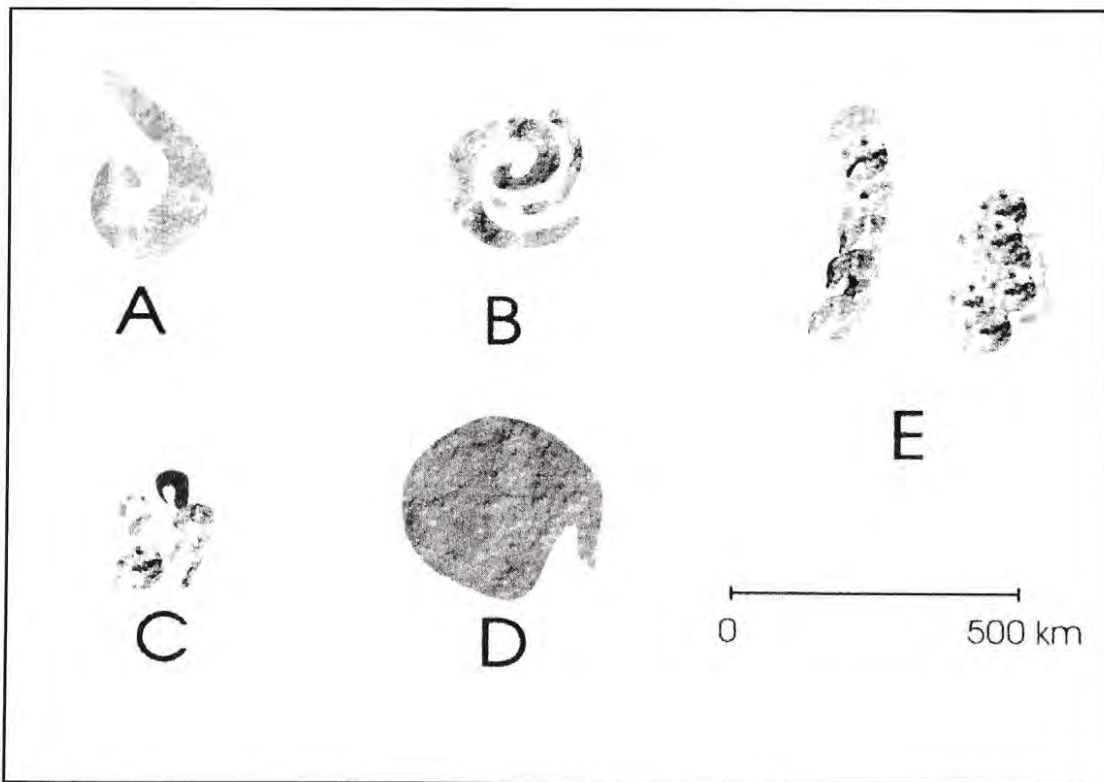


Fig. 2.- Ejemplos ilustrativos de ciclones (vórtices) a mesoescala observados en las cercanías de la península Antártica.

RESULTADOS

Análisis a mesoescala

Actividad ciclónica estacional

En la columna 1 del Cuadro 2 se indica el total de días, por estación, para el cual se tuvo información satelital (llamados días analizables). La diferencia entre el número de días analizables a cada lado de la península se debe a que ocasionalmente la(s) imagen(es) cubrió parcialmente la región bajo estudio. Enero de 1991 es el único mes con un número significativo de días sin información por lo cual resultados para la estación de TV-91 deben ser vistos con precaución. Para el resto del período los días sin información fueron distribuidos aleatoriamente. La columna 2 del Cuadro 2 indica el número total de días ciclónicos ocurridos en ambos lados de la península, mientras que la columna 3 muestra la frecuencia semanal normalizada de estos días para cada estación. La normalización fue obtenida dividiendo el total de días ciclónicos de la estación por un séptimo del total de días analizables. Este cálculo entrega un promedio semanal de la actividad ciclónica eliminando la falta de información de algunos días. (El número total de mesovórtices está representado gráficamente en la Figura 5).

Cuadro 2

Actividades de mesociclones en el sector del mar de Bellingshausen y Weddell de acuerdo con el examen a imágenes satelitales.

ESTACIÓN	(1) Días Analizables		(2) Días Ciclónicos		(3) Frecuencia Semanal normalizada		(4) Días Ciclónicos
	SMB	SMW	SMB	SMW	SMB	SMW	SC
TERMINO DE VERANO	32	40	24	17	5.3	3.0	5
TRANSICIÓN DE OTOÑO	68	74	45	31	4.6	2.9	3
INVIERNO	77	74	31	18	2.8	1.7	4
TRANSICIÓN DE PRIMAVERA	60	61	34	23	4.0	2.6	5
INICIO DE VERANO	54	52	36	33	4.7	4.4	7
TÉRMINO DE VERANO	39	39	22	22	3.9	3.9	7
ANUAL*	291	301	170	122	4.1	2.8	24

* Cálculo realizado usando sólo la información de 1991.

En general, la ocurrencia de días ciclónicos es mayor en las estaciones de verano y mínima en el invierno, con un promedio anual de aproximadamente 4 días ciclónicos en el SMB y 3 en el SMW. Una mayor ocurrencia afectó el SMB respecto a lo observado en el SMW, aunque para el final del período (i.e., IV-91, TV-92) la actividad aumentó en este último sector. Alrededor de un 43% de los días ciclónicos detectados en el SMW ocurrió simultáneamente con días ciclónicos en el SMB, con máxima ocurrencia simultánea en verano y mínima en invierno. Esto puede estar relacionado con una mayor estabilidad de la tropósfera baja en el SMW la cual se acentúa durante el invierno inhibiendo la formación y/o desarrollo de mesovórtices al este de la península. Sólo 24 días ciclónicos fueron detectados en el Sector Continental (SC, ver Fig. 1), la mayoría de ellos con la presencia de mesovórtices localizados en el sector de la Plataforma de Hielo Filcher/Ronne. Para ambos lados de la península, alrededor del 60% de los días mesociclónicos se presentó con la ocurrencia de un solo mesociclón (Figura 3), mientras que para un 30% se observó la presencia simultánea de dos mesociclones dentro del mismo sector. No se encontró una relación entre el número de mesociclones por día ciclónico por estación, indicando una ocurrencia aleatoria a través del año. Por lo tanto, la mayor actividad mesociclónica, en términos de frecuencia de ocurrencia de mesovórtices, tiene lugar durante los meses de verano, disminuyendo en los meses de invierno.

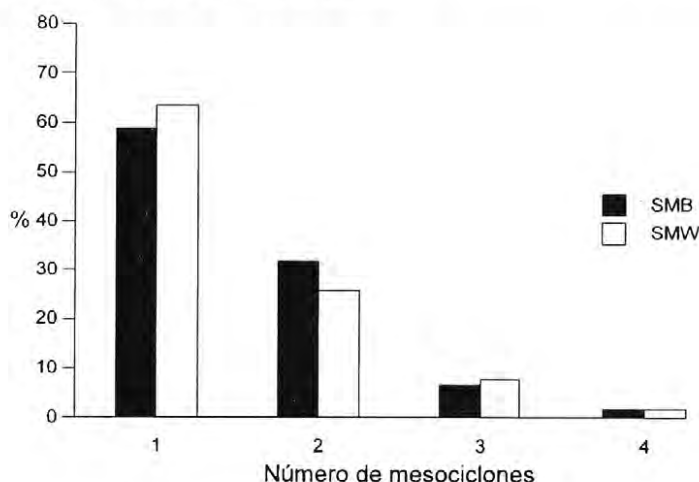


Fig. 3. Porcentajes de días mesociclónicos versus el número de mesovórtices observados.

La Figura 4a muestra el porcentaje de la persistencia de los días ciclónicos, es decir, el número de días ciclónicos consecutivos respecto al total de número de días consecutivos contabilizados en el período de estudio. Esto fue obtenido tomando en cuenta sólo los períodos extensos para los cuales se tuvo días analizables consecutivos, excluyendo los días sin información satelital. Este análisis nos entrega una idea de la duración de la actividad ciclónica (evento) a mesoescala en cada lado de la península. Resultados indican que un poco más de la mitad de los eventos (55% en el SMB y 59% en el SMW) tuvo una persistencia (o duración) de un día. Períodos mesociclónicos de 3 ó más días de duración son poco frecuentes en ambos sectores (ver Figura 4a). La persistencia de los días no-ciclónicos se muestra en la Figura 4b. Alrededor de un 60% de los períodos inactivos tuvo una persistencia de un día, siendo poco frecuentes aquellos de una persistencia mayor a 3 días. En general, la persistencia de los eventos o períodos de días ciclónicos concuerda con la frecuencia semanal normalizada que indica en promedio la ocurrencia de 4 días en el SMB ó 3 días en el SMW cada semana (7 días).

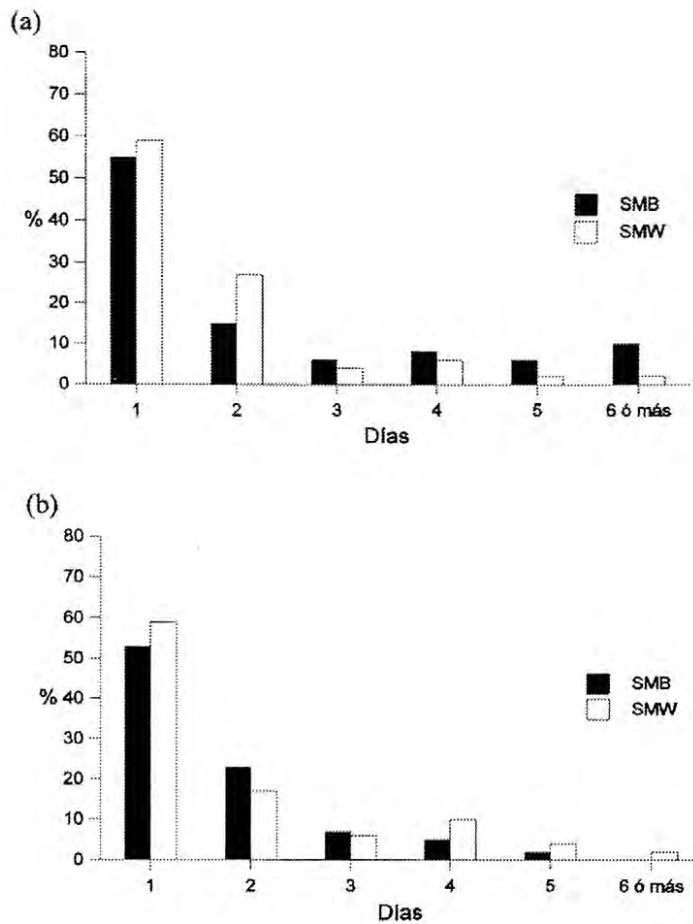


Fig. 4. Porcentaje de la (a) duración (persistencia) de días mesociclónicos y (b) días no-mesociclónicos.

Características satelitales de los mesovórtices

La Figura 5 muestra el resumen del número total de los tipos de mesovórtices observados en los alrededores de la península Antártica (gráficos de barras). En términos de porcentajes (líneas continua y segmentada), a ambos lados de la península cerca de un 65% del total de mesovórtices fueron catalogados como del tipo "nube coma". Este predominio concuerda con los resultados obtenidos por Turner y Thomas (1994) y Turner *et al.* (1996) para el caso de la región estudiada, y complementa los resultados obtenidos en la región subpolar y polar del Pacífico Sur en el cual también se ha encontrado un predominio de mesociclones del tipo nube coma (e.g. Carleton y Fitch, 1993; Carrasco y Bromwich, 1994, 1996; Carrasco *et al.*, 1997). En el SMB, los mesovórtices catalogados como "nube convectiva" fueron el segundo tipo más frecuentemente observado principalmente en invierno. La Figura 6 muestra el porcentaje de mesovórtices por diámetro modal mientras que en la Figura 7 se muestra el porcentaje de cada tipo de mesovórtices por diámetro modal en ambos lados de la península. Alrededor de un 81% de los mesovórtices observados presentan un diámetro en el rango 200 - 499 km, estando la frecuencia más alta en el modo 300-399 km. Este resultado es coincidente con el obtenido por Turner *et al.* (1996) e indica que los mesovórtices que adquieren un tamaño sobre los 700 km son de escasa ocurrencia.

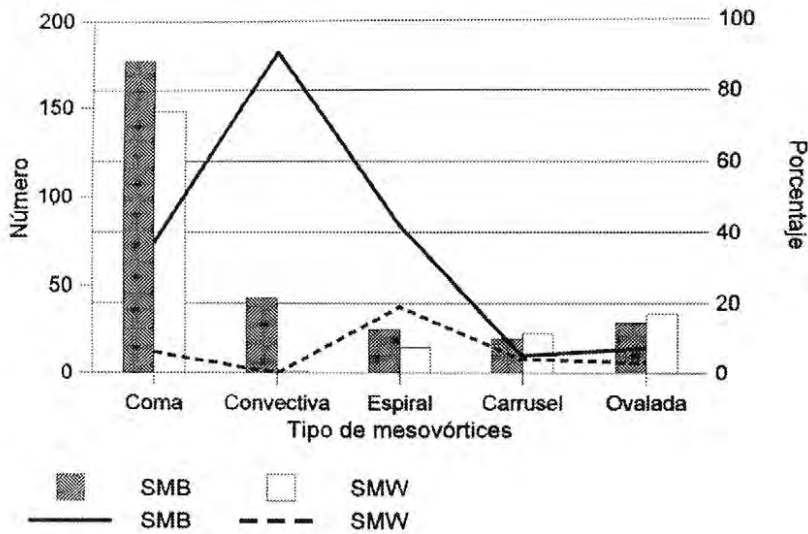


Fig. 5. Total de tipos de mesovórtices observados en las cercanías de la península Antártica. Línea continua (discontinua) indica el porcentaje de mesovórtices de desarrollo vertical significativo en el SMB (SMW).

Cuadro 3

Número total y frecuencia semanal normalizada de mesociclones con desarrollo de nubosidad media/alta en el sector del mar de Bellingshausen.

ESTACIÓN	Número total de mesociclones (1)	Frecuencia del total de mesociclones (2)	Frecuencia de mesociclones significativos (3)	% de mesociclones significativos (4)
TÉRMINO DE VERANO	15	8.1	3.3	41
TRANSICIÓN DE OTOÑO	18	7.4	1.9	25
INVIERNO	33	4.1	3.0	73
TRANSICIÓN DE PRIMAVERA	21	5.7	2.5	46
INICIO DE VERANO	23	7.9	3.0	38
TÉRMINO DE VERANO	10	5.7	1.8	31

Del total de mesovórtices observados en el SMB, un 41% mostró una tonalidad brillante (blanca) de la nubosidad vortical asociada indicando un desarrollo vertical que alcanza las capas medias

de la tropósfera (mesovórtices significativos). Esto contrasta significativamente con el 6% observado en el SMW revelando que la mayoría de las perturbaciones que ocurren al este de la península son de poco desarrollo vertical. La línea continua (discontinua) en la Figura 7 indica el porcentaje de mesovórtices significativos respecto al número total de cada tipo en el SMB (SMW). Se puede ver que un 37% de los mesovórtices del tipo nube coma y un 91% del tipo nubes convectivas presentaron un desarrollo vertical significativo. El Cuadro 3 muestra la frecuencia normalizada estacional de los mesovórtices (columna 2) y de aquellos de desarrollo vertical significativo. Tal como se indicó, la actividad mesociclónica disminuye hacia el invierno. Sin embargo, la fracción de mesovórtices que adquiere un desarrollo significativo durante el invierno es mayor que la fracción en verano. Esto significa que aunque el número de mesovórtices en invierno es menor que en el resto de las estaciones, un 50% de ellos adquiere un desarrollo vertical significativo. De las 52 perturbaciones a mesoescala detectadas en el SC ninguna mostró nubosidad media/alta asociada indicando que éstos, al igual que los observados en el SMW, se desarrollan primordialmente en los primeros niveles de la tropósfera siendo caracterizados por nubosidad baja.

La evaluación del TTN indica un promedio de -37°C para la tonalidad blanca para el invierno y verano, lo que corresponde a alturas que fluctúan entre 470 y 420 hPa desde los 65°S . a los 55°S . en invierno, y entre 420 y 350 hPa en verano. Para la nubes de tonos oscuros (nubes bajas) el promedio del TTN fue respectivamente de -6° y -7°C para el verano e invierno respectivamente. Esto corresponde a alturas de 860 y 720 hPa en verano y de 850 y 740 hPa en invierno entre los 65° y 55°S . Para nubes de tonos grises el promedio TTN fue de -21°C en invierno y verano, correspondiendo a alturas que fluctúan entre 620 y 530 hPa.

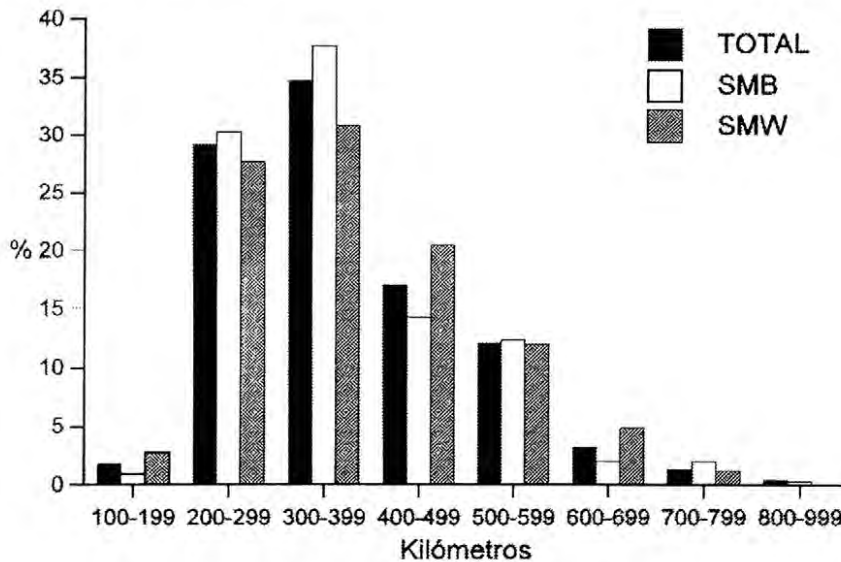


Fig. 6. Porcentaje del diámetro modal promedio de los mesovórtices observados durante enero 1991- febrero 1992.

Descripción de la actividad espacial

La distribución espacial de la actividad mesociclónica durante enero 1991 - febrero 1992 se muestra en la Figura 8. Una normalización de la distribución, para eliminar la distorsión de la proyección estereográfica del mapa, indica que la actividad mesociclónica no se distribuye homogéneamente sino que se concentra en algunos sectores. Así, una mayor actividad fue detectada sobre el lado sur del mar de Bellingshausen, ligeramente al norte de la Plataforma de Hielo Filchner/Ronne, en la entrada oeste

del Paso Drake y sobre el mar de Amundsen. La Figura 9 muestra las trayectorias de todos aquellos mesociclones a los que fue posible hacerle seguimiento en imágenes consecutivas. Puede inferirse que las perturbaciones observadas al oeste de la península tienen en su mayoría un desplazamiento al este con dirección hacia el Paso Drake. Sobre el SMW no se observa una preferida aunque una mayoría de los mesociclones detectados sobre la Plataforma de Hielo Filchner/Ronne y sus cercanías muestran una trayectoria hacia el noreste. La localización final de los mesovórtices sugiere que éstos disipan en las cercanías de la península y la zona austral de América del Sur, y aquellos que cruzan el Paso Drake disipan al norte del mar de Weddell (en el sector suroeste del Océano Atlántico).

La localización inicial y las trayectorias de los mesovórtices significativos observados al oeste de la península se muestran en la Figura 10. La mayoría de ellos se agrupan entre los 55 y 65°S., al norte del límite de la placa de hielo marino. Presentan una trayectoria hacia el Paso Drake y la zona austral del cono sur.

Relación entre la actividad a mesoescala y los patrones a escala sinóptica

Para analizar los patrones sinópticos asociados con la ocurrencia de mesovórtices en ambos lados de la península, se usaron datos numéricos de análisis de las cartas para los niveles de superficie (carta de presión a nivel del mar), de altura geopotencial 700-hPa y 500-hPa, y del espesor geopotencial de 1000-500-hPa producidas por el Centro Meteorológico Australiano.

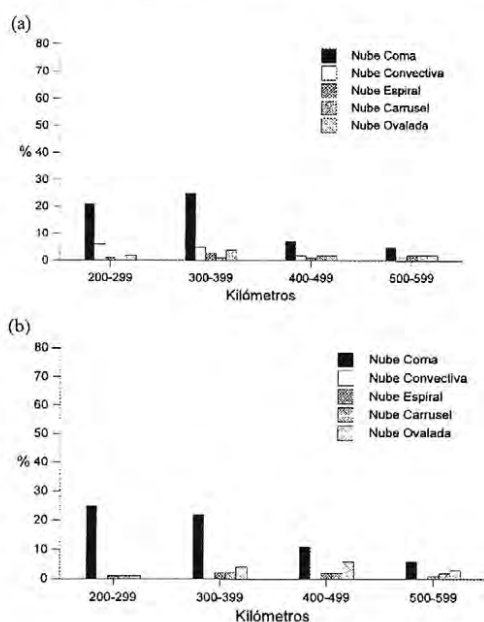


Fig.7. Porcentaje del diámetro modal promedio para cada tipo de mesovortex en (a) SMB y (b) SMW.

Debido a que los mesovórtices pueden ocurrir simultáneamente en ambos sectores, para el análisis de los días ciclónicos se seleccionaron todos aquellos días para los cuales se observó la ocurrencia de mesovórtices en un sector, pero no en ambos. Esto nos permite filtrar aquellos días de ocurrencia simultánea. Los cálculos fueron realizados en forma estacional para evitar la distribución asimétrica de mesovórtices a través del año, obteniéndose promedios y anomalías. Además, para superar la falta de información satelital de algunos días, se realizaron las diferencias entre los días ciclónicos y no-ciclónicos para ambos sectores. En este artículo sólo este último análisis se presenta. Para mayor detalle el lector puede acudir a Carrasco (1994) o Carrasco *et al.* (1997). Las Figuras 11 y 12

muestran respectivamente las diferencias del espesor 1000-500-hPa entre los días ciclónicos y no-ciclónicos para el SMB y SMW durante el año 1991. Los campos de diferencias observados en los otros niveles son similares a aquellos mostrados en las Figuras 11 y 12. Las áreas achuradas identifican las regiones en donde las diferencias son estadísticamente significativas (mejor que un 95%) aplicando el test de Student. En general los resultados indican un dominio de una masa de aire más frío (diferencias negativas) para los días ciclónicos (excepto para la estación IV) en el SMB al mismo tiempo que una masa más cálida (diferencias positivas) afecta el SMW. De igual modo para días ciclónicos en el SMW, hay un dominio de aire frío mientras que en el SMB predomina una masa relativamente más cálida.

Estos resultados concuerdan con los inicialmente encontrados por Lyons (1983) y luego por Carleton y Fitch (1993) en el sentido que la ocurrencia de mesovórtices se observa dentro de una masa relativamente más fría. Esta situación es aún más marcada en el caso de mesociclones que adquieren un desarrollo vertical significativo, tal como lo ilustra la Figura 13 que muestra las anomalías respecto al correspondiente promedio estacional del campo de 700-hPa para los días ciclónicos en los cuales se observaron mesovórtices significativos en el SMB. Note que en la estación de invierno, en donde se registró un alto número de mesovórtices significativos (Cuadro 3), las anomalías están por debajo de los -60 hPa indicando en promedio una masa significativamente más fría, centrada al norte del mar de Bellingshausen y al norte de la zona de hielo marino.

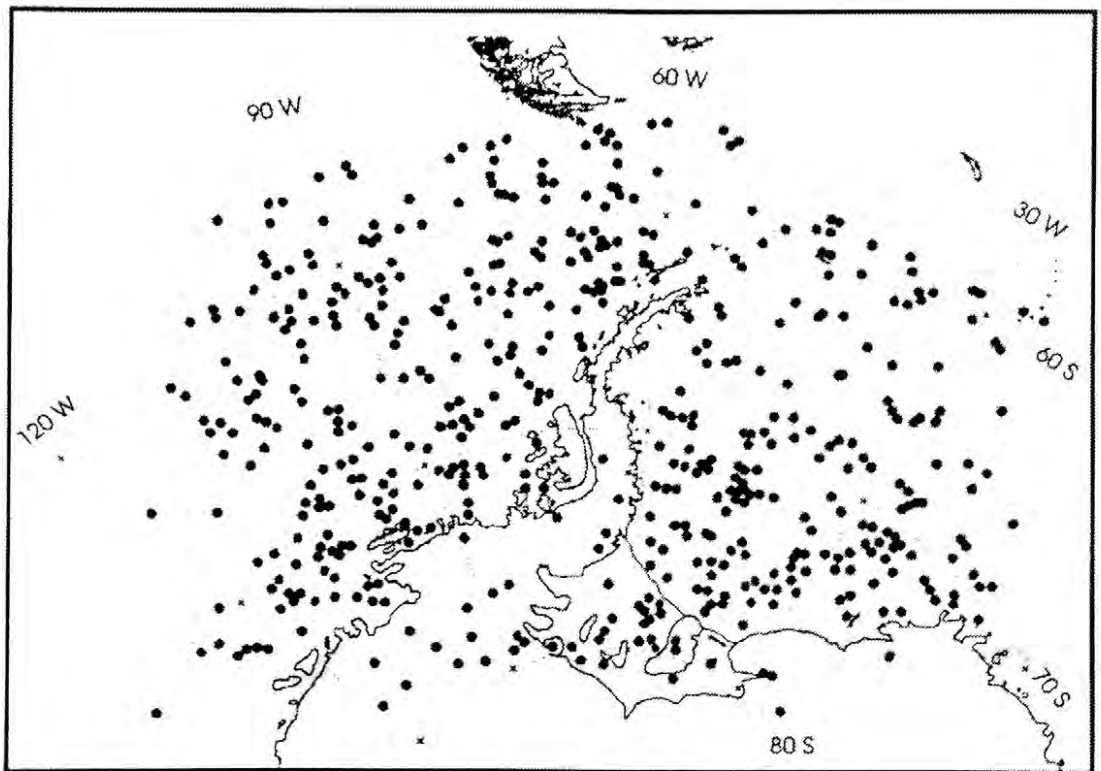


Fig. 8. Distribución espacial de mesovórtices en las cercanías de la península Antártica durante enero 1991 - febrero 1992.

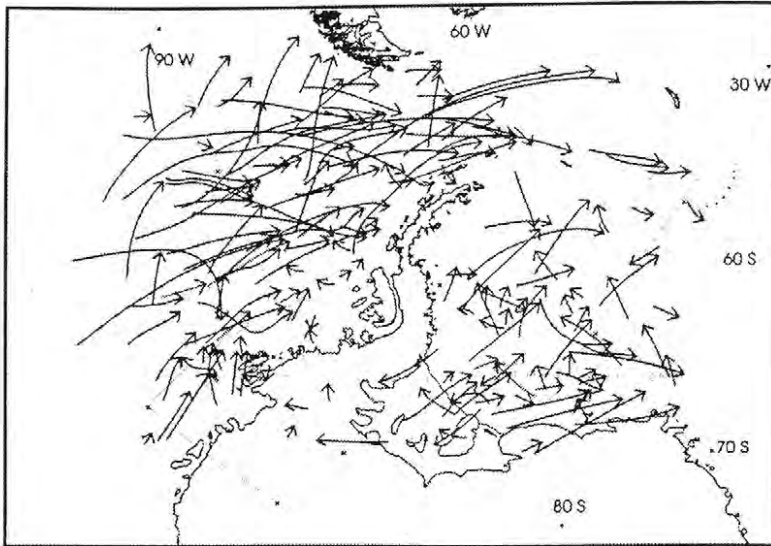


Fig. 9. Trayectorias de los mesovórtices observados durante enero 1991 - febrero 1992.

La Figura 14 muestra la anomalías del campo de presión a nivel medio del mar para la estación de invierno de los días ciclónicos con mesovórtices significativos y para las 12, 24 y 36 horas precedentes. Esto nos permite inferir la evolución de las condiciones a escala sinóptica asociada con la presencia de mesovórtices significativos. Los centros negativos indican un predominio de circulación ciclónica respecto al promedio estacional y representan áreas con mayor actividad de ciclones a escala sinóptica, o bien un debilitamiento de un predominio anticiclónico. Por otra parte centros positivos indican un predominio de circulación anticiclónica o bien un debilitamiento de la circulación ciclónica respecto al promedio estacional. Por lo tanto, se puede inferir que 24 horas antes se establece una circulación ciclónica sobre la península que favorece un marcado flujo del sur sobre el SMB, es decir, aire frío continental antártico es advechado hacia el norte. Note que 36 horas antes el centro negativo se ubica al oeste de la península. El aparente desplazamiento del centro negativo puede indicar, en promedio el desplazamiento sureste de ciclones a escala sinóptica, los que favorecen el flujo de aire frío hacia el norte una vez que éstos se ubican sobre o ligeramente al este de la península.

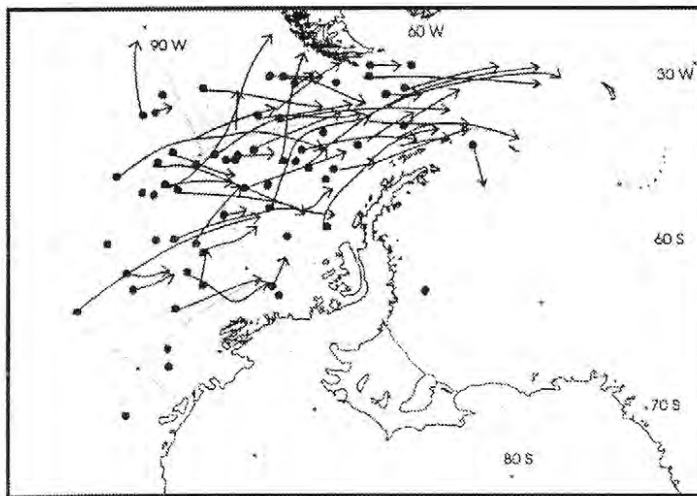


Fig. 10. Trayectorias de los mesovórtices significativos durante enero 1991- febrero 1992.

Actividad de ciclones

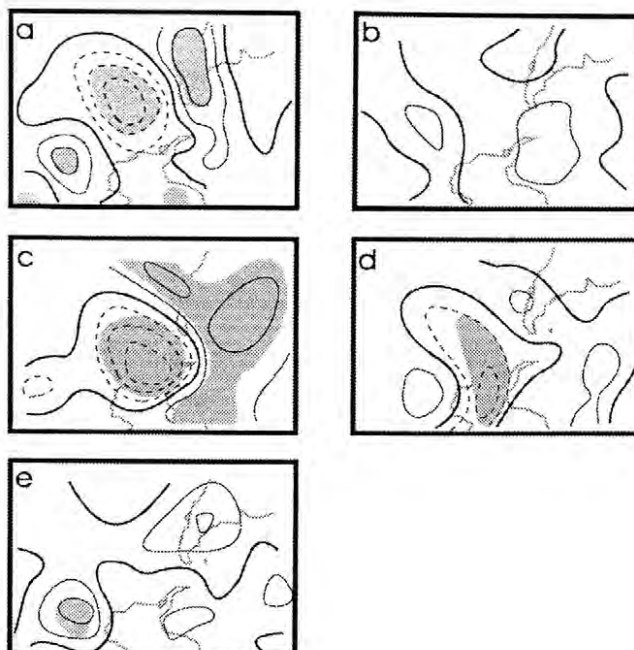


Fig. 11. Diferencias entre el campo de espesores (1000-500 hPa) para días mesociclónicos y no-mesociclónicos en el SMB. a) Término de verano, b) Transición de Otoño, c) Invierno, d) Transición de Primavera y, e) Inicio de Verano. Línea continua (discontinua) indica diferencias positivas (negativas) cada 20 hPa. Areas achuradas indican diferencias estadísticamente diferentes (mejor que 95% usando el test de Student).

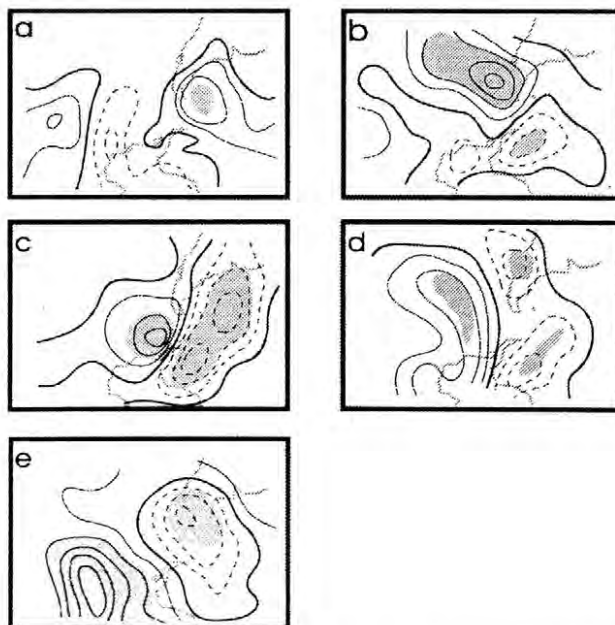


Fig. 12. Diferencias entre el campo de espesores (1000-500 hPa) para días mesociclónicos y no-mesociclónicos en el SMW. a) Término de verano, b) Transición de Otoño, c) Invierno, d) Transición de Primavera y, e) Inicio de Verano. Línea continua (discontinua) indica diferencias positivas (negativas) cada 20 hPa. Areas achuradas indican diferencias estadísticamente diferentes (mejor que 95% usando el test de Student).

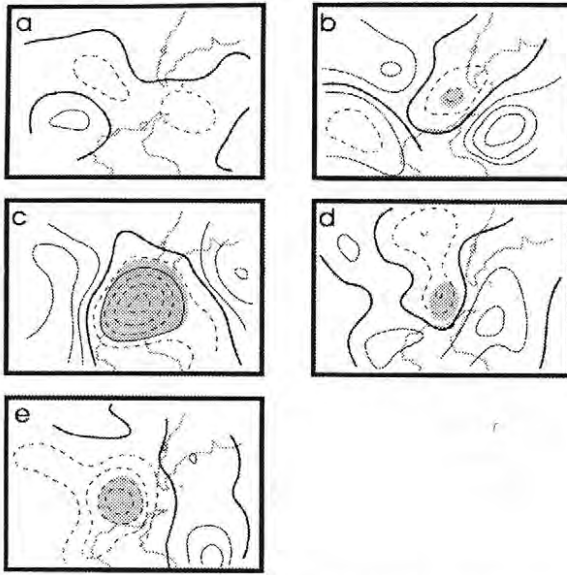


Fig. 13. Anomalías del campo de 700-hPa para días ciclónicos en los cuales se observaron mesovórtices significativos. Línea continua (discontinua) indica diferencias positivas (negativas) cada 20 hPa. Áreas achuradas indican diferencias estadísticamente diferentes (mejor que 95% usando el test de Student).

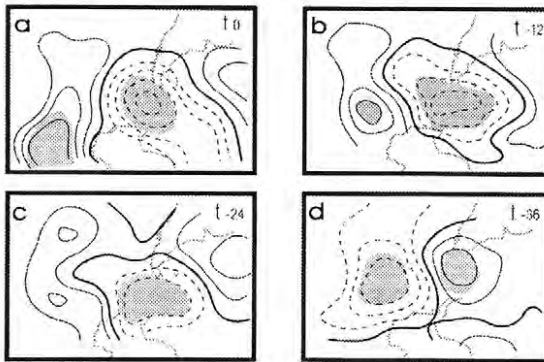


Fig. 14. Anomalías del campo de presión al nivel medio del mar de la estación de invierno para días ciclónicos con presencia de mesovórtices significativos (t_0), y 12 (t_{-12}), 24 (t_{-24}) y 36 (t_{-36}) horas precedentes. Línea continua (discontinua) indica diferencias positivas (negativas) cada 1 hPa. Áreas achuradas indican diferencias estadísticamente diferentes (mejor que 95% usando el test de Student).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados del período analizado revelan una frecuencia de 4 y 3 días ciclónicos por semana en el SMB y SMW, respectivamente. Esto implica una significativa actividad de ciclones a mesoescala en las cercanías de la península Antártica, en donde un gran número de ellos (65%) fueron del tipo nubecoma. El predominio de este tipo de perturbación ciclónica a mesoescala se confirma con los trabajos anteriores de Carleton y Carpenter (1989), Carleton y Fitch (1993), Carrasco y Bromwich (1994, 1996), Carrasco *et al.* (1997) y Turner y Thomas (1994). El diámetro modal indica que la mayoría de los mesovórtices (81%) adquiere un tamaño de entre 200 y 500 km, siendo mayor en el rango 300 a 400 km. Un mayor número de mesovórtices fue observado en el SMB. En general, la mayor actividad se observó durante el verano y la menor en invierno. Sin embargo, una mayor frecuencia de

mesovórtices significativos se observaron en la estación de invierno. La trayectoria de los mesovórtices confirman el hecho que éstos frecuentemente adquieren una dirección noreste hacia el Paso Drake, afectando el cono sur (Tierra del Fuego) y el sector norte de la Península Antártica (ver Lyons, 1983).

La distribución espacial de mesovórtices indica un máximo al norte de la Plataforma de Hielo Filchner/Ronne sobre el Mar de Weddell, un área frecuentemente afectada por vientos fríos provenientes del interior de la Antártica. Estudios de casos individuales (Heinemann, 1996; Turner *et al.*, 1993) señalan que un mecanismo de formación de mesovórtices es la inestabilidad que adquiere la masa de aire frío al interactuar con áreas de mar abierto (polynyas y leads) en donde la temperatura superficial del agua es relativamente más cálida. La ciclogénesis de sotavento en el lado este de la península ha sido señalado como otro posible mecanismo para la formación de ciclones a mesoescala en el SMW (Turner y Row, 1989).

Otros máximos de actividad se detectaron al noroeste de la península y sobre el Mar de Amundsen. El primero se ubica ligeramente al norte de una zona baroclínica (fuerte gradiente horizontal de temperatura) que se forma a lo largo del borde norte de la extensión de hielo marino. Esta formación ocurre debido a las características frías que adquiere el aire localizado sobre el hielo marino y las características relativamente más cálidas que adquiere el aire sobre el océano. Esto indica que la inestabilidad baroclínica, que puede verse acentuada por advecciones de aire frío y/o cálido, es un mecanismo de formación y/o desarrollo de mesovórtices. Por otro lado, masas de aire frío pueden ser inestabilizadas al desplazarse sobre una superficie oceánica relativamente más cálida. Este proceso "interacción aire-mar" puede resultar en fuerte convección siendo este otro mecanismo que gatille la formación y/o desarrollo de ciclones a mesoescala. El segundo máximo de actividad se ubica adyacente a una zona de convergencia de vientos catabáticos (Parish y Bromwich, 1987, 1991). La interacción de este flujo de aire frío continental puede interactuar con aire relativamente más cálido formando también una zona baroclínica en donde perturbaciones ciclónicas a mesoescala pueden formarse y/o desarrollarse tal como ocurre en la bahía Terra Nova en la región del mar de Ross (Bromwich, 1991; Carrasco y Bromwich, 1994, 1996).

El alto porcentaje de mesovórtices con desarrollo vertical observados en el SMB respecto a aquellos observados en el SMW son el resultado de dos ambientes atmosféricos distintos que predominan en ambos lados de la península. El lado oeste, que se define por un clima sub-polar con frecuente incursión de aire relativamente más cálido y húmedo, es potencialmente menos estable que la masa de aire en el lado este de la península, definido por un clima continental antártico afectado frecuentemente por aire relativamente más frío y estable (Schwerdtfeger, 1970; Parish, 1977). Los estudios de eventos individuales de vórtices a mesoescala, señalan además que las perturbaciones que adquieren un desarrollo vertical significativo en el SMW son acompañadas por la aproximación de una vaguada en altura (analizada normalmente en el nivel de 500 hPa) que aporta vorticidad ciclónica (condición que favorece el desarrollo de perturbaciones ciclónicas) sobre el sector donde se forman y/o desarrollan los mesovórtices. Estas condiciones atmosféricas también se observan para los mesociclones de fuerte desarrollo observados en el SMB. Sin embargo, el poco desarrollo que adquiere la mayoría de los mesovórtices al este de la península indica que la contribución favorable de los niveles altos (vaguada en aproximación) es bastante menos frecuente que en SMB. El análisis de la TTN indica que los mesovórtices significativos pueden alcanzar niveles de la atmósfera media (500 hPa), y que la gran mayoría de las perturbaciones observadas en el SMW no sobrepasa los 700 hPa de altura.

El análisis sinóptico asociado con la actividad ciclónica a mesoescala revela que para los días ciclónicos prevaleció una masa de aire frío, es decir una vaguada fría, en la troposfera media - alta sobre el sector en donde se observaron los mesociclones. Esto, una vez más, confirma los resultados anteriores los que indican que los mesovórtices se forman o desarrollan dentro de una masa de aire frío (Lyons, 1983; Carleton y Fitch, 1993). La evolución de las condiciones a escala sinóptica asociadas con mesovórtices significativos señala el establecimiento de una circulación ciclónica sobre la península, probablemente ocasionada por ciclones sinópticos en tránsito o disipando en el área, que favorece un flujo norte de aire frío sobre el SMB.

Se hace necesario un mayor estudio sobre estos fenómenos, en cuanto a su estructura dinámica y termodinámica, así como sobre las complejas interacciones que ocurren entre la escala sinóptica y subsinóptica para una mayor comprensión y representación en los modelos numéricos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Oficina de Programas Polares de la Fundación Nacional de la Ciencia (National Science Foundation) de los Estados Unidos de América, vía grant OPP-9117448 y OPP-9218949 otorgados al Dr. David H. Bromwich. Las imágenes satelitales fueron obtenidas a través del Sr. Robert Whritner. Gran parte de esta investigación se realizó mientras el primer autor efectuaba sus estudios en la Universidad del Estado de Ohio, EE.UU.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROMWICH, D.H., 1991. Mesoscale cyclogenesis over southwestern Ross Sea linked to strong katabatic winds. *Monthly Weather Review*, 119, 1736-1752.
- CARLETON, A.M. y D.A. CARPENTER, 1989. Satellite climatology of "polar air" vortices for the Southern Hemisphere Winter. *Polar and Arctic Lows*, P.F. Twitchell, E.A. Rasmussen, and K.L. Davidson, Eds., A Deepak Publishing, 401-413.
- CARLETON, A.M. y M. FITCH, 1993. Synoptic aspects of Antarctic mesocyclones. *Journal of Geophysical Research-atmosphere*, 98: 12997-13018.
- CARRASCO, J.F., 1994. Dynamics of mesoscale cyclogenesis adjacent to the Pacific coast of Antarctica. Ph.D. Dissertation, Atmospheric Sciences Program, The Ohio State University, 286 pp.
- CARRASCO, J.F. y D.H. BROMWICH, 1993. Interannual variation of mesoscale cyclones near the Antarctic Peninsula. *Fourth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, American Meteorological Society, 499-500.
- CARRASCO, J.F. y D.H. BROMWICH, 1994. Climatological aspects of mesoscale cyclogenesis over the Ross Sea and Ross Ice Shelf regions of Antarctica. *Monthly Weather Review*, 122: 2405-2425.
- CARRASCO, J.F. y D.H. BROMWICH, 1996. Mesoscale cyclone activity near Terra Nova Bay and Byrd Glacier. *Antarctic During 1991. The Global Atmosphere and Ocean System*, 5: 43-72.

- CARRASCO, J.F., D.H. BROMWICH y Z. LIU, 1997. Mesoscale cyclone activity over Antarctica during 1991, Part 2: Near the Antarctic Peninsula, *Journal Geophysical Research-Atmosphere*, in press.
- CRUTCHER, H.L., R.L. JENNE, J.J. TALJAARD y H. VAN LOON, 1991. Climate of the upper air: Southern Hemisphere, *NAVAIR, 50-1C-58*, U.S. Navy, Washington, D.C., 62 pp.
- FITCH, M. y A.M. CARLETON, 1992. Antarctic mesoscale regimes from satellite and conventional data. *Tellus*, 44A:80-196.
- FORBES, G.S. y W.D. LOTTES, 1985. Classification of mesoscale vortices in polar airstreams and the influence of large scale environment on their evolution. *Tellus*, 37A: 132-155.
- HEINEMANN, G., 1990. Mesoscale vortices in the Weddell Sea region (Antarctica). *Monthly Weather Review*, 118: 779-793.
- HEINEMANN, G., 1996. A wintertime polar low over the eastern Weddell Sea (Antarctica): A study with AVHRR, TOVS, SSM/I and conventional data. *Meteor. Atmos. Phys.*, 58, 83-102.
- LYONS, S.W., 1983. Characteristics of intense Antarctic depressions. First International Conference on Southern Hemisphere Meteorology, American Meteorological Society, 238-240.
- PARISH, T.R., 1977. A low-level jet of cold air near the tip of the Antarctic Peninsula: An example of inertial winds. Research Report, 47 pp. [Dept. Atmospheric and Oceanic Sciences, 1225 W. Dayton St., Madison, WI 53706].
- PARISH, T.R. y D.H. BROMWICH, 1987. The surface windfield over the Antarctic ice sheets. *Nature*, 328:, 51-54.
- PARISH, T.R. y D.H. BROMWICH, 1991. Continental-scale simulation of the Antarctic katabatic wind regime. *Journal of Climate*, 4(2): 135-146.
- RASMUSSEN, E., 1981. An investigation of a polar low with spiral cloud structure. *Jour. of Atmospheric Sci.*, 38: 1785-1792.
- SCHWERTFEGER, W. 1970. The Climate of the Antarctica, Vol. 14, *World Survey of Climatology*, H.E. Landsberg Ed., Elsevier, 253-355.
- SCHWERTFEGER, W., 1984. *Weather and Climate of the Antarctic*, 261 pp., Elsevier, New York.
- TURNER, J. y M. ROW, 1989. Mesoscale vortices in the British Antarctic Territory. In *Polar and Arctic Lows*. Eds P.F. Twitchell, E.A. Rasmussen, and K.L. Davison, A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, 347-356.
- TURNER, J. y J.P. THOMAS, 1992. Southern ocean weather systems in satellite imagery and operational numerical analyses. Sixth Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Ameri. Meteorol. Soc., 149-152.
- TURNER, J. y J.P. THOMAS, 1994. Summer-season mesoscale cyclones in the Bellingshausen-Weddell region of the Antarctic and links with synoptic-scale environment. *Internat. Jour. of Climato.*, 14: 871-894.

- TURNER, J., T.A. LACHLAN-COPE, D.E. WARREN y C.N. DUNCAN, 1993. A mesoscale vortex over Halley Station, Antarctica. *Monthly Weath. Rev.* 121: 1317-1336.
- TURNER, J., G. CORCORAN, S. CUMMINS, T. LACHLAN-COPE y S. LEONARD, 1996. Seasonal variability of mesocyclone activity in the Bellingshausen/Weddell region of Antarctica. *The Global Atmosphere and Ocean System*, in press.
- VAN WOERT, M. L., R.H. WHITNER, D.E. WALISER, D.H. BROMWICH y J.C. COMISO, 1992. ARC: A source of multisensor satellite data for polar science. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union*, 37(6): 65, 75-76.