



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA**

**BLOQUEOS ATMOSFÉRICOS Y BAJAS SEGREGADAS:
CLIMATOLOGÍAS, PROYECCIONES Y EFECTOS SOBRE LA
VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN EN CHILE**

PROYECTO PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN
METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA

JUAN PABLO BOISIER ECHENIQUE

PROFESOR GUÍA:

RENÉ GARREAUD SALAZAR

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

HUMBERTO FUENZALIDA PONCE

JOSÉ RUTLLANT COSTA

ALDO MONTECINOS GULA

SANTIAGO DE CHILE
ABRIL 2008

RESUMEN

En el marco de la variabilidad de la precipitación en Chile, se estudian dos fenómenos atmosféricos de gran escala: Altas de Bloqueo y Bajas Segregadas. Estos fenómenos fueron caracterizados, respectivamente, como anomalías positivas persistentes y depresiones subtropicales en campos diarios de altura geopotencial de 500 hPa.

La climatología de Anomalías Positivas Persistentes (APPs), construida con datos de reanálisis (NCEP-NCAR) para el periodo 1958-2005, muestra un régimen en la frecuencia de episodios caracterizado por un claro ciclo anual y una intensa variabilidad interanual. Esta variabilidad presenta una significativa coherencia con el ciclo de ENOS para los eventos desarrollados sobre el sector oriental del Océano Pacífico austral, particularmente durante la primavera del Hemisferio Sur. La actividad de APPs en este Hemisferio se concentra principalmente sobre el Pacífico austral, donde se observan en promedio más de seis episodios anuales, con ocho días persistencia. Los patrones espaciales APPs, clasificados en forma de grupos, son coherentes con los modos de circulación más importantes del Hemisferio Sur. Las frecuencias estacionales asociadas a gran parte de estos grupos de APPs, coincidentes o no a las fases del ciclo ENOS, revelan una modulación significativa sobre el régimen de precipitación en Chile. Un modo anular de APPs, significativamente coherente con la fase negativa de la Oscilación Antártica, exhibe una influencia positiva en las precipitaciones de Chile central durante el otoño austral.

La densidad media de ciclones extratropicales (CETs) en el Hemisferio Sur, tiene una distribución espacial que se concentra principalmente en latitudes altas, pero revela un máximo local en latitudes subtropicales. El registro de CETs asociado a este sector exhibe una distribución similar a la de Bajas Segregadas descrita en estudios recientes. La variabilidad interanual del fenómeno aparece explicada en parte por la frecuencia de APPs en latitudes mayores.

Los fenómenos en estudio fueron caracterizados sobre datos del modelo acoplado de circulación global del centro Hadley (*HadCM3*). La climatología de las APPs, construida sobre los campos representativos del clima presente, reproduce la distribución espacial observada en el reanálisis, pero su frecuencia se subestima en un factor cercano a 2/3 en las zonas de alta densidad. Una proyección hacia fines del siglo XXI, bajo el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero tipo *IPCC-SRES A2*, muestra un significativo aumento de APPs en latitudes altas. Las diferencias observadas son altamente dependientes de la estación del año, donde por ejemplo, destaca el aumento de APPs sobre la península Antártica durante el otoño austral.

AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos a los académicos del departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF) por su ayuda frente a las distintas interrogantes surgidas a lo largo de este estudio. En particular quiero agradecer a René Garreaud por incentivar y guiar el desarrollo del trabajo, y a Maisa Rojas por la contribución y explicación de varios de los datos tratados acá. Quiero también agradecer a mi familia y amigos por el apoyo paralelo entregado durante este periodo.

Este trabajo fue realizado como parte del proyecto Milenio sobre la variabilidad del clima de Chile (Anillo ACT-19). Las observaciones de precipitación en Chile fueron aportadas por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Los datos del modelo HadCM3 son parte de la base CMIP3 (*Coupled Model Intercomparison Project phase 3 multi-model dataset*) para los proyectos de investigación en el clima global WCRP (*World Climate Research Programme*).

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen	i
Agradecimientos	ii
Tabla de contenidos	iii
1 INTRODUCCIÓN	1
2 ANOMALÍAS POSITIVAS PERSISTENTES	
2.1 Bloqueos y APPs	4
2.2 Datos	6
2.3 Climatología de APPs en el Hemisferio Sur	9
2.4 Modos principales: grupos de APPs	13
2.5 Variabilidad interanual	21
2.6 APPs y precipitación en Chile	25
3 DEPRESIONES EXTRATROPICALES EN EL HEMISFERIO SUR	
3.1 Ciclones extratropicales en altura y Bajas Segregadas: antecedentes	34
3.2 Identificación y climatología de ciclones en 500 hPa	35
3.3 Depresiones subtropicales	38
3.4 CETs y ciclones en superficie	43
3.5 Influencias de APPs en la frecuencia de depresiones extratropicales	46

4 PROYECCIONES

4.1 HadCM3: descripción del modelo	49
4.2 HadCM3 y Z_{500}	50
4.3 APPs	57
4.4 CSTs	64
5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	70
Bibliografía	75

ANEXOS

A Identificación de los modos espaciales de APPs	80
B APPs en el Hemisferio Norte	83
C Tendencias de APPs durante la segunda mitad del siglo XX	89
D Tendencias de CETs	93

1 INTRODUCCIÓN

El régimen de precipitación en el centro y sur de Chile se asocia principalmente con el paso de sistemas frontales que penetran con periodicidad semanal desde el Océano Pacífico, y con forzamiento orográfico que ejerce la cordillera de los Andes sobre el flujo zonal. Estos rasgos meteorológicos están determinados por una condición sinóptica que, por su parte, depende de factores de mayor escala, como la posición e intensidad del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur Oriental. Este último explica, por ejemplo, el marcado ciclo anual de precipitación observado en varias regiones de Chile (Fuenzalida 1982). Estos factores de gran escala determinan también la variabilidad observada en otras escalas de tiempo, como las tasas de precipitación observadas año a año en la zona central del país que, en la mayoría de los casos, responden coherentemente a las fases del ciclo ENOS (El Niño – Oscilación del Sur; e.g., Aceituno 1988, Kiladis y Diaz 1989). El patrón de circulación en el Hemisferio Sur asociado a periodos de ENOS en su fase cálida (“El Niño”) muestra típicamente anomalías anticiclónicas en todos los niveles de la tropósfera situada sobre la parte oriental del Océano Pacífico austral (Karoly 1989, Garreaud y Battisti 1999). Este patrón genera bloqueos atmosféricos hacia latitudes inmediatamente más bajas que, sumados a la condición de un Anticiclón Subtropical deprimido, favorecen trayectos de tormentas anómalamente desplazados hacia el norte (Rutllant y Fuenzalida 1991). Si bien las fluctuaciones se aprecian a escalas interanuales, este tipo de perturbaciones (bloqueos) ocurren en escalas de tiempo intraestacionales, interrumpiendo la actividad de alta frecuencia (sinóptica) que domina en latitudes medias y altas (Kidson y Sinclair 1995).

Los rasgos de la variabilidad intraestacional del clima de Chile son claramente apreciables en los registros de precipitación de distintas regiones. El régimen principalmente invernal de la zona central se ve usualmente dominado por episodios de fuertes precipitaciones agrupados en periodos de algunas semanas. También, en regiones de alta precipitación, se aprecian periodos secos que se extienden por varios días (más de una semana) en los meses climatológicamente más húmedos. La motivación inicial de este trabajo es de caracterizar esta variabilidad intraestacional mediante rasgos de gran escala que expliquen un posible decaimiento de la actividad sinóptica (e.g., Garreaud et al. 2006). Patrones asociados a estos episodios secos anómalamente extensos en el sur de Chile, revelan la presencia de fenómenos descritos anteriormente como forzantes de anomalías de precipitación en el país: los

mencionados Anticiclones de Bloqueo, observados sobre distintas zonas del Pacífico austral, y Bajas Segregadas en latitudes subtropicales.

Este estudio tiene como objetivo general entender las influencias de anomalías en la circulación, en escalas de tiempo mayores a la semanal, sobre la variabilidad de la precipitación en Chile. Específicamente, se busca: (a) caracterizar el impacto de bloqueos atmosféricos sobre el régimen estacional de la precipitación en el centro y sur de Chile, (b) determinar las influencias de estas perturbaciones en el régimen de depresiones de latitudes subtropicales, y (c) evaluar posibles escenarios futuros para el régimen de estos fenómenos.

El trabajo expuesto en este informe se divide en tres partes principales (capítulos 2, 3 y 4). La primera se refiere a un estudio de bloqueos atmosféricos caracterizados como Anomalías Positivas Persistentes (APPs) sobre campos de altura geopotencial en la tropósfera media (500 hPa). En este capítulo se describe una climatología del fenómeno y se analiza su estructura espacial y variabilidad temporal en relación al régimen de precipitación en el Hemisferio Sur, en particular, respecto a observaciones en estaciones del centro y sur de Chile.

El tercer capítulo describe un estudio de ciclones extratropicales en el Hemisferio Sur y de un subgrupo de éstos sobre latitudes subtropicales; se busca con este último representar el régimen de Bajas Segregadas descrito en trabajos recientes (Fuenzalida et al. 2005). Los dos grupos de ciclones fueron identificados mediante técnicas simples sobre los mismos campos usados en la primera parte (altura geopotencial en 500 hPa). Luego, se analizan sus distribuciones espaciales y temporales, así como la relación de sus regímenes con la variabilidad de las APPs registradas en la primera parte.

Por último, en la tercera parte (cuarto capítulo) se evalúa un escenario futuro de los dos fenómenos estudiados en los capítulos 2 y 3, mediante la reconstrucción de sus climatologías sobre campos del modelo global HadCM3. Con datos de fines de los siglos XX y XXI, se analiza el comportamiento del modelo en la reproducción de los regímenes actuales de APPs y ciclones extratropicales, y se exponen las proyecciones de éstos hacia un clima futuro bajo un escenario de emisiones de gases de efecto invernadero tipo *SRES A2* (IPCC 2001).

Si bien la comprensión de parte del clima de Chile, en el contexto de la variabilidad de la circulación en el Hemisferio Sur, es la principal motivación para este trabajo, gran parte de los análisis realizados se extienden para todo el globo. Los resultados para el Hemisferio Norte, la

mayor parte de ellos descritos en los anexos, se han incluido con el fin de comparar aspectos de tipo global en la circulación, como los cambios en el régimen de APPs hacia un clima futuro.

2 ANOMALÍAS POSITIVAS PERSISTENTES

2.1 Bloqueos y APPs

Los bloqueos atmosféricos se reconocen habitualmente como fenómenos de gran escala presentes en latitudes medias-altas y con periodos de tiempo mayores a los asociados a perturbaciones sinópticas. Estos fenómenos, que muestran patrones de circulación donde el flujo normal de los “Oestes” se ve interrumpido, juegan un papel fundamental en la variabilidad de baja frecuencia propia de esas latitudes. Típicamente, estas perturbaciones se manifiestan como una redirección o bifurcación del flujo zonal en torno a una alta persistente de estructura barotrópica (Rex 1950; Fig. 2.1), aunque la existencia de esta última no es una condición necesaria para que ocurra un bloqueo (Liu 1994). A partir de esta definición subjetiva se han construido índices muy usados que caracterizan los bloqueos a partir de anomalías de gradientes meridionales de presión o de viento zonal sobre latitudes medias-altas (e.g., Lejenäs y Økland 1983, Tibaldi y Molteni 1990). Concibiendo los bloqueos como fenómenos intrínsecamente ligados a la ocurrencia de altas de presión persistentes, se suelen definir las Anomalías Positivas Persistentes sobre campos de presión o geopotencial (APPs) para su estudio. Éstas constituyen condiciones menos estrictas en la situación espacial de los bloqueos (se analizan naturalmente en mapas y no como índices asociados a latitudes fijas) y permiten representar –en comparación con los análisis armónicos– el carácter episódico de la variabilidad atmosférica.

Las APPs en una cierta región están estrechamente asociadas a bloqueos en el flujo zonal de latitudes inmediatamente menores (Liu 1994). En Dole y Gordon (1983) se describe, a partir de los primeros reanálisis atmosféricos, una distribución espacial de anomalías persistentes tanto positivas como negativas para el Hemisferio Norte, donde se aprecian tres zonas de ocurrencia preferenciales: sobre los océanos Pacífico y Atlántico norte y sobre la región Soviética boreal. Se destaca una mayor frecuencia de casos positivos sobre los negativos, y se resalta la buena representación que muestran las APPs en la variabilidad de baja frecuencia al compararlas con datos filtrados. Trenberth y Mo (1985) realizan un análisis similar para el Hemisferio Sur, donde se aprecian zonas preferenciales de anomalías persistentes al sur de Nueva Zelanda y en torno a la península Antártica. En este trabajo se

destaca también la similitud que las zonas preferenciales de bloqueos –asociadas a APPs de cinco o más días de persistencia– tienen con las distribución que caracteriza la variabilidad atmosférica en la banda intraestacional (8-64 días, Trenberth 1982). También se señala que, así como los anticiclones constituyen las anomalías positivas en latitudes altas durante episodios de bloqueos, la presencia de núcleos fríos segregados hace la contraparte como anomalías negativas observadas en latitudes más bajas.

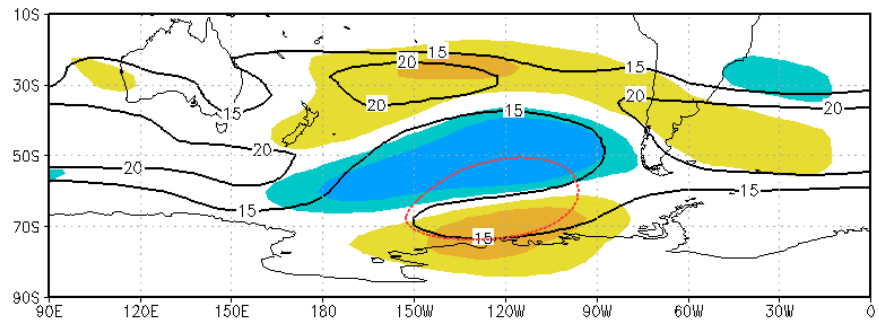


Fig. 2.1 Compuestos relativos a episodios de anomalías positivas persistentes (APPs) centrados en 60S y 120W (ver detalle en el texto). Magnitud del viento geostrófico en 500 hPa (línea continua) y su anomalía (colores). Línea punteada indica contorno de 100 mgp en anomalías de Z_{500} .

En el reciente artículo de Renwick (2005, referenciado en adelante como R05) se hace una simple pero clara descripción de APPs en el Hemisferio Sur en base a datos de reanálisis (NCEP-NCAR y ECMWF). La climatología ahí descrita muestra una distribución espacial de APPs confinada a latitudes medias y altas, con una zona de máxima densidad sobre el Océano Pacífico austral. Esta distribución sintetiza patrones de ocurrencia del fenómeno con diferentes estructuras. En particular, se observa una agrupación de APPs cuya distribución zonal muestra tres máximos en torno al círculo polar (número de onda 3) y que es más común en años de “La Niña”. Otro grupo, muestra un máximo de frecuencia en el sector oriental del Pacífico austral, y es coherente con la fase positiva de ENOS. APPs en esta zona son representativos de los Anticiclones de Bloqueo discutidos en Rutllant y Fuenzalida (1991) y Montecinos y Aceituno (2003), fundamentales en el mecanismo que favorece una mayor frecuencia de tormentas en la zona central de Chile para años tipo “El Niño”.

2.2 Datos

Los análisis que se describen en las siguientes secciones fueron realizados sobre un conjunto de episodios de APPs, obtenidos a partir de datos globales de anomalías de altura geopotencial en 500 hPa (Z_{500}'). La base original utilizada corresponde a 48 años (1958-2005) de campos diarios de Z_{500} obtenidos del reanálisis NCEP-NCAR (*National Center for Environmental Prediction – National Center for Atmospheric Research, USA*; Kalnay et al. 1996). Conservándose la resolución original del reanálisis (malla de 2.5° de resolución correspondiente a 73×144 puntos latitud-longitud), se calcularon en cada punto de grilla las series diarias de Z_{500}' , mediante la sustracción de un ciclo anual. Este ciclo se obtuvo como el promedio climatológico de los valores diarios de Z_{500} correspondiente al periodo 1968-1996, que fue posteriormente suavizado mediante la doble aplicación de un promedio móvil de 31 días. Con este filtro se eliminó el ruido resultante de la alta variabilidad atmosférica, y se representaron los armónicos y subarmónicos del ciclo anual asociados a la serie completa (e.g., Fig. 2.2a). Se construyó paralelamente un conjunto de datos con tendencia removida. Calculados a partir de las series de anuales Z_{500} , los datos resultantes se obtuvieron mediante el ajuste lineal de las series completas de Z_{500}' con los parámetros de la curva de tendencia asociada.

Los análisis de precipitaciones se hicieron a partir de observaciones en fuentes fijas y sobre mapas globales. Las diez estaciones consideradas abarcan el centro y sur de Chile, desde La Serena (30°S) hasta Punta Arenas (53°S), y presentan series largas de registros diarios (más de 30 años). La Fig. 2.3 ilustra la precipitación mensual correspondiente a cada estación y los periodos de cada serie incluidos en los análisis. Estos periodos corresponden a 31 años de observación continua, en la mayor parte de los casos desde 1975 al 2005, salvo en Puerto Aysén, Balmaceda y Punta Arenas, donde no existen registros recientes, o aparecen en forma interrumpida. Los mapas globales de precipitación se obtuvieron de la base CMAP (*CPC Merged Analysis of Precipitation*) producto construido por el centro CPC (*Climate Prediction Center*) de la agencia NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Los datos, mapas de mensuales de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ latitud-longitud de resolución disponibles para el periodo 1979-2005, son el resultado de un análisis de asimilación de datos que incluye estimaciones de precipitación a partir señales de microondas e infrarrojas obtenidas en satélites de órbita baja (polar) y geoestacionarios, además de observaciones de precipitación en superficie (detalles del método en Xie y Arkin 1997).

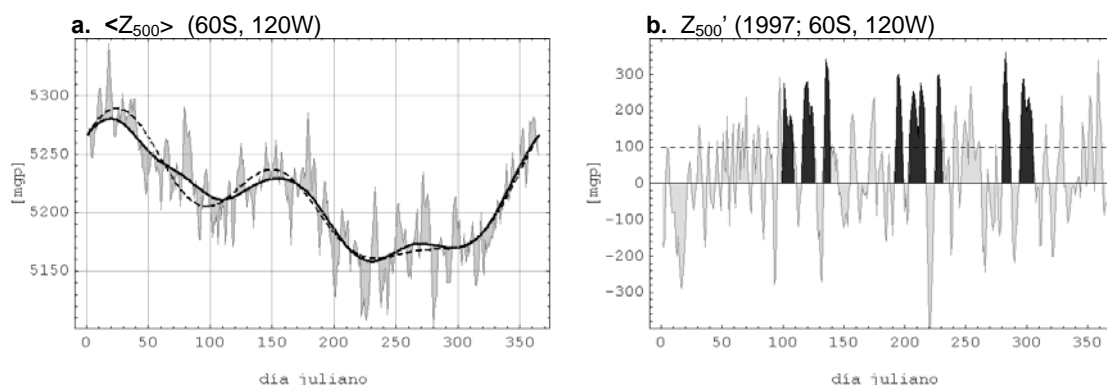


Fig. 2.2

- a.** Promedio climatológico de Z_{500} en 60S y 120W. En grueso, serie filtrada mediante un promedio móvil de 31 días aplicado dos veces. Línea segmentada representa el valor medio más los armónicos correspondientes a 4, 6 y 12 meses, retenidos de la serie completa.
- b.** Serie de tiempo de las anomalías de Z_{500} en 60S y 120W durante 1997. En gris oscuro se indican los episodios de APPs (se definen en la siguiente sección).

El ciclo ENOS se estudió a partir de las series mensuales de anomalías en la temperatura superficial del mar de la región ecuatorial Niño-3.4 (SST3.4; $\pm 5^\circ$ lat., 170-120°W), índice reconocido por su buena representación del fenómeno, particularmente en su fase cálida (Hanley et al. 2003). Los análisis de nubosidad se hicieron con datos globales de radiación de onda larga (ROL), interpolados a partir de información satelital (Liebmann y Smith 1996). Los modos anulares del Hemisferio Sur y Norte fueron caracterizados mediante los índices de las oscilaciones Antártica (AAO) y Ártica (AO), respectivamente. Éstos corresponden al primer modo de un análisis de funciones ortogonales empíricas (EOF), aplicado sobre los campos mensuales de altura geopotencial de 700 hPa y 1000 hPa para el Hemisferio Sur y Norte respectivamente. Un tratamiento similar, pero sobre un dominio más regional, se utiliza para determinar el índice de la oscilación del Atlántico Norte (NAO), incluido también en los análisis del Hemisferio Norte.

Los datos de precipitación en las estaciones de Chile fueron facilitados por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). El conjunto restante de datos se obtuvo de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica Norteamericana (NOAA) a través de los sitios Web del Centro de Predicción del Clima (CPC, <http://www.cpc.noaa.gov>) y del Centro de Diagnóstico del Clima (CDC, NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA; <http://www.cdc.noaa.gov/>).

[mm mes⁻¹]

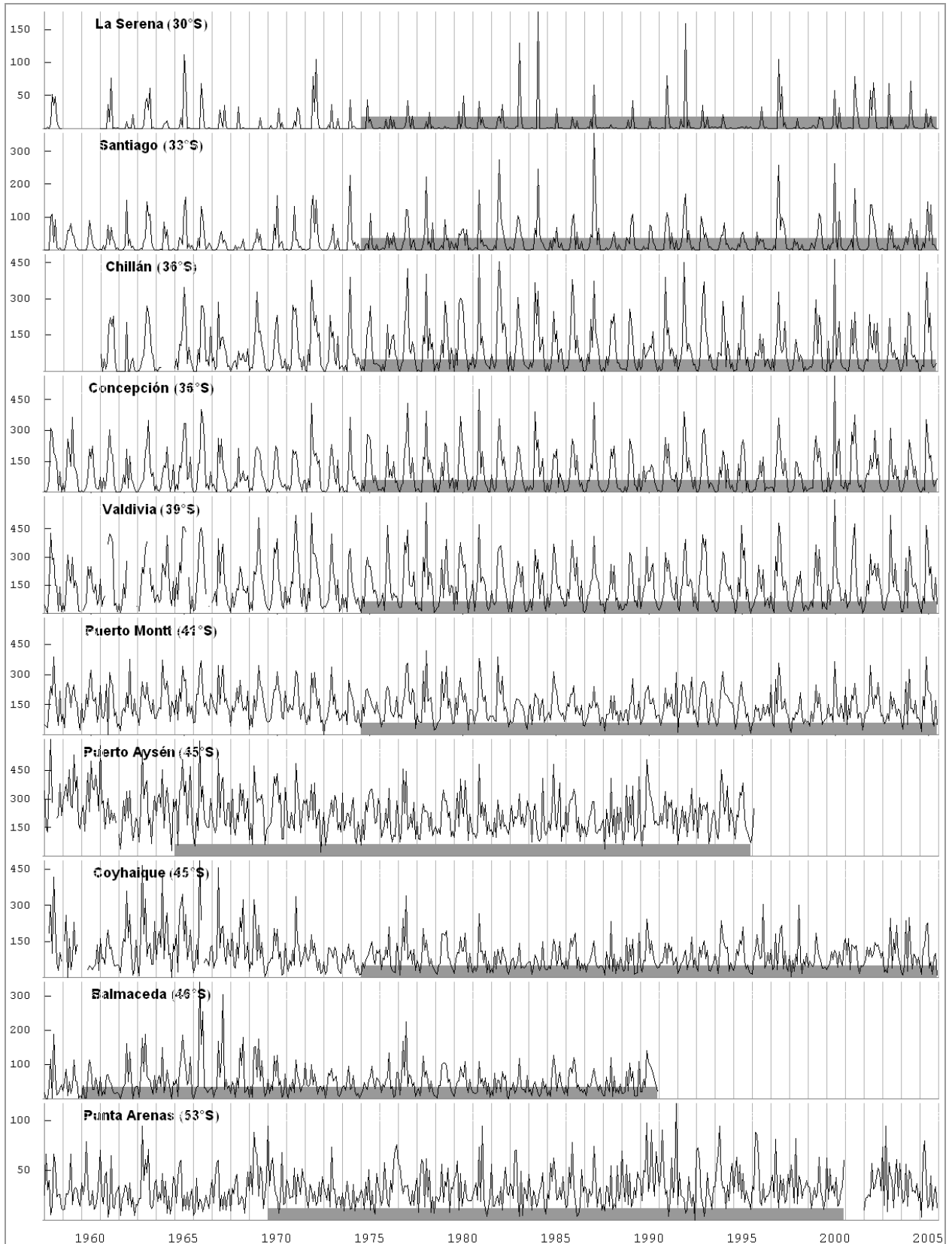


Fig. 2.3 Series de precipitación mensual para las estaciones indicadas. Barras grises señalan los periodos utilizados en los análisis.

2.3 Climatología de APPs en el Hemisferio Sur

En este estudio, las APPs fueron definidas como episodios con valores superiores a 100 mgp (1 mgp \equiv 1 metro geopotencial) persistentes por 5 días o más en las series de anomalías de Z_{500} . Con estos parámetros se consideran típicamente eventos de anomalías positivas en Z_{500} asociados a una actividad atmosférica de baja frecuencia (periodos mayores a ~ 10 días; e.g., Fig. 2.2b). En cada punto de grilla, los episodios anuales de APPs quedan registrados en series binarias de 365 días. Combinando estas series se pueden construir mapas globales de APPs, donde las zonas afectadas por algún evento quedan definidas por los conjuntos de puntos con valor unitario. La Fig. 2.4 ilustra un ejemplo de esta representación en el Hemisferio Sur para el 11 de julio de 1987. En esta fecha, el análisis de Z_{500} muestra diversas perturbaciones sobre las que se pueden apreciar algunas zonas afectadas por APPs. Una de estas zonas, sobre el Océano Pacífico austral, aparece particularmente extensa y es espacialmente coincidente con la perturbación en el campo de Z_{500} . Esta configuración representa una típica condición de bloqueo en el Pacífico sur y coincide con un gran episodio de precipitación en la región central de Chile que se extendió por más de una semana.

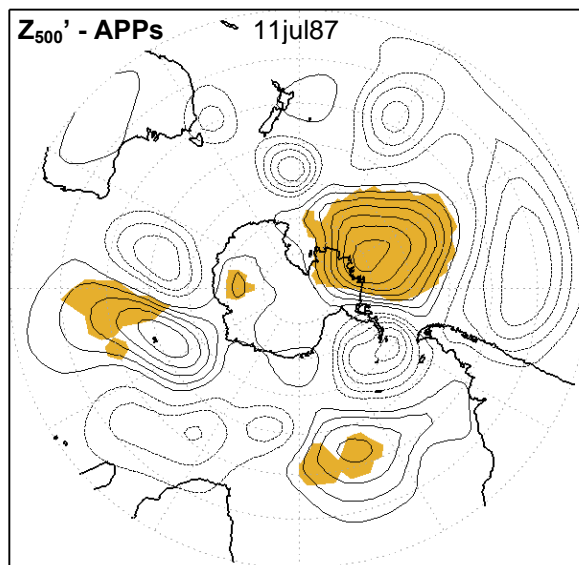


Fig. 2.4 Mapa de anomalías de Z_{500} para el Hemisferio Sur el 11 de julio de 1987. Contornos cada 50 mgp. Valores negativos en líneas segmentadas. Se omite el contorno cero. Zonas coloreadas indican regiones afectadas por APPs.

La frecuencia de APPs se puede representar por el número de eventos ocurridos en un tiempo dado o por el número de días asociados a esos eventos durante el mismo periodo; este

último caso permite distribuir con mayor resolución temporal la ocurrencia del fenómeno, obteniéndose directamente valores estacionales, mensuales o en periodos menores. Las distribuciones espaciales de las frecuencias anuales medias asociadas a los 48 años en estudio se pueden apreciar en la Fig. 2.5. Si bien ambas distribuciones de frecuencia dependen de las persistencias medias, éstas coinciden espacialmente en primera aproximación. En general, se ha optado por la segunda definición para referirse a la frecuencia de APPs; es decir, ésta será descrita en días por unidad de tiempo.

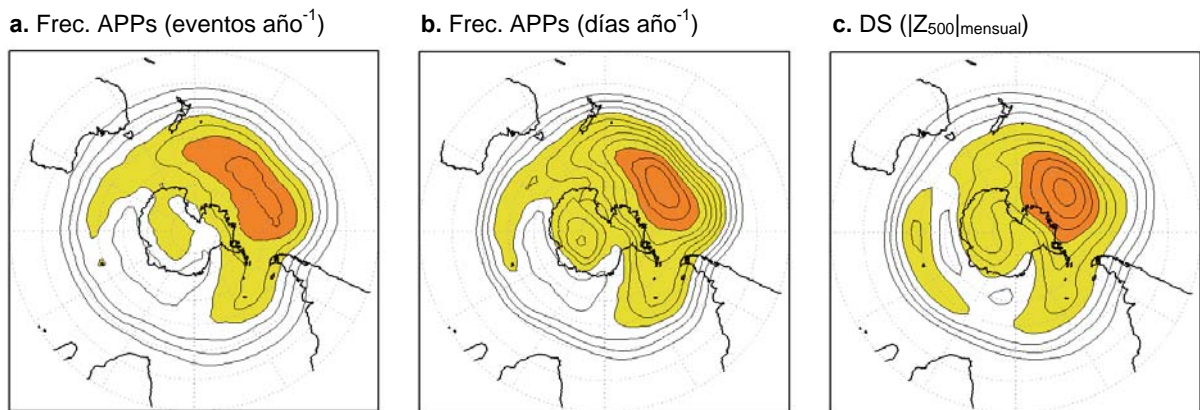


Fig. 2.5

a. Frecuencia media de eventos de APPs. Isolíneas cada 1 evento año^{-1} . En colores se destacan los contornos de 4 y 6 casos año^{-1} .*

b. Días totales por año asociados a las APPs. Isolíneas cada 5 días año^{-1} . En colores, contornos de 25 y 50 días año^{-1} .*

c. Desviación estándar media (promedio de 48 años) de anomalías mensuales de Z_{500} . Resultado expresado en días ($SD_{\text{men}} \times 365/12$). Isolíneas cada 5 días. Colores señalan contornos de 45 y 60 días.

(* mapas suavizados)

Tal como se aprecia en R05, el Océano Pacífico austral aparece como el sector preferente para la ocurrencia de APPs en el Hemisferio Sur. En torno a 60°S y 130°W se observan, en promedio, más de 7 episodios anuales que representan más de 60 días por año. A partir de esta zona de máxima actividad, la frecuencia decae suavemente en forma zonal, extendiéndose hasta los océanos Atlántico e Índico el contorno representativo de una frecuencia de 4 eventos anuales. Otro máximo local, evidente en la representación de días-APPs (Fig. 2.5b), se aprecia sobre el continente Antártico, el que contrasta con la zona de mínima densidad de APPs observada hacia latitudes inmediatamente menores, sobre el extremo austral de los Océanos Índico y Atlántico oriental. Esta zona de alta actividad en latitudes altas aparece sólo insinuada en la distribución asociada a eventos-APPs (Fig. 2.5a), advirtiendo la presencia de episodios más persistentes en latitudes altas. Las APPs observadas

en el extremo austral no son representativas de los bloqueos tradicionales pues están alejadas de la zona dominada por los Oestes y del paso de sistemas transitorios; pero, tal como se describe en la siguiente sección, estos representan rasgos de gran importancia como modos de circulación del Hemisferio.

Destaca, por otro lado, la similitud que tienen la distribución de frecuencias de APPs con la variabilidad atmosférica asociada a escalas de tiempo un poco mayores. Esto se aprecia en la Fig. 2.5c, que muestra la distribución espacial de la desviación estándar (DS) asociada a las medias mensuales de Z_{500} . Esta variable se calculó año a año y fue luego promediada en todo el periodo (1958-2005), por lo que no considera la variabilidad a escalas interanuales en tanto que debe ser representativa el segmento de frecuencias menores dentro de la banda intraestacional (periodos de hasta 3 ó 4 meses). Para tener una comparación cuantitativa con la frecuencia de APPs, el resultado de este cálculo se expresa en días, por lo que se escala con un valor medio de días por mes (i.e., $\times 365/12$). La similitud en las distribuciones de estas dos variables, evidente también en el caso del Hemisferio Norte (ver Anexo, Fig. B1), está de acuerdo a lo descrito en trabajos anteriores respecto a la buena representación de las anomalías persistentes en el régimen intraestacional de la variabilidad atmosférica (e.g., Trenberth 1982).

A partir de los episodios registrados de APPs, se pueden también definir persistencias e intensidades del fenómeno. La intensidad asignada a cada evento se calculó como el promedio simple de las anomalías de Z_{500} durante el tiempo de persistencia asociado. La Fig. 2.6 muestra los campos medios de estas dos variables en el Hemisferio Sur. En ambos casos se aprecia cierta coherencia entre sus estructuras espaciales y la que se observa en la distribución de frecuencias. Los casos más intensos coinciden, por ejemplo, sobre el Océano Pacífico austral, con anomalías superiores a 200 mgp en promedio. La distribución espacial de este campo muestra una mayor simetría zonal, con un claro anillo de máximos en torno a 60°S (Fig. 2.6a). Por su parte, la persistencia media de APPs sobre el Pacífico sur presenta una zona de altos valores más localizada en torno a 120°W, donde no se aprecia una proyección zonal como la observada en las otras variables descritas. En este sector, las APPs tienen una duración media cercana a los 8 días. Coherente con lo que se observa en las distribuciones medias de frecuencias de APPs basadas en sus dos definiciones (Fig. 2.5 a y b), la Fig. 2.6b revela también otro foco de alta persistencia sobre la Antártica. Este máximo local es el de mayor magnitud en el Hemisferio, con valores medios que superan los 9 días.

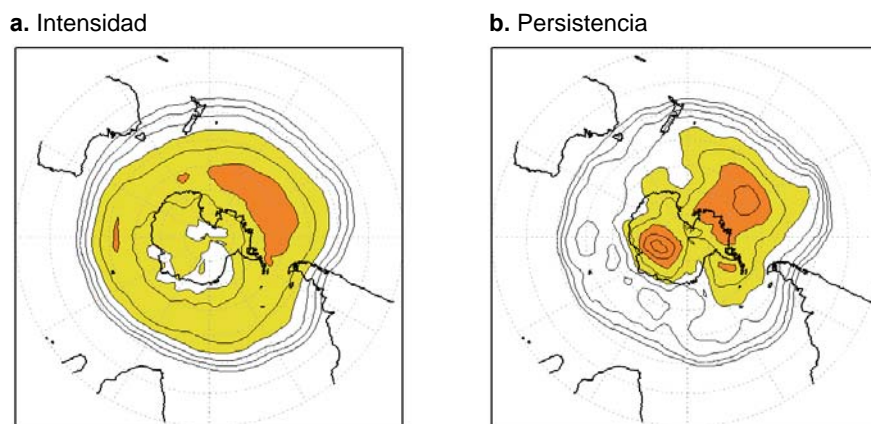


Fig. 2.6 Intensidad (a) y persistencia (b) media de APPs en el Hemisferio Sur. Isolíneas cada 20 mgp y 0.5 días respectivamente. Colores señalan contornos de 160 y 200 mgp (a), y de 7 y 8 días (b).

La frecuencia media de APPs observada mensualmente revela un evidente ciclo anual tanto en el Hemisferio Sur como en el Hemisferio Norte (Fig. 2.7). La simetría entre los regímenes de ambos casos –con una actividad que se maximiza en los inviernos respectivos– sugiere la componente global en los mecanismos que fuerzan las APPs. El ciclo es dominante sobre gran parte de los hemisferios y presenta gran amplitud en algunos sectores como el Pacífico sur oriental, donde la actividad media invernal dobla la de verano.

El régimen anual de APPs se aprecia claramente en los mapas de frecuencia estacional (HS en la Fig. 2.8; ver Anexo B para el HN). Los 50 o más días de APPs por año observados en promedio sobre el Pacífico austral (ver Fig. 2.5b) se distribuyen entre 10 días en verano (dic-feb), 15 días en otoño (mar-may) y primavera (sep-nov), y 18 días en invierno (jun-ago) aproximadamente. También se observa una oscilación de la zona de máxima actividad, que de verano a invierno se proyecta desde el Pacífico central hacia el Atlántico austral occidental. Este rasgo produce ciclos particularmente intensos como el observado sobre la península Antártica y el mar de Bellinghausen, con aproximadamente 5 y 15 días de actividad media en verano e invierno respectivamente.

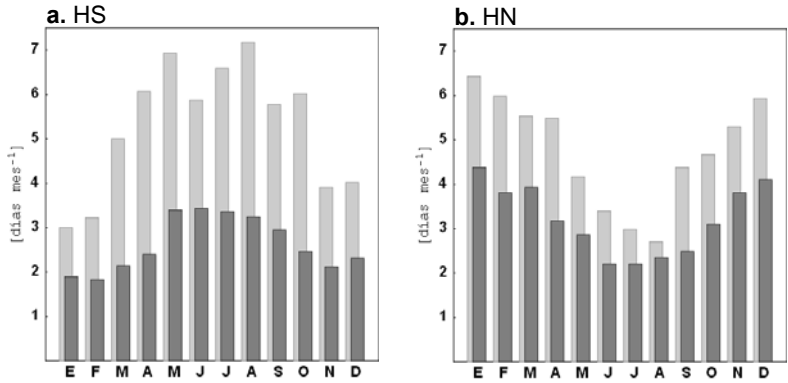


Fig. 2.7 Ciclos anuales
a. Frecuencias mensuales medias de APPs entre 40S y 80S (valor medio, gris), y para punto situado en 60N y 120W (gris claro).
b. Igual que en a, pero para el promedio entre 40N y 80N (gris) y para el punto en 60N y 25W (gris claro).

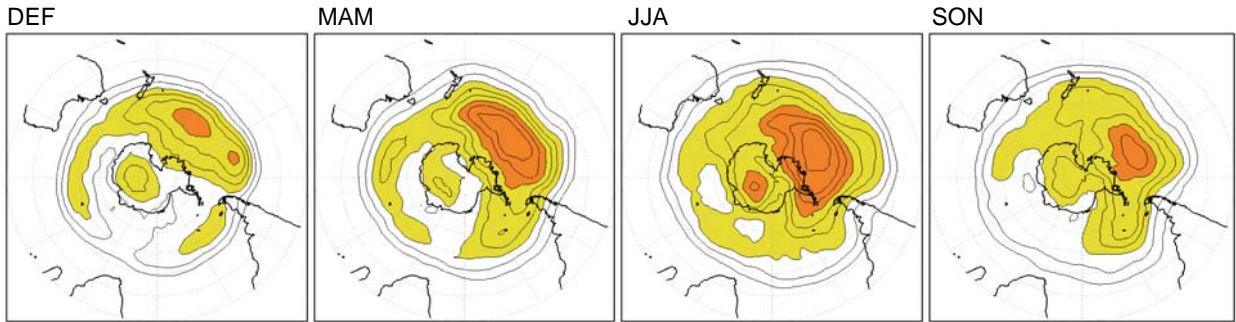


Fig. 2.8 Frecuencia estacional media de APPs en el Hemisferio Sur. Paneles corresponden a los periodos de verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON) austral. Isolíneas cada 2 días estación⁻¹. Colores ilustran contornos de 6 y 12 días estación⁻¹.

2.4 Modos principales: grupos de APPs

Como se aprecia en los mapas promedios de frecuencia de APPs descritos en la sección anterior, existen claramente sectores preferenciales para la manifestación del fenómeno, como el Océano Pacífico austral. La distribución observada en la Fig. 2.5b, cuyo máximo muestra una frecuencia media equivalente al 15% del año (50-60 días), es el resultado de la superposición de distintos episodios de APPs que son apreciables durante prácticamente todo el año. Esto se observa en los mapas diarios de APPs (e.g., Fig. 2.4) que muestran expresiones del fenómeno con estructuras espaciales completamente distintas entre ellas y sobre todos los sectores extratropicales del globo. En R05 se describen patrones de APPs en el

Hemisferio Sur y se discute sus posibles forzamientos. En este trabajo, la comparación regional del fenómeno se desarrolla mediante técnicas de *clustering* que, aplicadas sobre mapas mensuales de APPs, convergen a tres patrones de ocurrencia. Uno de estos grupos presenta una estructura bastante localizada en el Pacífico sur-oriental y muestra una significativa coherencia con ENOS durante el semestre cálido del Hemisferio Sur (noviembre-abril). Otro grupo -el más numeroso- tiene una estructura definida por un número de onda zonal 3, con máximos sobre los sectores occidentales del Pacífico y Atlántico austral y sobre el Océano Índico. Este patrón también muestra una relación con el ciclo ENOS durante los meses cálidos del año, más débil que la del grupo anterior y coherente con su fase negativa (La Niña). El tercer grupo muestra una zona de mayor frecuencia de APPs poco definida sobre el Pacífico sur, pero tiene asociado un ciclo anual bastante marcado e inverso a la actividad hemisférica media de APPs, con escasa actividad en el invierno austral. El autor señala que el número final de patrones estudiados esconde diferentes estructuras que divergen principalmente de los últimos dos grupos recién descritos, mientras que el primero representa un rasgo más sólido y se observa en múltiples experimentos (se comenta su presencia en análisis con 2 a 5 grupos finales). De hecho, la morfología de este grupo se reconoce en diversos estudios de modos oscilatorios y teleconexiones en el Hemisferio Sur (e.g., Renwick 1998, Carleton 2003) y es representativo también del patrón de bloqueos estudiado en Montecinos y Aceituno (2003, MA03).

Los patrones de APPs descritos en R05 son una buena descripción de las zonas preferentes para la manifestación del fenómeno, pero como ahí se señala, no representan las estructuras observadas día a día, puesto que en su análisis se utilizan mapas mensuales. En esta sección se describen los resultados de un análisis similar, en el que se caracterizan los patrones espaciales de APPs a partir de mapas diarios. En particular, se comparan seis patrones del fenómeno encontrados para el Hemisferio Sur.

El método utilizado consiste básicamente en el agrupamiento de mapas diarios de APPs, el cual fue desarrollado en dos etapas. En la primera, los datos originales –mapas polares de APPs– se reducen anualmente dando como resultado un conjunto de mapas de compuestos (promedios) representativos de los patrones observados cada año. Los patrones encontrados resultan de una comparación mapa a mapa (i.e., 365 elementos) que se basa en un índice de similitud definido entre un par de casos. La segunda etapa consiste en un análisis de agrupamiento tradicional (*clustering*) aplicado sobre los compuestos encontrados en la primera fase. Con esto se obtienen finalmente los seis grupos de APPs del Hemisferio Sur que se

aprecian en la Fig. 2.9. El detalle del método utilizado se describe en el anexo A. En el anexo B se incluyen los resultados obtenidos con el mismo método, pero para el Hemisferio Norte.

La Fig. 2.9 ilustra los resultados del análisis de agrupamiento de APPs en el Hemisferio Sur. Los grupos, numerados de menor a mayor según la representación de cada uno respecto del total de días analizados, se exponen a través de los compuestos normalizados de mapas polares de APPs y de anomalías de Z_{500} (Z_{500}') construidas a partir de los días asociados a cada conjunto (paneles de la izquierda y del centro de la Fig. 2.9 respectivamente). En la figura se incluye también el ciclo anual de cada grupo, representado por la actividad mensual media de APPs (paneles de la derecha).

Grupos de APPs en el Hemisferio Sur

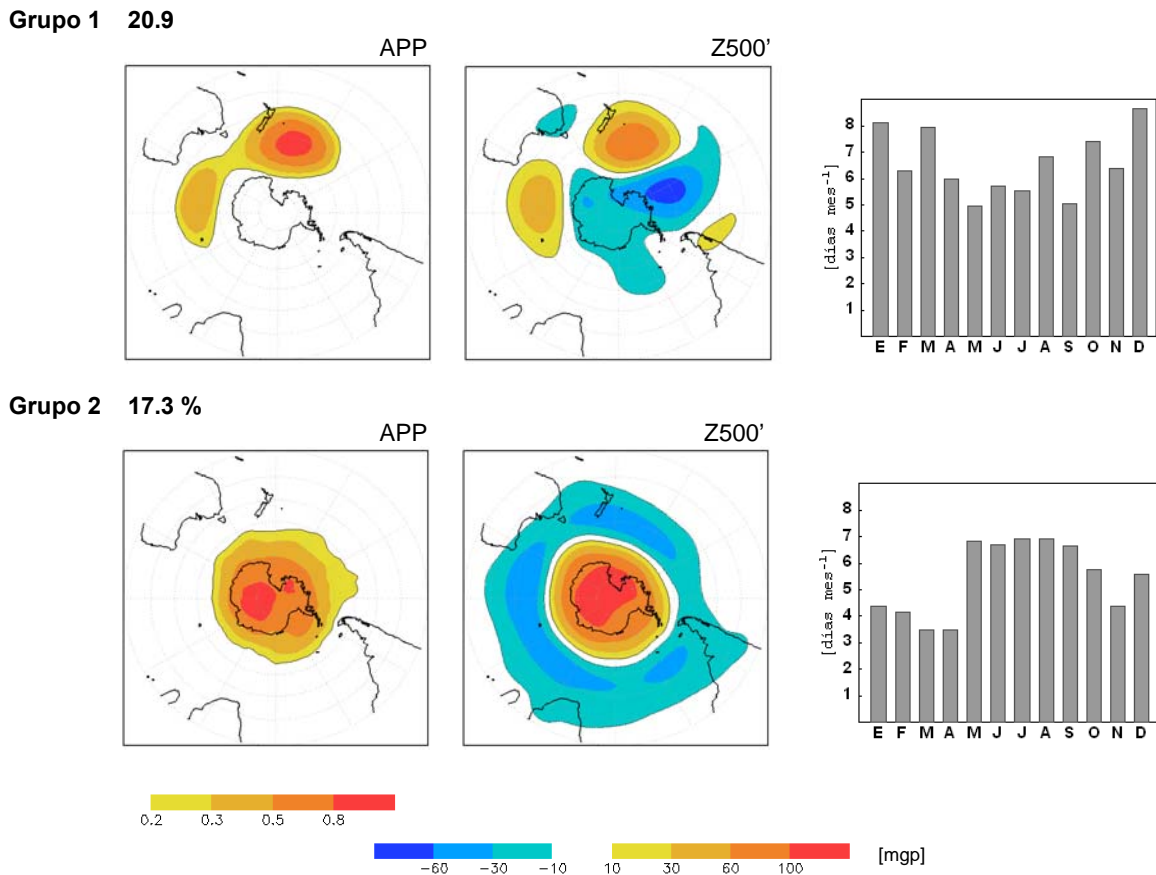


Fig. 2.9 Ver detalle en la página siguiente.

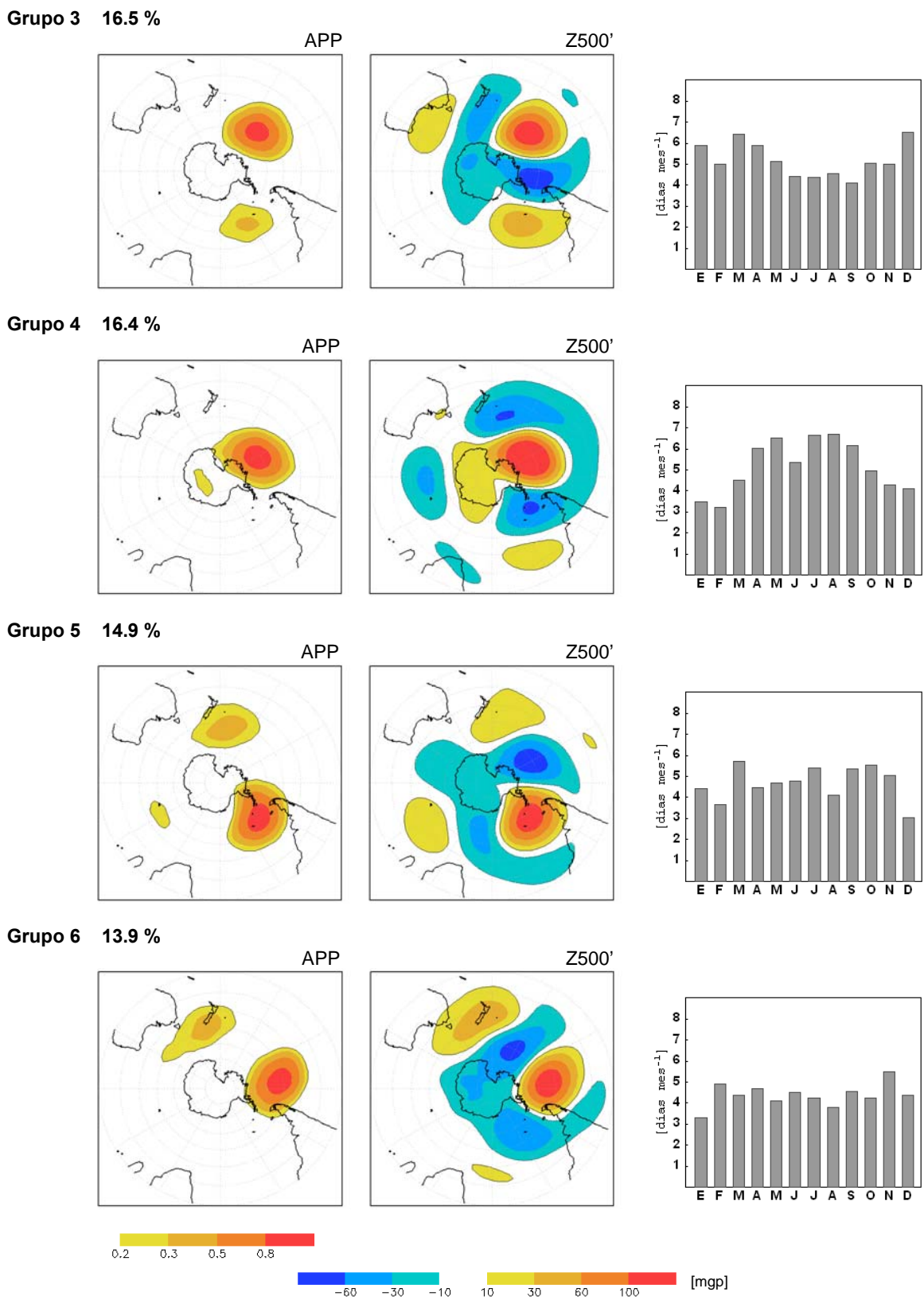


Fig. 2.9 Grupos de APPs en el Hemisferio Sur. Compuestos normalizados de mapas diarios de APPs (paneles de la izquierda) y de anomalías de Z₅₀₀ (paneles centrales) asociados a cada conjunto. Se indica fracción de cada grupo respecto al número total de días. Paneles a la derecha representan los ciclos anuales construidos a partir del número medio mensual de días asociado a cada grupo.

Con una estructura claramente diferente, el grupo 2 resalta frente a los otros cinco patrones, pues congrega las APPs más australes, en torno al Polo Sur. Su compuesto asociado de Z_{500} ' revela una estructura con una evidente simetría zonal, donde los correspondientes valores positivos sobre la región polar están acompañados de un anillo con anomalías negativas en latitudes menores. Esta configuración se asocia, lógicamente, al modo anular del Hemisferio Sur (SAM), uno de los rasgos más importantes en la variabilidad de baja frecuencia del Hemisferio (Thompson y Wallace 2000). La estructura espacial del grupo muestra, de hecho, una evidente similitud con las anomalías de Z_{500} asociadas a la fase negativa de la Oscilación Antártica (AAO; Fig. 2.10a). El índice de la AAO, variable bastante usada para caracterizar el SAM, representa la variación temporal del modo más importante observado en los campos de anomalías mensuales de altura geopotencial en 700 hPa del Hemisferio Sur (ver detalles en la sección 2.2).

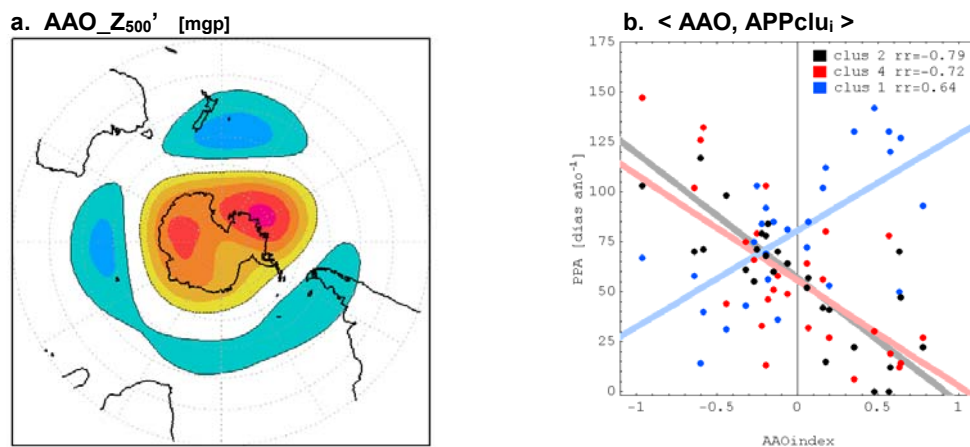


Fig. 2.10

a. Compuesto de medias mensuales de Z_{500} ' asociado al índice de la Oscilación Antártica (AAO) durante el periodo 1979-2005. Diferencia entre de la fase negativa y positiva.
b. Diagramas de dispersión entre los valores anuales del índice de la AAO y de la frecuencia de APPs asociada a los grupos 1, 2 y 4 (azul, negro y rojo respectivamente). Líneas gruesas representan las regresiones lineales. Coeficientes de correlación en la parte superior.

Además de la componente simétrica (anular) advertida en la Fig. 2.10a, la fase negativa de la AAO exhibe una proyección hacia el Océano Pacífico en las anomalías positivas del geopotencial observada en altas latitudes. Esta proyección quiebra la simetría zonal del modo y se manifiesta en un claro máximo sobre el extremo austral del Pacífico. La actividad asociada a éste máximo no aparece representada en el compuesto del grupo 2 de APPs, pero parece tener una importante contribución del grupo 4, el que precisamente centra su actividad en esa zona y

que, al igual que el grupo 2, muestra una correlación significativa en sus frecuencias anuales con la fase negativa de la AAO (Fig. 2.10b). Ambos grupos revelan también una mayor actividad durante el invierno austral, mostrando –dentro del conjunto de *clusters*– los únicos ciclos anuales evidentes. Por su parte, el primer grupo muestra una relativa coherencia con la fase positiva de la AAO, la que logra explicar hasta un 40% de su varianza interanual (correlación interanual de 0.64). El régimen anual de este grupo sugiere un débil ciclo de máximo estival.

Aparte de lo que se observa en el compuesto del segundo grupo de APPs, que reúne las perturbaciones en torno al Polo Sur, los patrones de la Fig. 2.9 muestran una actividad que se desarrolla fundamentalmente sobre las latitudes medias-altas del Océano Pacífico. En particular, el grupo 4 es similar en su distribución espacial y en su ciclo anual con el patrón descrito en R05, para APPs desarrolladas sobre el Pacífico sur-oriental (tercer *cluster* en ese análisis).

Si bien todos los compuestos de Z_{500} muestran un máximo bien definido, que coincide lógicamente con los máximos en los correspondientes compuestos de APPs, ellos sugieren estructuras más complejas, con números de onda zonal 3 ó 4. Los centros acción de estos grupos coinciden también con los observados en otros de los patrones de circulación extratropical importantes del Hemisferio sur, conocidos como modos PSA (*Pacific - South American Modes*; Ghil y Mo 1991, Mo y Higgins 1998). Estos modos han sido descritos en variados trabajos sobre variabilidad de baja frecuencia en el Hemisferio Sur y se suelen asociar a ondas de Rossby que se propagan desde el Pacífico ecuatorial occidental hacia la sector Sudamericano. Continúan siendo un tema de gran interés puesto que, aparte de modular considerablemente el clima de vastas regiones (particularmente en el Cono Sur), no se dispone de una tesis acabada del fenómeno. Si bien existe clara evidencia que estos modos no son artificiales –producto de los modelos de asimilación de datos utilizados– y que representan los principales actores de la variabilidad de baja frecuencia del Hemisferio, se discute y existen distintas visiones respecto a las forzantes del fenómeno, a su carácter oscilatorio (periódico) o episódico, y a su naturaleza propagativa o más bien estacionaria (e.g., Mo y Higgins 1998, Robertson y Mechoso 2003). Dependiendo de los campos, la escala de tiempo (intraestacional a interanual) y la región considerada, estos modos se manifiestan en la troposfera media y alta generalmente como unas de las funciones principales en un análisis armónico multivariado (funciones ortogonales empíricas, *EOF*) sobre campos de geopotencial o otras variables de evolución similar (viento, función corriente, etc). A escalas intraestacionales, ambos modos figuran con simetrías asociadas a un número de onda zonal 4 y muestran cierta propagación hacia el este. A escalas mayores, estos son más estacionarios y aparecen representados por

un número de onda zonal 3 (Kiladis y Mo 1998). Bajo el análisis de Mo y Nogués-Paegle (2001, ver Fig. 1), los grupos 1, 4 y 5 parecen representar distintas fases del modo *PSA1*, mientras que los grupos 3 y 6 insinúan algo similar con el modo *PSA2*.

Respecto a las forzantes de los modos de circulación tipo PSA, existe bastante consenso en que estas configuraciones están, por lo menos en parte, excitadas por divergencias en la tropósfera alta del Pacífico ecuatorial. Estas anomalías son la respuesta a flujos verticales en grandes columnas de convección que constituyen ramas ascendentes en celdas ecuatoriales de circulación. Según el sector, estas celdas representan las distintas fases propias de oscilaciones tropicales intraestacionales (IO), en particular de la oscilación de Madden-Julian (MJO). En Mo y Nogués-Paegle (2001), ambos modos muestran una clara coherencia con señales ecuatoriales propagándose hacia el este, que son apreciables desde más de 20 días antes de la plena manifestación del modo. Haciendo un análisis similar, también se observan señales tropicales desfasadas respecto de los días de manifestación de las APPs sobre el Pacífico sur-oriental. Estas señales, que representan anomalías de nubosidad en la tropósfera alta, se identifican en los compuestos de anomalías de radiación de onda larga (ROL') asociados a las APPs de los grupos 4, 5 y 6 (Fig. 2.11). El compuesto construido con un retardo de 10 a 15 días muestra, para las APPs sobre el extremo oriental del Pacífico austral (grupo 6), una actividad convectiva anómalamente desarrollada e inhibida sobre el Pacífico ecuatorial central y occidental respectivamente. Las APPs que ocurren más hacia el centro del Pacífico austral (grupo 4), muestran un patrón de convección similar al del grupo 6, pero con el dipolo de anomalías de OLR más intenso y comprimido hacia el extremo occidental del Pacífico ecuatorial. El grupo 5 de APPs tiene asociado un compuesto retardado similar al del grupo 4, pero con anomalías tropicales inversas. Esto resulta coherente si estos dos modos representan, en parte, las fases opuestas de un mismo fenómeno (ondas de Rossby estacionarias), como lo sugieren sus patrones en Z_{500}' (ver Fig. 2.9).

En la Fig. 2.11 se muestran también los compuestos de ROL' correspondientes a los grupos-APP calculados sin un tiempo de retardo (se ilustran en colores). Aparte de las señales ecuatoriales se observa bastante actividad que afecta directamente Sudamérica. Durante la manifestación de los grupos 4 y 6 se aprecia un evidente dipolo en torno a la zona de convergencia del Atlántico Sur (SACZ). Este rasgo, representativo de anomalías de nubosidad convectiva que oscilan entre el sur-este de Brasil y Uruguay, es conocido dentro de la variabilidad intraestacional de ese sector del continente (e.g., Díaz y Aceituno 2003). Este régimen está fuertemente modulado por circulaciones de gran escala de tipo PSA, y entre sus forzantes se reconocen los ciclos tropicales que se manifiestan a escala intraestacional

(Nogués-Paegle et al. 2000). Los mismos grupos muestran, también, anomalías de ROL sobre el sur-oeste del continente, sugiriendo modulaciones en el régimen de precipitación de la zona. Esto se discute con más detalle en la siguiente sección.

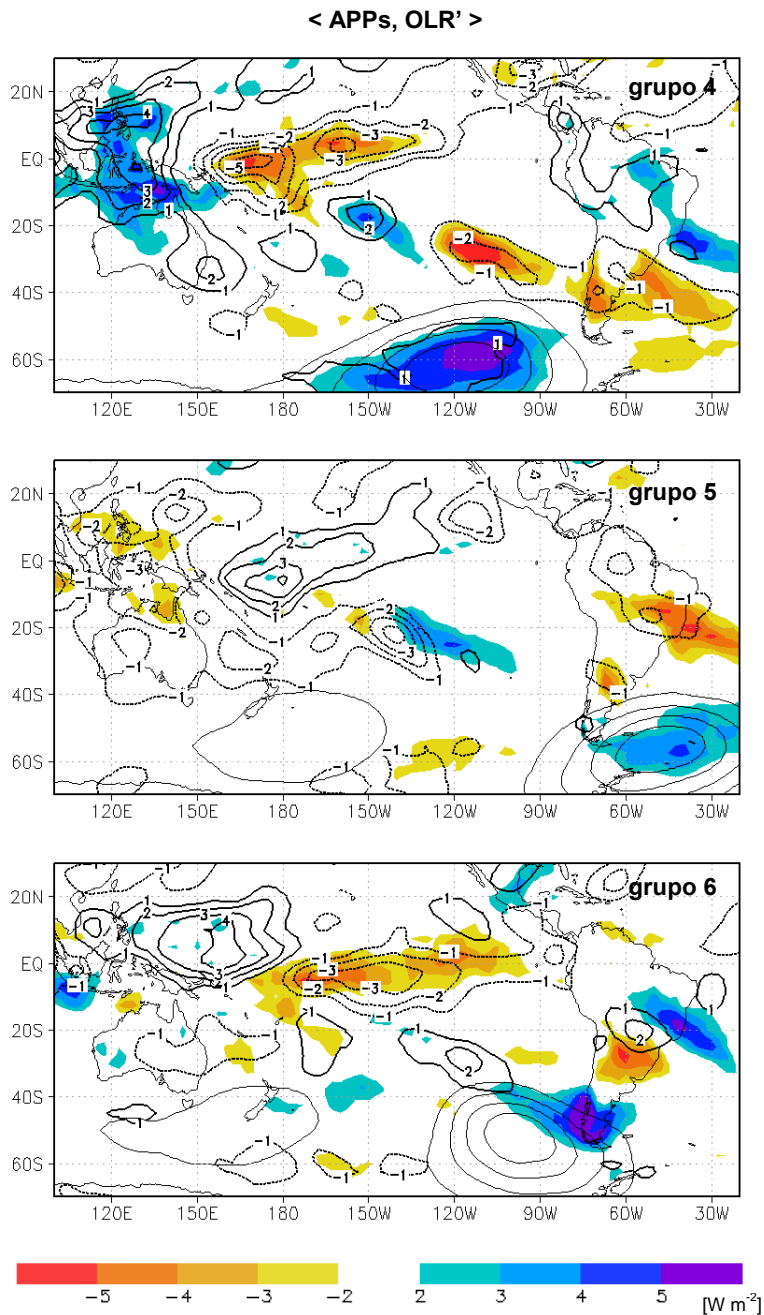


Fig. 2.11 Mapas de compuestos de anomalías de OLR respecto a la frecuencia de APPs asociada a los grupos 4, 5 y 6 (panel superior, del centro e inferior respectivamente). Contornos gruesos ilustran los promedios calculados entre 10 y 15 días antes de la manifestación de cada grupo-APP. En colores, los promedios calculados sin un tiempo de desfase. Contornos delgados ilustran las zonas de actividad asociadas a cada modo de APPs.

2.5 Variabilidad interanual

La actividad media de APPs descrita en la sección 2.3 no es del todo representativa si se observa el fenómeno durante un periodo relativamente corto (unos cuantos años). Las APPs muestran, de hecho, una fuerte variabilidad interanual que se aprecia claramente en las series de frecuencias anuales para los episodios ocurridos en una zona en particular. En el sur-este del Pacífico (60°S y 120°W), donde algunos años extremos registran más de 100 días perturbados por APPs, se observan diferencias de hasta 80 días entre un año y otro. Por otra parte, la significativa menor variabilidad del fenómeno tomado en su conjunto (promedio espacial) insinúa el carácter independiente de las APPs entre diferentes zonas del hemisferio (Fig. 2.12). Esto se aprecia más claramente al comparar las series de tiempo de las frecuencias anuales de APPs asociadas a los grupos descritos en la sección anterior (Fig. 2.13), donde no se observan relaciones entre ellos evidentes en una primera aproximación. De hecho, las mayores correlaciones entre estas series (valor absoluto) ocurren entre los grupos 1 y 2 del Hemisferio Sur ($r_{12} = -0.6$) y entre los mismos grupos del Hemisferio Norte que, como se ha visto, explican en cada caso una parte importante de la varianza de un mismo fenómeno (modos anulares, ver anexo B para descripción del HN).

La Fig. 2.14 muestra los mapas de desviación estándar de las frecuencias anuales de APPs en ambos hemisferios. En el Hemisferio Sur destaca un importante máximo sobre el Pacífico austral. Si bien esta zona puede tener una componente estadísticamente sesgada, dado que ahí también se concentra la mayor cantidad de eventos anuales, el máximo aparece particularmente definido y significativamente intenso si se compara con el resto del globo. Concuera con ello el hecho de que el grupo 4 de APPs en Hemisferio Sur, cuya zona de máxima actividad coincide con la observada en la Fig. 2.14, muestre la mayor variabilidad dentro del Hemisferio. Por otro lado, destaca que en general los grupos del Hemisferio Norte muestren una mayor variabilidad que los grupos del Hemisferio Sur (Fig. 2.13), diferencia que no se refleja en las magnitudes observadas en la Fig. 2.14.

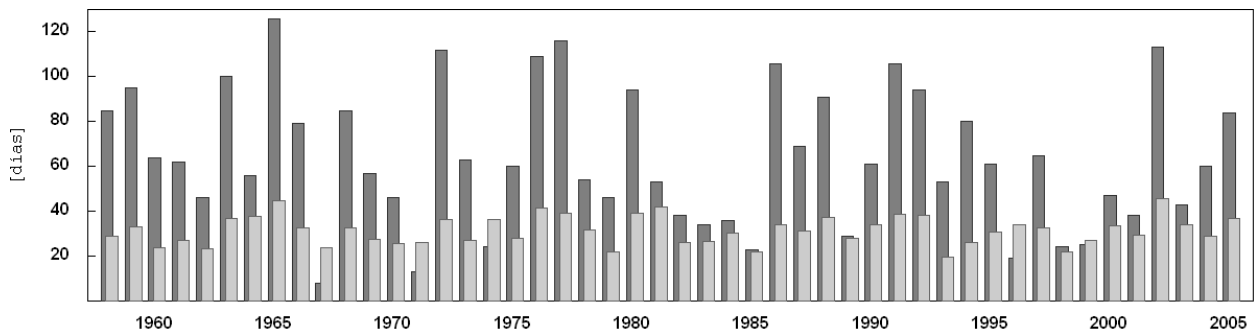


Fig. 2.12 Series de frecuencia anual de APPs (días año⁻¹) en el Hemisferio Sur. En gris claro, se indica el promedio de la banda zonal comprendida entre 40°S y 80°S. En gris oscuro, serie para el punto situado en 60°S y 120°W.

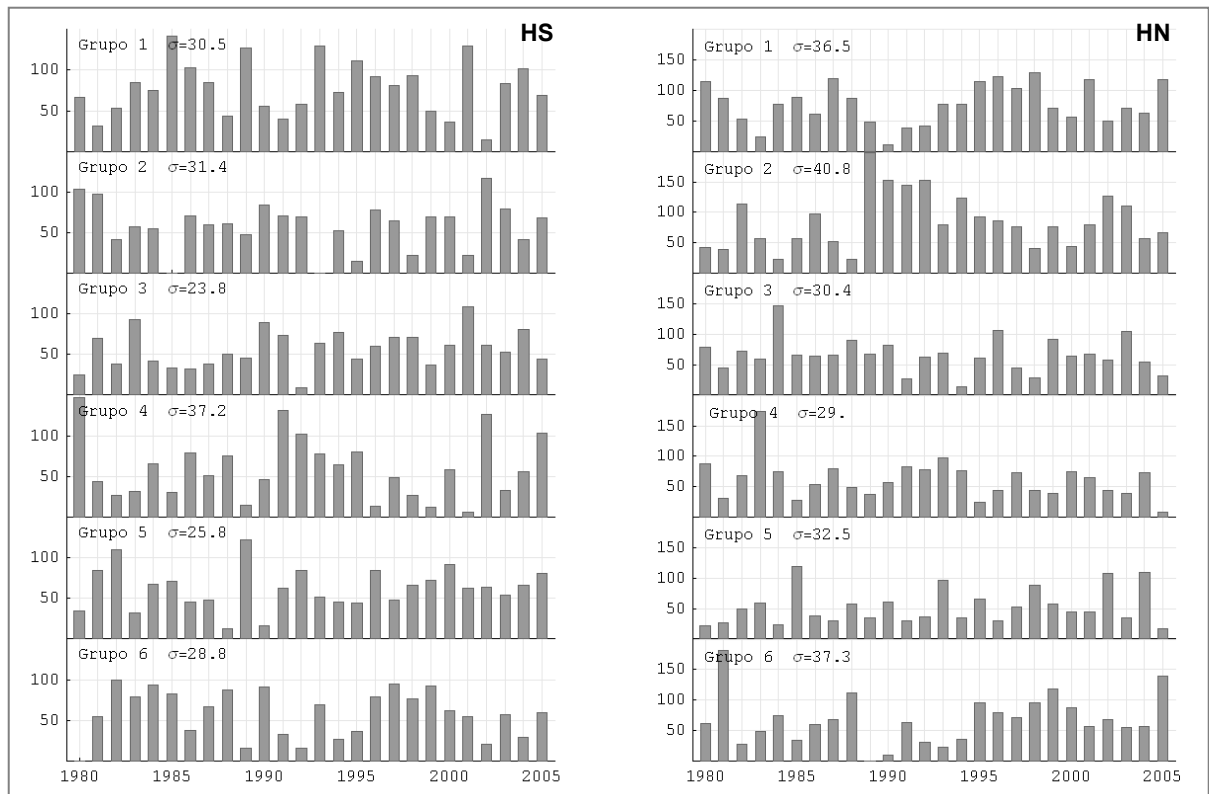


Fig. 2.13 Series de tiempo entre 1980 y 2005 de la frecuencia anual de APPs asociadas a los grupos 1 a 6 de cada hemisferio. La desviación estándar calculada respecto al periodo completo (1958-2005) se indica en la parte superior de cada panel.

La variabilidad interanual de APPs sobre el Océano Pacífico austral es coherente con los patrones de teleconexión asociados a ENOS, rasgo extensamente descrito en la literatura asociada, que a diferentes escalas de tiempo muestra perturbaciones de estructura barotrópica situadas en esta zona del Pacífico sur (e.g., Garreaud y Battisti 1999, Renwick 1998). La Fig. 2.15 ilustra para las cuatro estaciones del año los coeficientes de correlación entre las series temporales de anomalías en la temperatura superficial del mar en la región ecuatorial NIÑO-3.4

(SST3.4) y la frecuencia de APPs en todo el globo. La señal de ENOS, definida acá por la serie SST3.4, aparece reflejada sobre el régimen de APPs en distintos sectores de latitudes medias y altas, pero se aprecia con mayor intensidad en los extremos norte y sur de la cuenca del Pacífico. Los valores sobre latitudes menores (subtropicales) no representan un resultado significativo dada la baja frecuencia de APPs en esas zonas. El régimen de APPs sobre el Pacífico septentrional aparece modulado por ENOS sólo durante el invierno boreal, y en forma negativa (la frecuencia de APPs se inhibe durante la fase cálida de ENOS). En el Hemisferio Sur, en cambio, el fenómeno se manifiesta durante todo el año y en forma positiva. Esta relación es particularmente intensa durante la primavera austral y en el sector oriental del extremo sur del Pacífico. Esta región es parcialmente solidaria con los patrones espaciales de los grupos de APPs 4 y 6 del Hemisferio Sur y, lógicamente, sus series de frecuencias están en parte explicadas por la señal de ENOS (Tabla 2.1).

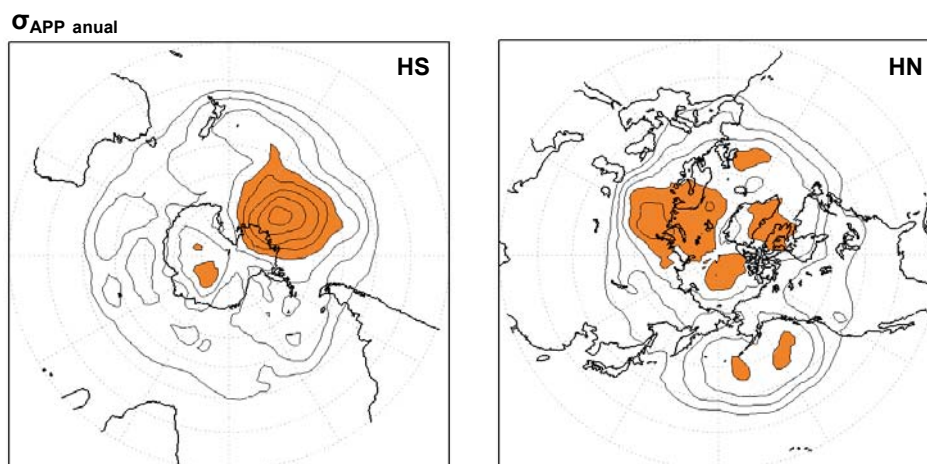


Fig. 2.14 Desviación estándar de frecuencias anuales de APPs. Isolíneas cada 3 días. Valores sobre 21 días en color.

	Grupos de APPs					
	1	2	3	4	5	6
DEF	0.00	-0.20	0.01	0.19	-0.12	-0.05
MAM	-0.11	-0.09	0.12	0.25	-0.05	0.32
JJA	-0.19	-0.11	-0.04	0.38	0.00	-0.11
SON	-0.25	0.20	-0.18	0.42	-0.29	0.22

Tabla 2.1 Coeficientes de correlación entre el índice estacional NIÑO-3.4 y las frecuencias de APPs asociadas a los grupos del Hemisferio Sur para el periodo 1960-2005. Se destacan en grueso los valores con significancia estadística superior al 95%.

< APP global, SST NIÑO-3.4 >

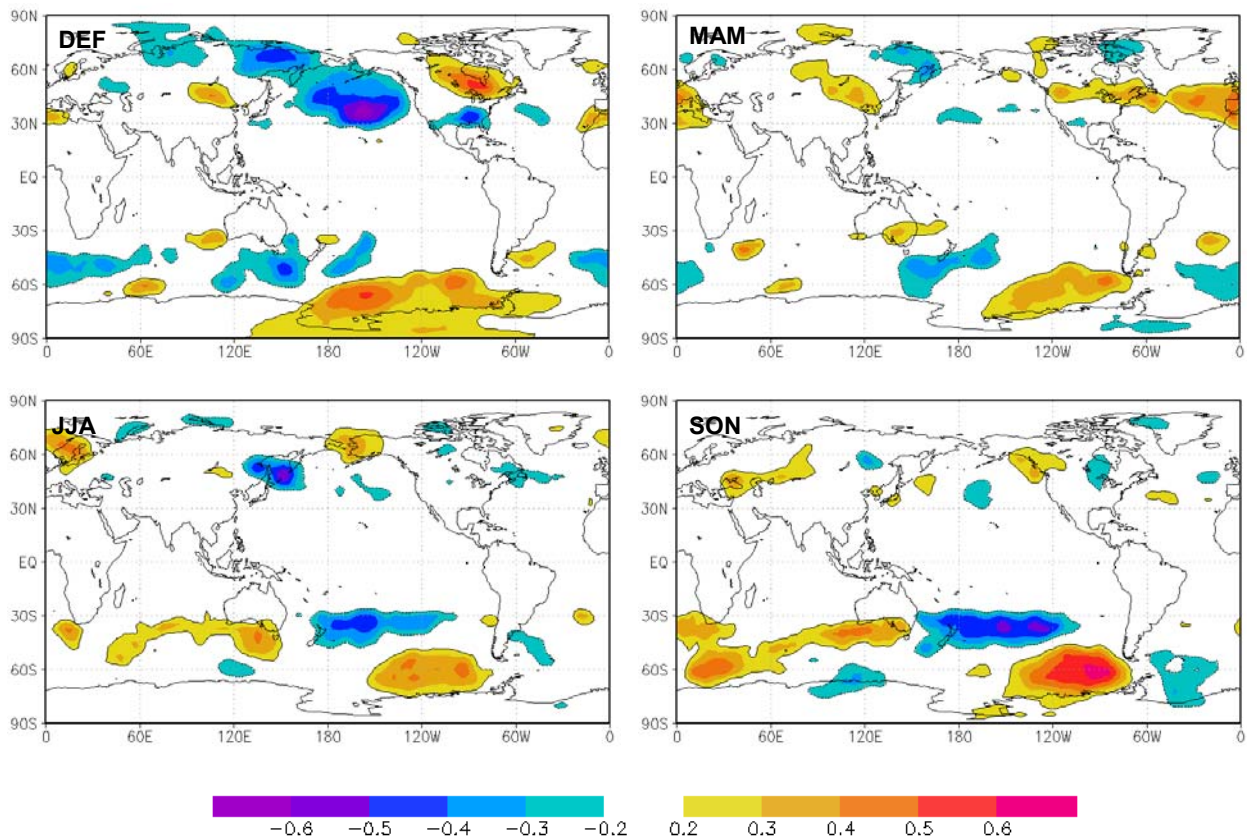


Fig. 2.15 Mapas de correlación entre frecuencias estacionales de APPs y anomalías de temperatura superficial del mar en la región ecuatorial Niño-3.4.

La serie estacional de frecuencias de APPs asociadas al grupo 4 se ilustra en forma de anomalías en la Fig. 2.16 para todo el periodo en estudio. En esta figura se expone también la curva de anomalías de SST3.4 ajustada a la escala de frecuencias de APPs. El ciclo ENOS, que explica cerca del 20% de la variabilidad interanual del grupo-APP, es coherente sólo en algunos de sus eventos cálidos (“El Niño”) o fríos (“La Niña”) con la actividad de APPs. Esta relación se destaca en los eventos cálidos de 1965-66, 1972-73, 1991-92 y de fines del 2002, mientras que no se refleja en los episodios intensos de 1982-83 y 1997-98. Durante estos dos episodios se observó, en cambio, una intensa actividad de APPs en el sector más oriental del Pacífico austral, la que aparece reflejada en las series asociadas al grupo-APP 6 (no se muestra). De hecho, la frecuencia máxima histórica de este grupo-APP ocurrió durante el otoño de 1983, con más de 50 días de anomalías persistentes durante los tres meses de la estación. Durante los eventos de “La Niña”, destaca la baja actividad del grupo-APP 4 en los periodos de 1970-71, 1973-76, 1988-89, 1996 y 1998-99. Esta relación semi-coherente entre el ciclo ENOS y el grupo 4 de APPs aparece modulada a escalas mayores de tiempo; se aprecian, de hecho,

periodos decenales de buena o mala coherencia. El primer caso (buena correlación) se observa, por ejemplo, durante gran parte de la década de los 70s y 90s, mientras que en los 80s no se distingue ningún patrón claro.

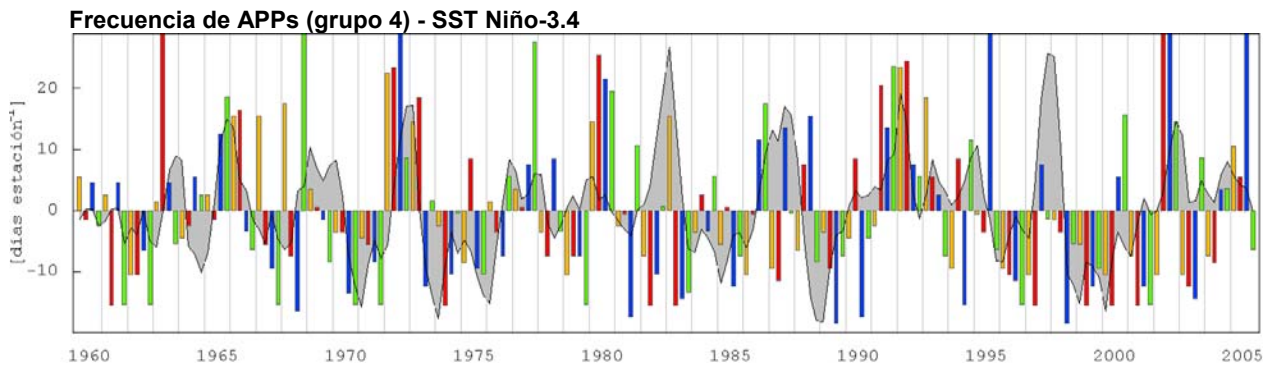


Fig. 2.16 Serie estacional de anomalías de frecuencias de APPs asociada al grupo-APP 4. Barras amarillas, rojas, azules y verdes corresponden respectivamente al verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON) austral. En gris, la curva de anomalías de temperatura superficial del mar en la zona Niño-3.4, ajustada a la escala de frecuencia de APPs.

2.6 APPs y precipitación en Chile

Como se aprecia en Sinclair et al. (1997, ver figura 7) los bloqueos sobre el Pacífico austral son coherentes con un anómalo desplazamiento hacia el ecuador del régimen de sistemas transitorios (ciclones particularmente). En Chile esta condición se suele manifestar con una mayor frecuencia de tormentas en las regiones subtropicales (Rutllant y Fuenzalida 1991). Como se ve en la sección anterior y como lo demuestran diversos análisis, las altas persistentes o bloqueos sobre el Pacífico austral son un rasgo común durante los periodos con el ciclo ENOS en fase cálida, fenómeno que mediante éste y otros mecanismos modula significativamente el régimen climático de Sudamérica a escala interanual (Aceituno 1988).

El régimen de precipitación en Chile resulta particularmente sensible al patrón de circulación de gran escala sobre Pacífico sur, puesto que en ciertas regiones el signo de la dependencia respecto a los bloqueos es ambiguo y variable respecto a la temporada del año. En MA03 se señala que la estructura de bloqueos en el Pacífico austral oriental es particularmente evidente en años tipo *El Niño* con temporadas anómalamente lluviosas en

distintas regiones de Chile central. Esto se observa durante el invierno austral en regiones del centro-norte (30S-35S) y durante primavera en el centro-sur (35S-37S). Un patrón contrario se observa durante el verano en el sur del país.

La Fig. 2.17 ilustra los episodios de APPs asociados a perturbaciones sobre el extremo austral del Pacífico oriental (grupos-APP 4 y 6 del Hemisferio Sur) sobre las series de precipitación en Santiago (33°S) y Puerto Montt (41°S) durante 1987. Se observa, en este ejemplo, un extenso episodio de precipitación invernal que afecta a ambas ciudades (especialmente intenso en su etapa final sobre Santiago) que coincide con un evento de APP tipo 4. Un mes después se aprecia una coherencia similar, pero con un episodio de APP más corto. Por su parte, algunos episodios de APPs asociados al grupo 6 muestran coincidencias, tanto con episodios de precipitación (e.g., días 282-283) como con periodos secos anómalos en Puerto Montt (e.g., en torno al día 145).

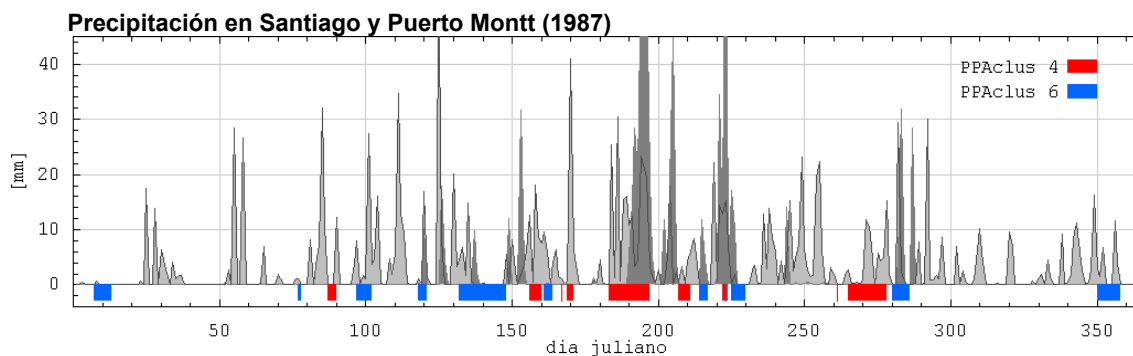


Fig. 2.17 Series de precipitación en Santiago y Puerto Montt durante 1987 (gris oscuro y claro respectivamente). Se indican periodos de APPs asociados a los grupos 4 y 6 del Hemisferio Sur (barras rojas y azules respectivamente).

Para evaluar el impacto de las APPs registradas en el Hemisferio Sur sobre el régimen de precipitación de Chile, se utilizaron datos diarios obtenidos correspondientes a diez estaciones *in situ* a lo largo del centro y sur del país. Para observar los patrones regionales se observaron mapas mensuales de precipitación (datos CMAP, Xie y Arkin 1997). Los análisis se basaron en comparaciones independientes de series estacionales de 31 años (ver sección 2.2 para más detalles). En un primer análisis se evaluaron los patrones espaciales de APPs asociados al régimen observado en todas las estaciones disponibles. Se correlacionaron interanualmente las series de precipitación para cada temporada del año con las series equivalentes de frecuencia de APPs en cada punto del Hemisferio. Esto se resume en la Fig.

2.18, que muestra los mapas de correlación asociados a cada estación de observación para las cuatro temporadas del año.

La precipitación en la zona central de Chile, representada en este estudio por las observaciones en La Serena (30°S), Santiago (33°S), Chillán (35°S) y Concepción (36°S), ocurre fundamentalmente durante el otoño, el invierno y la primavera austral (de marzo a noviembre). De hecho, el periodo de verano (dic-ene, DEF) en estas estaciones reúne en promedio menos del 3% de la precipitación anual, mientras que en invierno (jul-ago, JJA) ocurre más del 50%. Con tasas medias anuales que van desde 90 mm en La Serena hasta 1100 mm en Concepción, es irrelevante evaluar (climatológicamente) el régimen estival de la precipitación en estas estaciones.

De acuerdo con el impacto sobre la precipitación descrito en trabajos anteriores (e.g., MA03), la Fig. 2.18 muestra, para el periodo invernal de la zona central, una señal de APPs caracterizada por episodios desarrollados en torno a la península Antártica. Durante los meses de otoño y primavera los patrones observados son más intensos, con zonas que logran explicar más de un 30% de la varianza interanual asociada a las series de precipitación. En particular, durante el segundo semestre del año, esta región se ve perturbada positivamente por APPs desarrollados en el sector más oriental del Pacífico austral, sobre el mar de Bellinghausen. Durante el otoño, en cambio, las perturbaciones se sitúan más al oeste (mar de Amundsen). Destaca también en los mapas asociados a estas estaciones la simetría de los patrones de APPs durante la primavera, que insinúan una distribución en el hemisferio definida por un número de onda zonal 3. Los máximos que se observan sobre el extremo oriental del Pacífico austral, al sur de Australia y al sur del continente Africano, son coherentes con el rasgo de APPs en el Hemisferio Sur forzado por ENOS durante la primavera (ver Fig. 2.15).

Las estaciones del centro-sur del país, Valdivia (39°S) y Puerto Montt (41°S), muestran una coherencia positiva entre sus series de precipitación y las APPs, que sólo es apreciable durante los meses de otoño y primavera. Estas perturbaciones ocurren entre 150°W y 120°W del Pacífico austral, y son de menor magnitud que las anomalías asociadas a las estaciones de la zona central. Los mapas relativos a estas dos estaciones y las de más al sur, muestran correlaciones negativas sobre el extremo austral de Sudamérica. Este patrón, visible durante gran parte del año, debe manifestar un impacto directo sobre la precipitación (negativo), producto de bloqueos que ocurren sobre latitudes cercanas a las de la región observada. Esto se percibe notoriamente durante el otoño y el invierno en las estaciones de Puerto Aysén y Coyhaique (45°S).

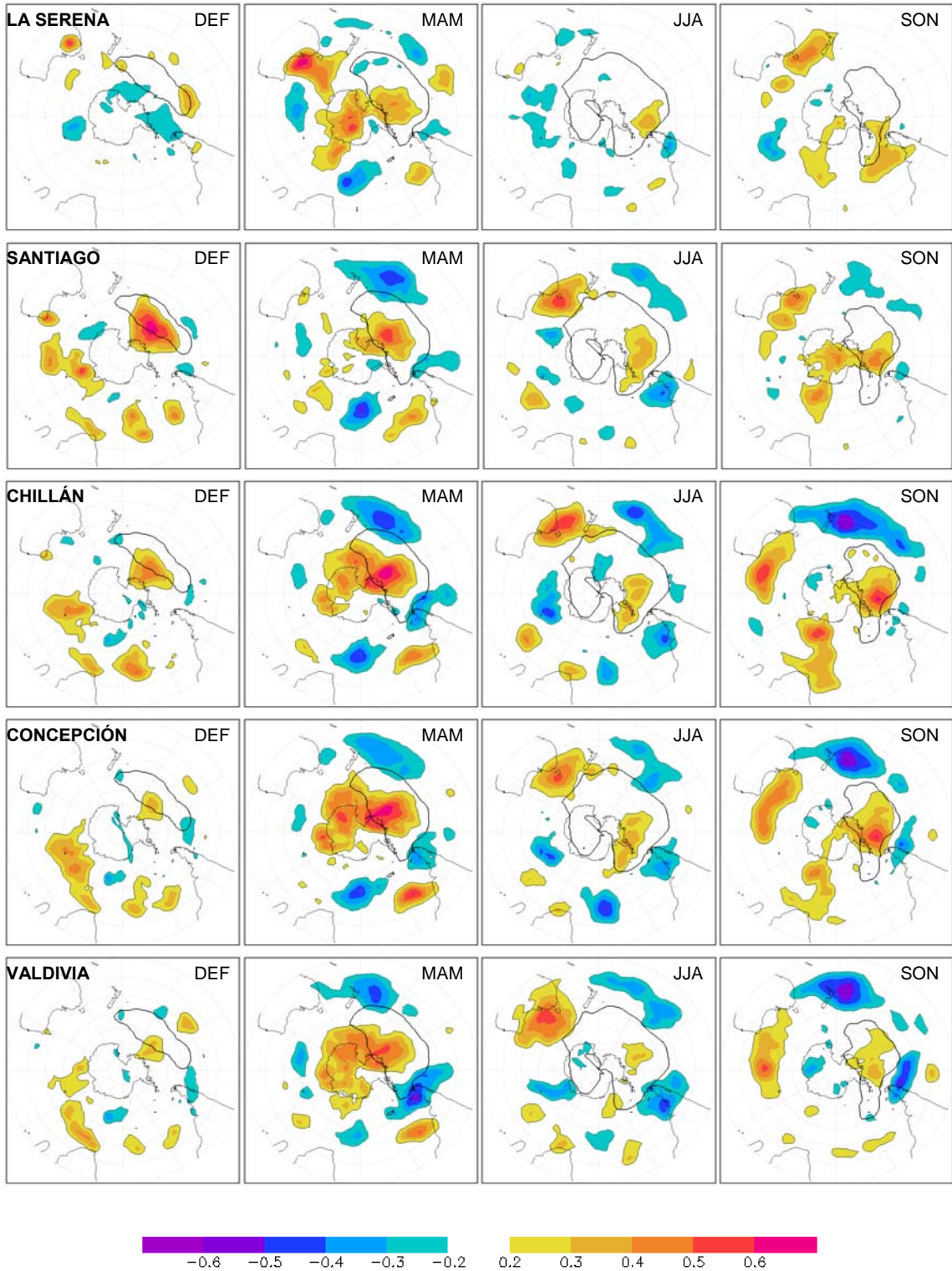


Fig. 2.18 Ver detalle en la página siguiente.

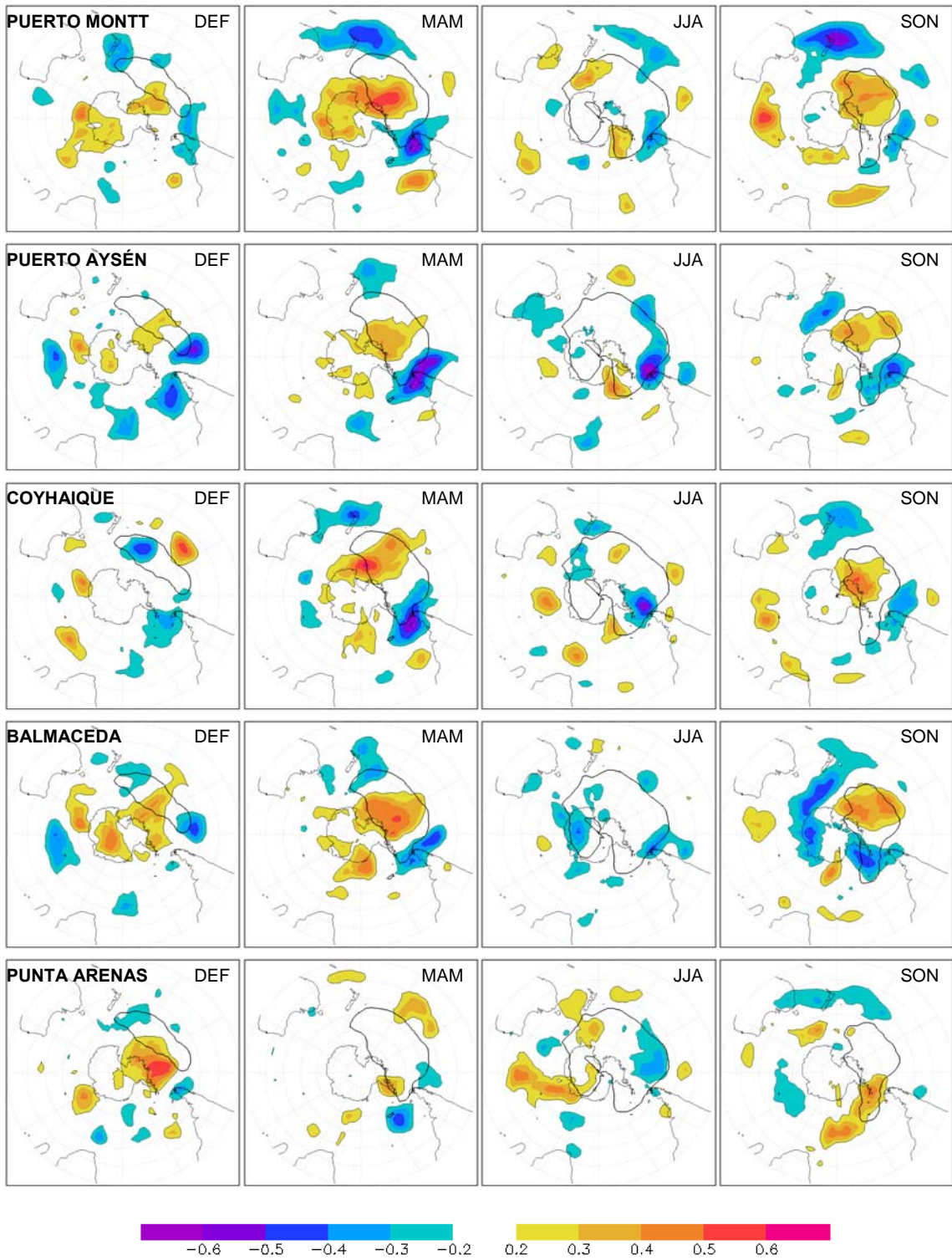


Fig. 2.18 Mapas de correlación entre frecuencias de APPs y las series de precipitación sobre las estaciones indicadas. Periodos corresponden a verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON) austral. Contorno grueso señala isolínea de 10 días estación⁻¹ de la frecuencia media de APPs en los meses respectivos.

Las señales de APPs sobre el sector oriental del Pacífico austral advertidas en la Fig. 2.18 se pueden entender como patrones (coherentes o no) estrechamente asociados con los mecanismos que determinan parte del régimen de precipitación en la estación respectiva. Sin embargo, en los mapas de la figura se leen correlaciones del mismo orden en distintos sectores extratropicales del Hemisferio (e.g., Chillán en SON). Estas perturbaciones se pueden interpretar como patrones ligados a las APPs que ocurren en el sector más cercano a Sudamérica, como lo muestran las configuraciones descritas en la sección anterior (grupos de APPs). Por otro lado, las APPs que se aprecian sobre diversas zonas del Pacífico austral no representan necesariamente patrones distintivos del fenómeno por sí sólo, por lo que las coherencias del régimen de precipitación con el fenómeno observado en un punto fijo del espacio, pueden estar asociadas a “bloqueos” de distinta naturaleza, o quizás a señales poco significativas (baja densidad de APPs en ese punto).

Un análisis similar al descrito anteriormente, pero enfocado en los modos de APPs, resulta de la comparación entre las mismas series de precipitación y la frecuencia de APPs en el Hemisferio Sur asociada a los grupos definidos en la sección 2.4. Esto se ilustra en la Fig. 2.19, que muestra las correlaciones interanuales de la frecuencia temporal de cada grupo-APP con las series de precipitación. Se indican en este caso los valores significativamente distintos de cero, determinados mediante métodos no paramétricos (pruebas estadísticas sobre muestreos aleatorios; i.e., ejercicios de *Monte-Carlo*). A partir de datos globales CMAP, se ilustran también los rasgos de precipitación de gran escala coherentes con el régimen estacional de APPs asociado a cada grupo (se escogió una estación del año con valores significativos sobre el Pacífico oriental).

Con mayor o menor magnitud todos los patrones de APPs en el Hemisferio Sur, descritos por los grupos 1 a 6, muestran un impacto significativo en la precipitación de alguna de las estaciones observadas. Coherente con los rasgos obtenidos del análisis anterior, el grupo 4 –de máxima actividad sobre el mar de Amundsen– muestra valores significativos en casi todas las estaciones observadas. Esto ocurre durante gran parte del año, pero es particularmente claro durante el otoño en la zona central y centro-sur de Chile (Fig. 2.19d). Esta condición también se aprecia en el mapa de correlación de los datos CMAP, que para el otoño muestra un impacto positivo sobre gran parte del país. Similar a lo descrito en MA03, el mismo grupo (4) muestra una señal invernal sólo en las estaciones situadas al norte de Puerto Montt. Por su parte, es consistente que los valores positivos observados en estaciones más australes (Aysén, Coyhaique y Balmaceda) de la Fig. 2.19d sean opuestos a los que se ven en el régimen del grupo 5 de APPs (Fig. 2.19e), los que, con un patrón espacial inverso al del grupo 4,

muestran una actividad que se alcanza a desarrollar sobre el extremo austral de Chile. El primer grupo de APPs también tiene asociado un patrón de circulación inverso al del grupo 4, y muestra un impacto negativo (significativo) en gran parte de las estaciones, pero solamente durante la primavera austral (Fig. 2.19a).

Los grupos de APPs 2 y 4 son los únicos que muestran influencias positivas significativas en el régimen de precipitación de Chile. El grupo 2 (modo anular) muestra un impacto en el centro y centro-sur del país (La Serena - Valdivia), apreciable durante el otoño principalmente, y es coherente con el patrón de precipitación CMAP observado durante el mismo periodo, que muestra una influencia positiva al oeste de los Andes entre 20°S y 40°S (Fig. 2.19b). Al igual que el grupo 5, las APPs asociadas al grupo 6 se manifiestan sobre o muy cerca del extremo austral de Sudamérica, por lo que tienen influencias principalmente negativas en el régimen pluviométrico de la región. Esto se observa particularmente desde Chillán al sur durante el otoño. Aunque más débiles, el mismo grupo (6) muestra durante el invierno y la primavera un patrón más dependiente de la región, con impactos positivos en la zona central y negativos hacia el sur. Aparte de estos patrones sobre Chile, estos grupos (5 y 6) revelan claras señales ecuatoriales en los mapas globales de precipitación, coherentes con las fases frías y cálidas de ENOS respectivamente. El grupo 3 de APPs, que muestra en general una menor influencia en la precipitación de Chile, tiene igualmente asociado impactos negativos y significativos en Chillán y Concepción.

< grupos-APPs, precipitación >

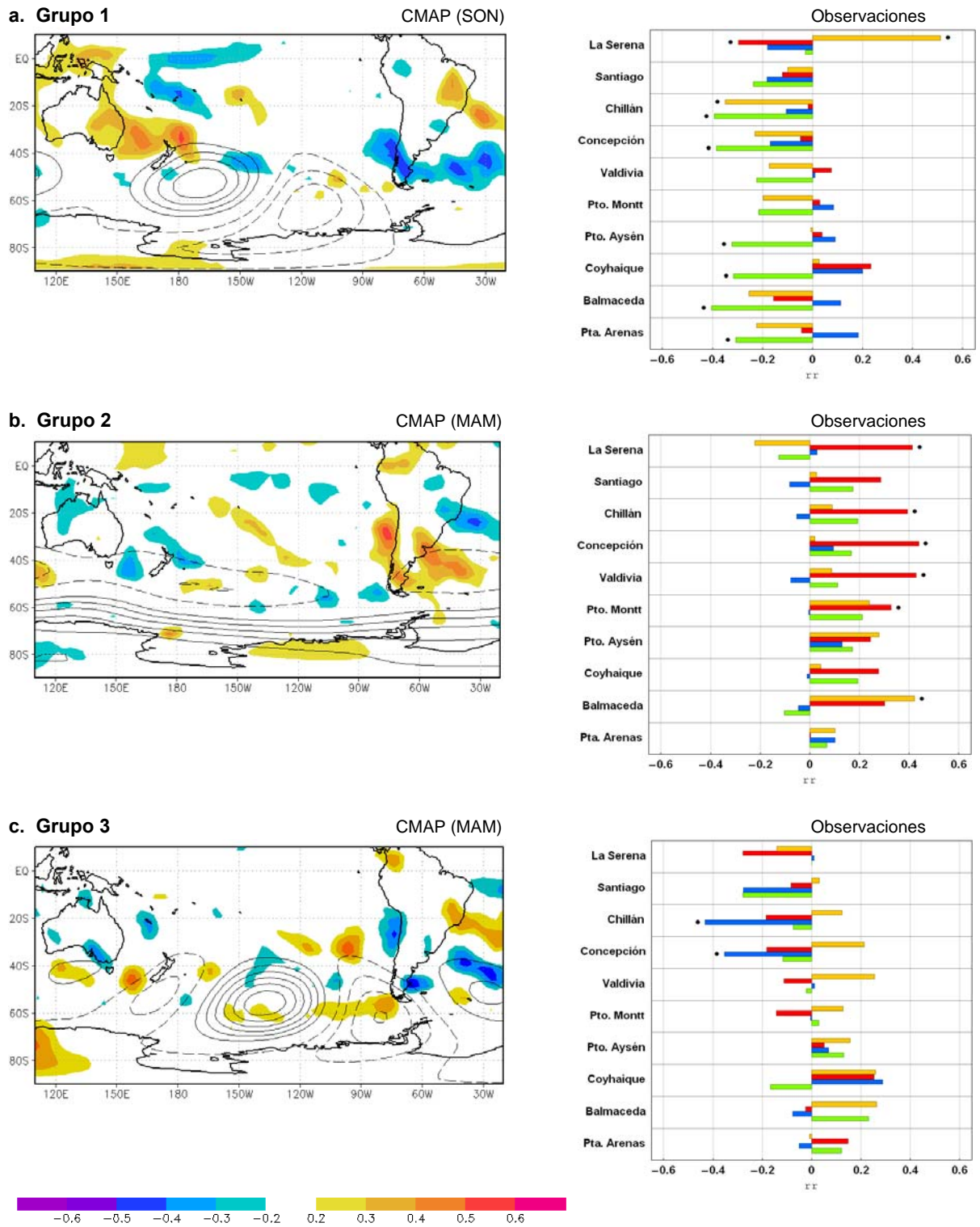


Fig. 2.19 Ver detalle en la página siguiente.

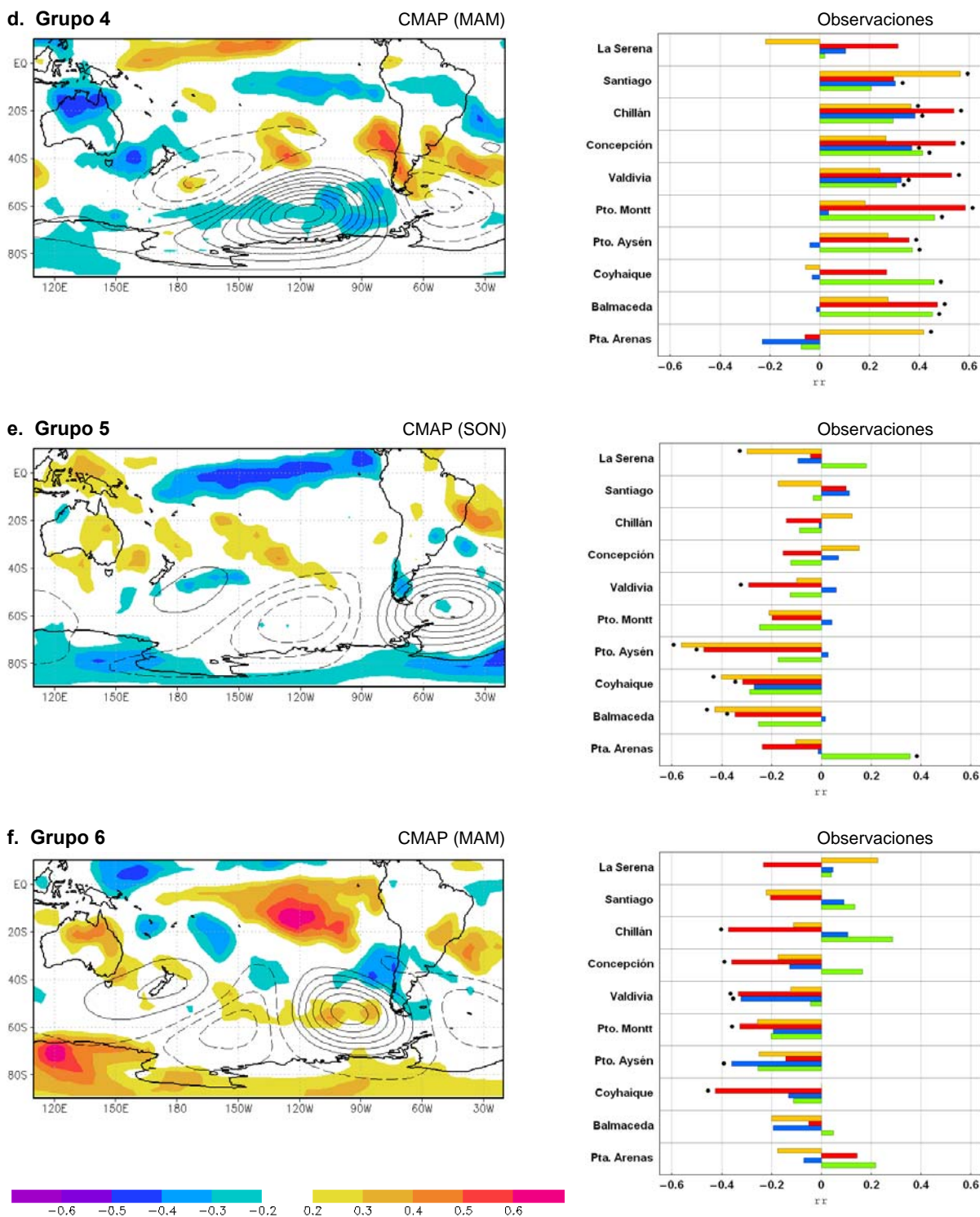


Fig. 2.19 Correlación interanual entre series temporales de precipitación y de APPs respecto a los grupos 1 (a) a 6 (f). Paneles de la derecha ilustran los valores respecto a la precipitación en las estaciones indicadas. Barras amarillas, rojas, azules y verdes indican verano, otoño, invierno y primavera austral respectivamente. Puntos indican valores con significancia estadística superior al 95%. Mapas ilustran la coherencia entre los grupos-APP y las series globales de precipitación CMAP para la temporada indicada. Contornos continuos (segmentados) ilustran las anomalías de Z_{500} positivas (negativas) de cada grupo.

3 DEPRESIONES EXTRATROPICALES EN EL HEMISFERIO SUR

3.1 Ciclones Extratropicales en altura y Bajas Segregadas: antecedentes

La alta variabilidad atmosférica observada en latitudes medias y altas es el reflejo del permanente paso de sistemas migratorios, que se propagan hacia el oeste en torno al círculo polar. En estas regiones del globo, zonas baroclínicamente inestables dan paso a la formación de perturbaciones y eventuales frentes de “mal tiempo”, por lo que se suele definir un trayecto de tormentas (*storm tracks*). En la tropósfera baja, este trayecto se relaciona típicamente con la densidad de ciclones o zonas de alta vorticidad. En altura, el término “*storm tracks*” se define típicamente como las regiones afectadas por la variabilidad de alta frecuencia asociada a diversas variables meteorológicas (e.g., zonas de varianza intensa en la banda espectral de periodos menores a 8 días observada típicamente en datos de viento meridional o geopotencial). En el Hemisferio Sur, la región de máxima variabilidad define un cinturón zonal situado en torno a 50°S aproximadamente (Trenberth 1991), latitud levemente menor que las asociadas a las zonas de máxima densidad de ciclones en superficie (Simmonds y Keay 2000). El rasgo en altura es una manifestación de la rápida propagación de dorsales y vaguadas, las que en ciertas ocasiones forman sistemas cerrados. Por su parte, los ciclones en altura no están restringidos a este régimen y se observan algunos casos apartados de la región dominada por los “Oestes” (e.g., Fuenzalida et al. 2005).

En Keable et al. (2002, K02) se describe un estudio climatológico de ciclones en 500 hPa para el Hemisferio Sur, construido a partir de un esquema de identificación y seguimiento de bajas. Las densidades ahí descritas muestran una mayor concentración de casos en latitudes altas, por sobre los 60°S. Salvo en los primeros 90° de longitud Este, no se define un claro cinturón zonal de máximas densidades como el que se aprecia en superficie (ver Fig. 3.6), y más bien se observan algunos máximos locales distribuidos sobre la región polar. En latitudes subtropicales, el mismo análisis revela otra región de alta densidad, que se manifiesta claramente durante los meses de invierno y primavera austral en el Pacífico occidental.

Las llamadas “Bajas Segregadas” se reconocen en altura como depresiones que nacen o se han desplazado hacia latitudes apartadas de la ruta tradicional de tormentas. Sobre

latitudes subtropicales del Hemisferio Sur, se reconoce una familia de ellas situadas típicamente al norte de la “corriente en chorro” polar o subtropical, definidas en la región de máxima intensidad en el viento zonal (Fuenzalida et al. 2005, F05). Estos casos generan especial interés por sus capacidades de intercambio con la estratósfera baja (e.g., Rondanelli et al. 2002) y de catalizar la formación de sistemas inestables en niveles bajos. En particular, en la árida región del norte de Chile, se observan ocasionalmente episodios de precipitación que están claramente vinculados al paso de Bajas Segregadas (BSs) en altura (e.g., Pizarro y Montecinos 2000). No existen hasta la fecha muchos estudios climatológicos de estos fenómenos para el Hemisferio Sur. En K02 el análisis se concentra en la distribución de ciclones en latitudes medias y altas, y sólo se menciona el grupo subtropical. En F05, mediante la adaptación del mismo esquema de seguimiento de ciclones usado en K02, se presenta una climatología de BSs subtropicales, identificadas cada seis horas sobre campos de Z_{500} . En este estudio, los casos segregados fueron reconocidos visualmente con el apoyo de otros campos meteorológicos (temperatura y viento). Los resultados muestran una distribución en la frecuencia de eventos concentrada en la franja comprendida entre 30°S y 50°S, y con las tres áreas continentales (Sudáfrica, Australia y Sudamérica) como preferentes en su distribución zonal. En la región Sudamericana, donde la máxima densidad de ciclones aparece sobre la costa sur occidental, se observa un claro ciclo anual con valores máximos en invierno y sólo en ella se aprecian tendencias significativas y positivas para el periodo 1969-1999. No se encontraron vínculos aparentes con ENOS en este trabajo.

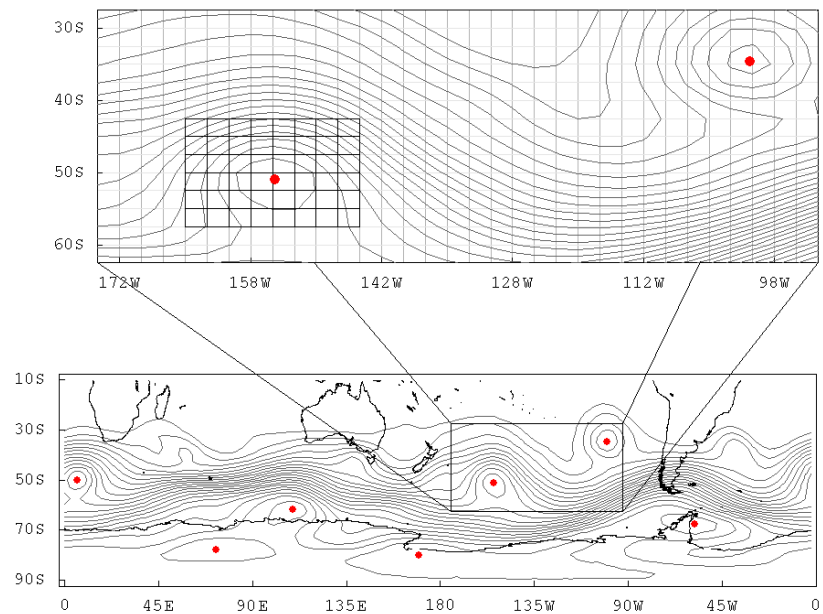
3.2 Identificación y climatología de ciclones en 500 hPa

A partir de un método objetivo aplicado sobre los mismos campos de Z_{500} usados en capítulo anterior (reanálisis NCEP-NCAR), se ha hecho un registro de ciclones extratropicales (CETs) para el periodo 1958-2005. Definidos como bajas de presión “cerradas”, el esquema se basa en la búsqueda diaria de mínimos locales sobre los datos originales (i.e., malla de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ latitud-longitud de resolución). El método consiste básicamente en la búsqueda del punto(s) de grilla que satisfaga(n) la condición de mínimo valor dentro de un dominio local solidario a dicho punto (centrado en él). Este dominio, representado por un cuadrante de 7×9 puntos ($15^\circ \times 20^\circ$ latitud-longitud), recorre el Hemisferio Sur entre 10°S y 87.5°S. Se han escogido estas dimensiones como escala representativa de la extensión típica de depresiones

extratropicales proyectada sobre una geometría cartesiana (en K02 los sistemas exhiben un radio medio del orden de 7° de latitud; ver Fig. 3.1). El valor definitivo resulta de la búsqueda de un mínimo en torno al centro de un campo continuo, el que se obtiene mediante la interpolación sobre el dominio local discreto. Esta interpolación se construye con múltiples polinomios bidimensionales de tercer orden (estructura de funciones *splines* cúbicas; *InterpolatingFunction*, Wolfram 2003).

La intensidad de las depresiones se ha definido sobre el campo de Z_{500} como el Laplaciano discreto de 5° de latitud centrado en el valor registrado, cuya componente zonal fue ajustada latitudinalmente, considerando distancias equivalentes ($dx \approx 5^\circ$ longitud en el ecuador ≈ 5 gdl; gdl $\equiv 1$ grado de latitud). Para los mínimos registrados inicialmente se ha fijado un límite inferior de 5 mgp gdl^2 y una altura máxima de 5900 mgp , restricciones con las que se filtraron principalmente valores sobre la región de bajo gradiente en Z_{500} asociada a la franja tropical, casos que no son de interés en este estudio. Estos límites se determinaron por inspección y a partir de una distribución meridional inicial de los casos observados. Cabe señalar que con este análisis el universo de depresiones se ve inicialmente sesgado por la naturaleza de los campos utilizados (resolución, promedio diario), en los cuales pueden no retenerse aquellas depresiones poco profundas o de muy rápido desplazamiento.

Fig. 3.1 Análisis de Z_{500} en el Hemisferio Sur el 17/4/05. Detalle en el panel superior. Contornos cada 50 y 30 mgp en el panel inferior y superior respectivamente. Grilla negra y puntos rojos representan el dominio local de búsqueda y los ciclones registrados (ver detalles en el texto).



La Fig. 3.1 muestra sobre el campo de Z_{500} siete CETs registrados el 17 de abril de 2005. Identificadas entre 30°S a 80°S , se pueden advertir en este ejemplo tres tipos de depresiones: cuatro casos situados al sur de la región de máximo gradiente en el geopotencial, una clara baja subtropical al oeste de Sudamérica, y dos ciclones dentro de región de alta baroclinicidad. Estos últimos muestran una situación respecto al flujo zonal representativo de casos segregados en desarrollo. La baja subtropical representa un caso segregado común en esa región, mientras que las bajas de mayores latitudes (tres de ellas por lo menos) son producto de dos vaguadas bien desarrolladas sobre la península Antártica y sobre el sur este del Océano Índico.

La frecuencia media de CETs calculada para todo el periodo en estudio se ilustra en la Fig. 3.2a. La densidad espacial de ciclones fue calculada como el número de casos registrados al interior de celdas de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ latitud-longitud, valor que luego fue normalizado por el área asociada y expresado como el total de casos en superficies de $1000 \times 1000 \text{ km}^2$. La distribución observada en la Fig. 3.2 coincide, en una primera aproximación, con lo que se describe en K02. En latitudes altas se exhiben zonas claras de máxima densidad local en torno al círculo polar y sobre el continente Antártico. Estos máximos, que muestran típicamente más de 50 casos anuales por superficies de 10^6 km^2 , coinciden con los observados en K02 en los primeros 90° de longitud Este de la periferia Antártica, sobre el mar de Ross, y sobre el *plateau* continental en 60°E . Cabe señalar que tanto la técnica como la proyección geográfica usadas en el reconocimiento de bajas no son las adecuadas para latitudes muy altas, y son infructuosas en las regiones cercanas al Polo. Sin embargo, es más relevante para este estudio el régimen de ciclones que se observa en latitudes subtropicales, principalmente entre 120°E y 60°W , región donde se identifican las BSs.

La distribución espacial media de las intensidades asociadas a las depresiones registradas, exhibe en gran parte del Hemisferio valores por sobre los 7 mgp gdl^{-2} (Fig. 3.2b). Los máximos, con magnitudes mayores a 9 mgp gdl^{-2} , se concentran principalmente en las regiones de latitudes medias del Hemisferio Oriental (0°E a 180°E) y sobre el Atlántico austral. A causa, probablemente, de los métodos usados en el cálculo de Laplacianos, los valores y la distribución de la Fig. 3.2b no coinciden con lo que se describe en el análisis de K02, donde se observan magnitudes menores y con zonas de mayor intensidad sobre latitudes mayores.

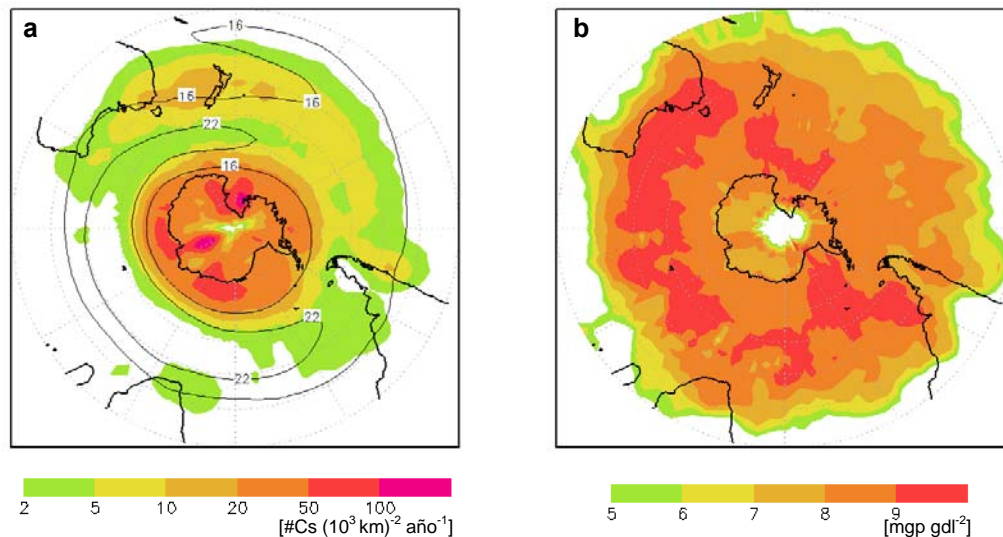


Fig. 3.2

a. Densidad de ciclones extratropicales (CETs) registrados en el Hemisferio Sur durante el periodo 1958-2005. Mapa suavizado mediante celdas móviles de $5^\circ \times 5^\circ$. Contornos negros indican magnitud media del viento en 500 hPa (isotacas de 16 y 22 m s^{-1}).

b. Intensidades promedio calculadas en el centro de cada ciclón como el Laplaciano discreto de 5 mgs gdl^{-2} .

3.3 Depresiones Subtropicales

A partir del conjunto de depresiones extratropicales (CETs) descritos en la sección anterior, se construyó una nueva climatología para el subgrupo de ciclones observados en latitudes subtropicales (CSTs). En este análisis se intenta identificar los CSTs como Bajas Segregadas, por lo que se aplica un método que selecciona ciertos casos a partir de un eje estimado de la corriente en chorro, típicamente presente en latitudes medias. En lo posible, este método objetivo busca reproducir la densidad de BSs descritas en F05, resultado de un registro de ciclones realizado con mayor prudencia (inspección visual).

En el esquema de búsqueda sólo se emplean los datos diarios de Z_{500} , mismos campos (reanálisis NCEP-NCAR) con los que se obtuvo el conjunto original de ciclones (CETs). A partir de éstos se construye una base paralela de datos de magnitud de viento geostrófico en 500 hPa, el que se define en una grilla cartesiana como

$$V_g(X, Y) = \frac{g}{[f(Y)]} \sqrt{dZ_x(X, Y)^2 + dZ_y(X, Y)^2}$$

$$dZ_x(X, Y) = \frac{1}{R \cos(\phi_{\delta y}) \delta x} \frac{\partial}{\partial X} Z(X, Y) ; \quad dZ_y(X, Y) = \frac{1}{R \delta y} \frac{\partial}{\partial Y} Z(X, Y)$$

donde (X,Y) es el espacio definido por la malla rectangular $\{\delta x, \delta y\}$ de la base utilizada (en este caso $\{\delta x, \delta y\} = (\pi/180) \cdot \{2.5, 2.5\}$), R es el radio medio de la tierra, g la aceleración de gravedad en superficie y f el parámetro de Coriolis. Se optó por usar esta estimación del viento real de manera que el método sea sólo dependiente de los campos de Z_{500} , única variable analizada en el estudio de proyecciones que se describe en el capítulo cuarto.

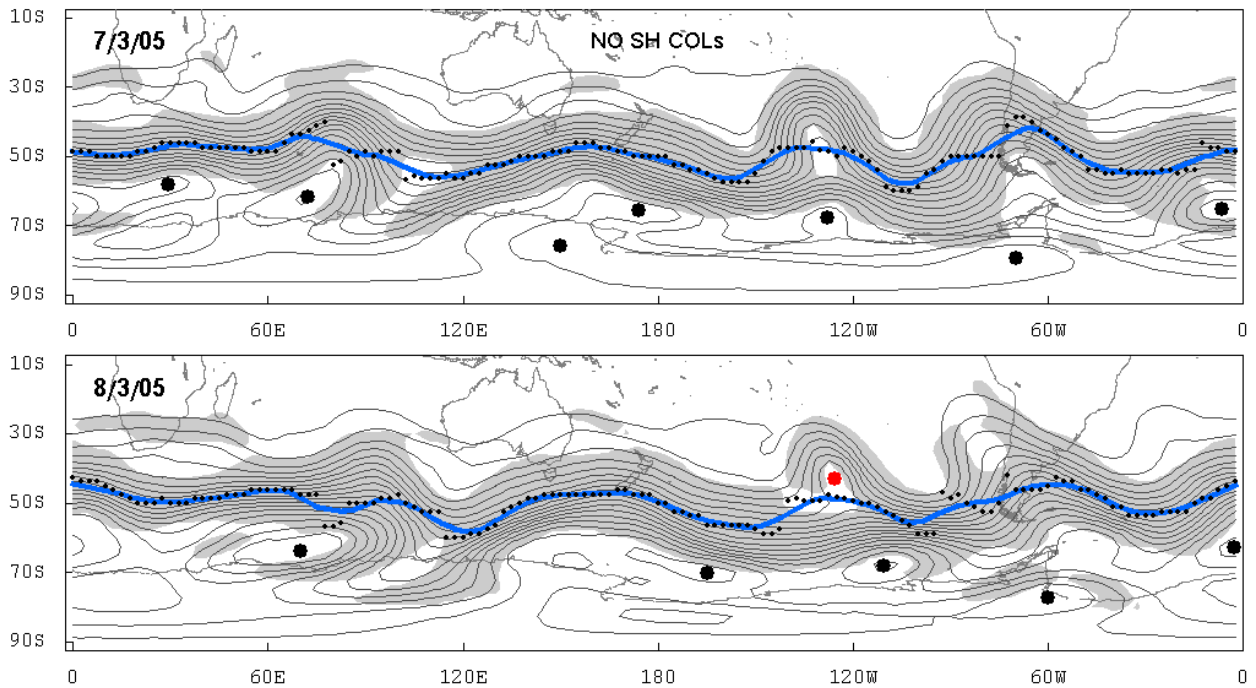


Fig. 3.3 Ilustración de las variables usadas en la identificación de ciclones subtropicales (CSTs) en el Hemisferio Sur. Contornos grises representan el análisis de Z_{500} para los días 7 y 8 de marzo del 2005. Isolíneas cada 50 mgp. Ciclones extratropicales (CETs) y CSTs se indican con puntos negros y rojos respectivamente. En gris se indican las zonas con viento geostrofico mayor o igual a 15 m s^{-1} . Puntos pequeños y línea azul señalan la ubicación estimada del eje de la corriente en chorro y su curva interpolada (ver detalle en el texto).

En la Fig. 3.3 se muestra un ejemplo, para los días 7 y 8 de marzo del 2005, donde se resumen los parámetros usados en el reconocimiento de los CSTs. Para cada día se considera la región definida por magnitudes de viento mayores a 15 m s^{-1} , límite con el cual se reconoce

una zona de máximo flujo en casi todas las longitudes y durante todo el año. Sin embargo, dada la inestabilidad observada en latitudes medias, esta región no se aprecia como una sola franja bien definida y, lógicamente, aparecen otras zonas de gran magnitud de viento, como en torno al centro de depresiones profundas, donde la superficie equipotencial aparece deformada y con fuertes gradientes. Además, generalmente durante el invierno se observa una división de la corriente en chorro, la que presenta una rama subtropical (*STJ*). Estos rasgos hacen difícil definir un método del todo satisfactorio para la identificación del eje del *jet*. Se ha optado finalmente por identificar, en cada arreglo meridional de la grilla del campo (columnas), la posición media de los puntos que integran la rama o las dos ramas principales de la región de máximo flujo. Estas ramas se definieron por tres o más puntos de grilla que estén en forma continua dentro de la región de máximo flujo (i.e., $|Vg| > 15 \text{ m s}^{-1}$). La posición media del *jet*, obtenida en cada columna del campo (longitud), es luego suavizada mediante ventanas zonales móviles de siete valores. Estos valores son finalmente interpolados, con lo se obtiene un eje de la corriente definido por una curva continua. El registro diario de CSTs queda entonces determinado por las depresiones (CETs) ubicadas al norte del eje estimado (ver Fig. 3.3).

La Fig. 3.4 muestra la densidad estacional media de CSTs asociada al periodo completo (48 años). En general se observa una distribución en torno a 35°S , con una mayor actividad sobre el Pacífico occidental. Resulta difícil hacer una comparación cuantitativa entre la frecuencia de CSTs y de BSs tomando como referencia el registro descrito en F05 puesto que, aparte de usarse métodos de distinta naturaleza en el reconocimiento final de depresiones (esquema objetivo vs. identificación visual), en el análisis que se describe en esta sección se usaron promedios diarios de Z_{500} , se consideraron sólo casos de depresiones cerradas y no se hizo un seguimiento de ruta. Aún así, haciendo una estimación, el procedimiento parece sobreestimar la densidad de CSTs respecto al número de BSs. Durante los 31 años analizados en F05 se registraron 1253 casos relativamente intensos, correspondientes al número total de BSs identificadas independientemente. Es decir, este valor no corresponde a un conteo diario de depresiones, como el que se hace en este análisis. Escalando la frecuencia anual media de BSs (~ 40 casos) por la duración media de éstas (cercana a 4 días, F05), se obtiene un valor cercano a 150 casos anuales, equivalente a un catastro realizado a partir de un conteo diario. En el análisis descrito acá se encontró una cifra bastante superior, cercana a 300 CSTs anuales en promedio.

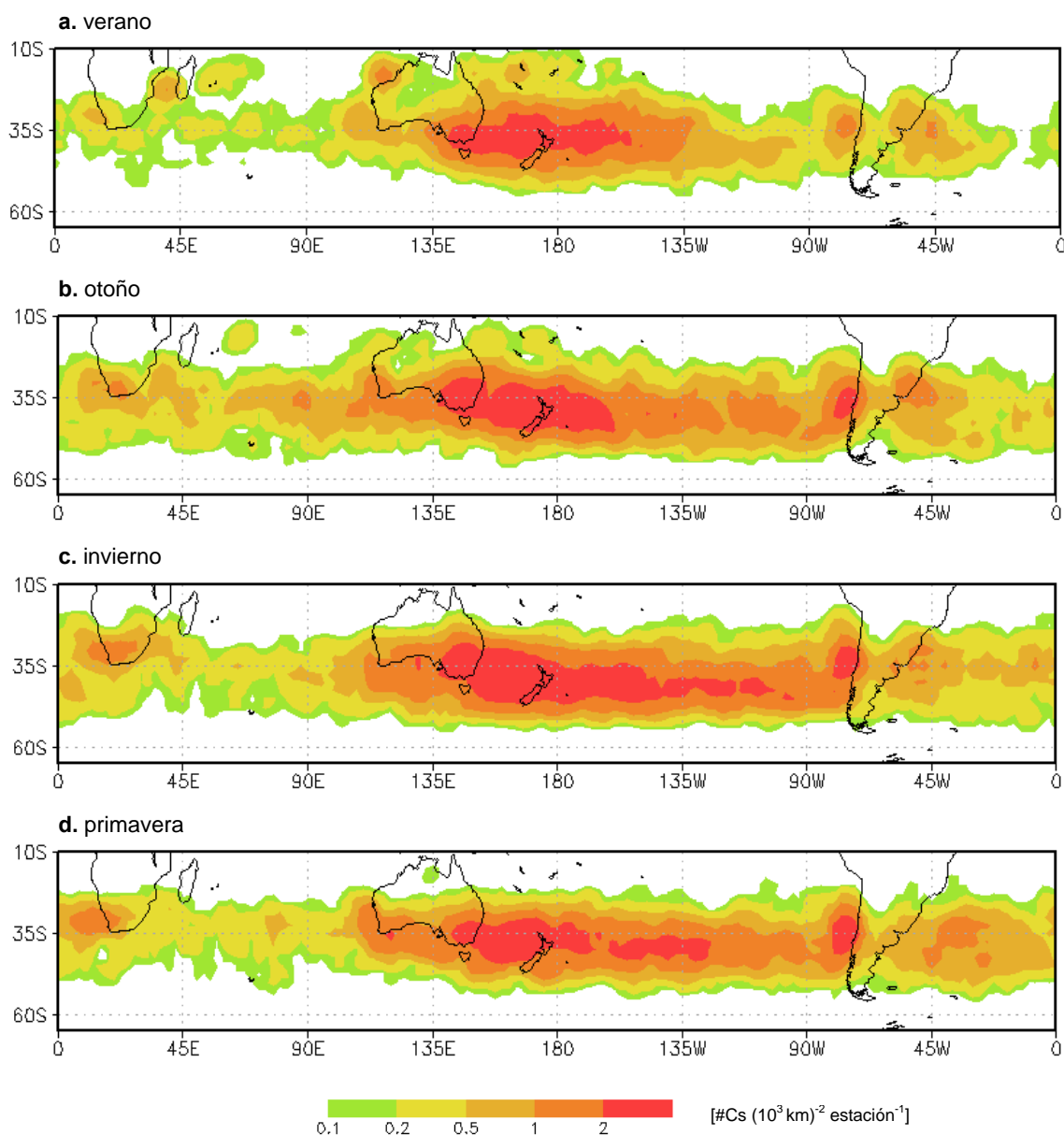


Fig. 3.4 Densidad estacional media de ciclones subtropicales (CSTs). Mapa suavizado mediante celdas móviles de $5^\circ \times 5^\circ$.

Cualitativamente, las zonas de alta frecuencia de CSTs que se ven en la Fig. 3.4 coinciden con lo observado en la distribución de BSs. Estos máximos se observan en el extremo sur de África, en torno a Nueva Zelanda y el sur de Australia, y sobre la costa occidental de Sudamérica. No se aprecia en este análisis la zona de relativa baja densidad de BSs en torno a 150°W , evidente en el mapa de densidad invernal del fenómeno (F05). Esta diferencia se debe posiblemente a depresiones asociadas a la corriente en chorro subtropical presente en esas longitudes, que no fueron filtradas en el análisis de CSTs. En éste se aprecian también los ciclos anuales presentes en casi toda la franja zonal. Los máximos observados en

los meses de invierno y primavera austral sobre la costa de Chile, o en otoño sobre el Océano Índico, coinciden también con lo que se aprecia en F05 para el régimen de BSs.

La distribución latitudinal de CETs y CSTs revela que el segundo grupo representa casi el total de ciclones observados entre latitudes subtropicales y medias (Fig. 3.5a). La Fig. 3.5b muestra una distribución equivalente, pero en base al valor de Z_{500} observado en el centro de cada depresión. En ésta se definen mejor los dos regímenes de ciclones, con los de latitudes altas centrados en torno a 4800 mgp y el grupo subtropical (CSTs) en torno a 5550 mgp. Por su parte, la distribución media asociada a las intensidades de los CETs muestra un máximo centrado en 7 mgp dol^{-2} (Fig. 3.5c). Este rasgo no se aprecia en la distribución del subgrupo de CSTs, el cual probablemente no aparece definido a causa de la alta concentración de depresiones débiles en latitudes bajas, sobre el borde de la franja tropical.

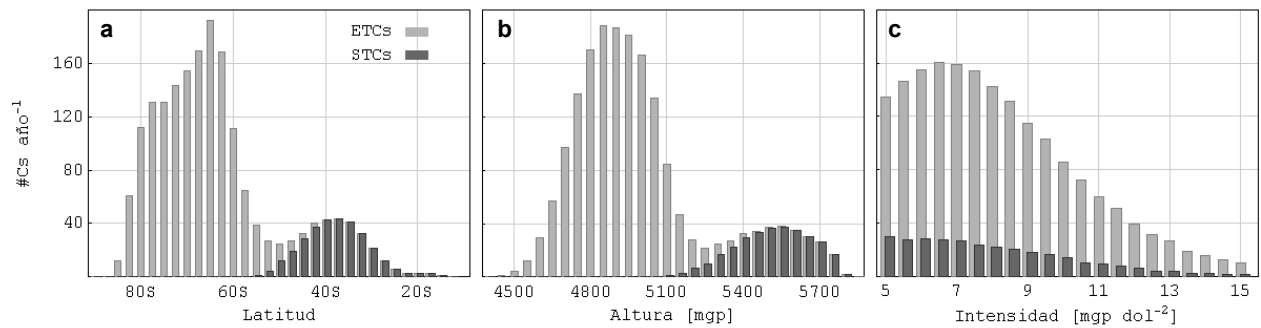


Fig. 3.5 Distribuciones de latitud, Z_{500} e intensidad (a, b y c), para los centros de ciclones extratropicales (CETs, gris claro) y para el subgrupo de regiones subtropicales (CSTs, gris oscuro).

3.4 CETs y ciclones en superficie

Si bien los ciclones observados en la tropósfera media son una manifestación importante de la variabilidad asociada a latitudes medias y altas, no se asocia a éstos una influencia directa en la formación de tormentas en los niveles más bajos, atribuida principalmente a las perturbaciones en superficie. La ciclogénesis en superficie responde principalmente a divergencias en altura en una atmósfera baroclínicamente inestable. Estas perturbaciones en altura no se manifiestan necesariamente como ciclones cerrados o CETs, y se observan más bien como vaguadas profundas o anomalías en campos de vorticidad. Por lo tanto, antes de evaluar la importancia de los CETs en términos climáticos, es importante evaluar la frecuencia de éstos respecto a la densidad de sus contrapartes en superficie.

Para intentar caracterizar el grado de coherencia entre las bajas observadas en 500 hPa y los niveles bajos de la tropósfera, se dispone de una base externa de ciclones en superficie para el Hemisferio Sur. Éstos fueron identificados sobre campos diarios (12 UTC) de presión a nivel del mar (SLP) durante 30 años (1971-1999). El método usa el mismo esquema aplicado en la identificación de sistemas en altura, con los que se construyeron las climatologías descritas en K02 y F05 (versión original del procedimiento se describe en Murray y Simmonds 1991).

La Fig. 3.6 representa la densidad anual media de ciclones superficiales calculada para el periodo completo. Se observa en general un rasgo promedio coherente con la distribución de los mismos sistemas descritos en la literatura (Simmonds y Keay 2000). La distribución concentra el mayor número de casos en latitudes media-altas, maximizándose en un anillo zonal en torno al círculo polar. El concepto de canal de tormentas (*storm tracks*) en el Hemisferio Sur ha sido definido en variadas ocasiones en base a este anillo. Otros máximos locales se aprecian en áreas continentales, particularmente sobre el lado occidental de Australia. Las zonas de relativa mayor densidad de ciclones sobre las costas occidentales de Sudamérica y África pueden estar sugiriendo fenómenos de otra naturaleza conocidos como Bajas Costeras, que representan perturbaciones atrapadas en la topografía local y forzadas por el régimen de circulación de gran escala (ver Garreaud et al. 2002 y referencias ahí señaladas).

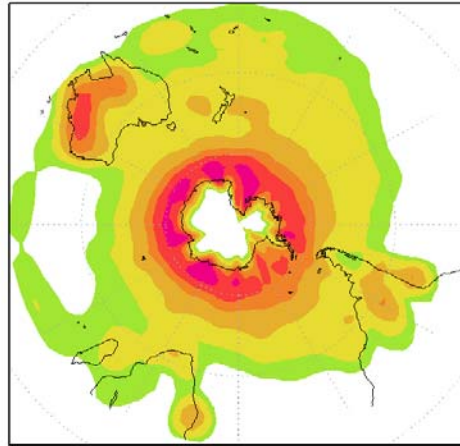
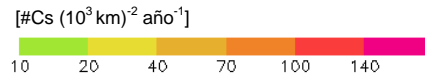


Fig. 3.6 Densidad de ciclones en superficie durante el periodo 1971-1999. Mapa suavizado mediante ventana móvil de 5° x 5°.



La coherencia entre la densidad de CETs en un cierto lugar del Hemisferio y el régimen de ciclones en superficie (CSs) se caracterizó mediante mapas compuestos de estos últimos, construidos con las fechas asociadas al registro de los ciclones en altura en celdas de 5° x 5° latitud-longitud. La Fig. 3.7a ilustra un ejemplo de este cálculo para una celda situada en el Pacífico sur oriental. Los compuestos fueron ajustados para extraer la componente del campo promedio, es decir

$$[CSs]'_{CETs} = [CSs]_{CETs} - N < CSs > ; \quad N = n / (31 \times 365)$$

donde $[CSs]'_{CETs}$ y $< CSs >$ representan el compuesto ajustado y la densidad total de ciclones superficiales (climatología), y N, un parámetro de ajuste igual a la fracción del número de mapas usado en el compuesto (n) sobre el tamaño total (i.e., 31 x 365).

El compuesto de la Fig. 3.7a muestra una clara señal de ciclones en superficie en torno a la celda de CETs en altura (cuadrante rojo), que abarca una superficie bastante superior a esta última. Coherente con el desfase teórico entre los sistemas de superficie y las perturbaciones en altura en una región con cierto grado de baroclinicidad, se aprecia una proyección hacia el este de la zona afectada por el compuesto. Se indica en este ejemplo la fracción de la suma total del compuesto dentro de una región de 25° x 25° centrada en la celda menor (cuadrante azul en la Fig. 3.7), sobre el número de mapas utilizados en el cálculo del compuesto. Se escogieron esas dimensiones para el cuadrante mayor como escala representativa de la zona afectada por los sistemas en altura al interior de la celda menor (escalas mayores sólo suman un ruido cercano a cero). A la fracción resultante -0.58 en el ejemplo de la figura- no se le puede atribuir un significado cuantitativo general entre los

sistemas de ambos niveles de la tropósfera, puesto que los métodos usados para la identificación de cada caso son distintos. Este índice, definido entonces como la fracción de sistemas en superficie coherentes con las CETs en altura, tiene un sentido cualitativo si se generaliza para todo el Hemisferio. Este análisis se ilustra en la Fig. 3.7b, que muestra el resultado del mismo cálculo hecho para las celdas centradas en todos los puntos de grilla comprendidos entre 87.5°S y 10°S.

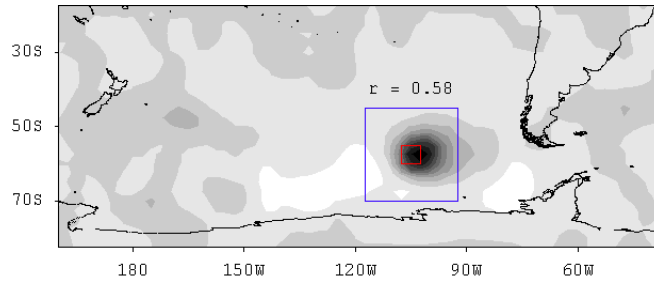
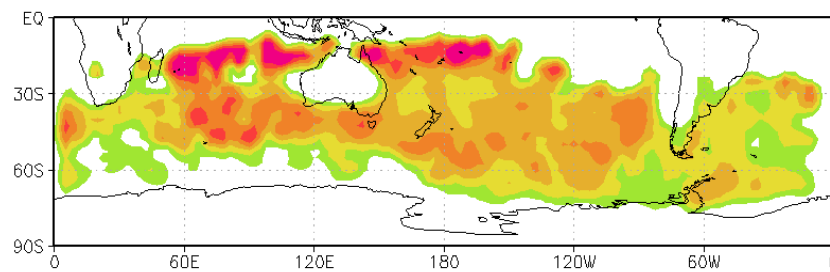


Fig. 3.7

a. Compuesto relativo de ciclones en superficie asociado a los CETs registrados al interior de la celda de 5° x 5° situada en el Pacífico sur (cuadrante rojo). Se indica la fracción del total resultante al interior del dominio mayor (25° x 25°, en azul) sobre el tamaño del compuesto (número de CETs).



b. Fracción de ciclones en superficie coherentes con CETs en altura observados al interior de celdas de 5° x 5°. Generalización del análisis ilustrado en el panel superior (a).

La distribución espacial del índice recién descrito muestra valores mayores a 0.3 repartidos en gran parte del Hemisferio (Fig. 3.7b). Sobre latitudes subtropicales y medias se observan valores medios de 0.5 a 0.7, con máximos locales al centro del Océano Índico. Los máximos globales se concentran en regiones de relativa baja densidad de ciclones en superficie, en latitudes bajas entre 60°E y 180°. El alto valor del índice en este sector, por sobre 0.8 en algunos casos, pueden estar indicando una fuerte presencia de sistemas con estructura barotrópica. El cinturón de alta densidad de ciclones superficiales en la periferia de la Antártica muestran, por otro lado, una muy baja contribución de sus contrapartes en altura, rasgo que se repite en otras zonas con máximos locales como Australia y la costa occidental de Sudamérica. El bajo índice en este último caso tiene bastante sentido considerando que las bajas presiones superficiales apreciables semanalmente en esa región no representan el paso de sistemas ciclónicos migratorios, y son más bien la manifestación de Bajas Costeras. Estos fenómenos, que como se señaló anteriormente representan perturbaciones atrapadas que se propagan al

oeste de la Cordillera de los Andes, ocurren además en forma coherente con el paso de una dorsal en altura (Garreaud et al. 2002).

3.5 Influencias de APPs en la frecuencia de depresiones extratropicales

A continuación se describe el resultado de un análisis que caracteriza el impacto sobre variabilidad de los ciclones en estudio y su preferencia espacial, producto de los patrones de circulación asociados a las APPs definidas anteriormente en este trabajo. A partir de las tres bases de depresiones extratropicales descritas (CETs, CSTs y ciclones de superficie), se construyeron mapas de compuestos asociados a la frecuencia de los modos (grupos) de APPs descritos en el capítulo anterior. Estos compuestos fueron hechos promediando los días de manifestación de las APPs y expresados en términos de anomalías normalizadas. Esto es,

$$[Cs]'_{PPAi} = \frac{[Cs]_{PPAi} - N \langle Cs \rangle}{\langle Cs \rangle}$$

con $[Cs]_{APPi}$ el compuesto tradicional (suma directa) sobre la base genérica de ciclones Cs asociado al grupo i de APPs, $\langle Cs \rangle$ la climatología de la base, y N la escala asociado al número de días con los que se construyó el compuesto. En la Fig. 3.8 se ilustran los compuestos de estas tres bases de ciclones asociados a los grupos de APPs que afectan directamente Sudamérica: los grupos 2, 4, 5 y 6.

En general, se aprecia una relación positiva entre los modos de APPs y la frecuencia de depresiones situadas en torno a éstos, y una relación negativa en la región centrada en las perturbaciones. Este último rasgo se observa principalmente en los casos de superficie. La magnitud de los impactos son, por su parte, mayores en altura (sobre los CETs y CSTs) que en superficie, explicándose en algunos casos más del 25% en la ocurrencia de las depresiones. En superficie este valor no supera el 20% (notar la diferencia de escala en la Fig. 3.8 entre los casos de superficie y altura).

En particular, el modo tipo SAM (grupo-APP 2) muestra una señal débil en el régimen de las depresiones de superficie, inhibiendo y estimulando la frecuencia de casos en anillos zonales de latitudes altas (en torno a 70°S) y medias respectivamente. El rasgo en altura

asociado a este grupo es más notable, donde la frecuencia de CETs en ciertos lugares se explica en más de un 20% por el patrón de APPs. Esta relación es débil en la región del Pacífico sur-oriental y no se observan vínculos con el régimen de depresiones subtropicales (CSTs). El grupo-APP 4 muestra una manifestación clara sobre las tres bases tratadas, caracterizada por una mayor frecuencia de ciclones al norte del sector donde ocurren las APPs. En superficie, el compuesto no es muy intenso, pero define una vasta zona coherente con el modo sobre del Pacífico austral, donde se explica entre un 5% y un 10% de la ocurrencia de depresiones. En altura, el compuesto de CETs muestra una señal más clara, con valores superiores a 0.25 en algunos lugares del Pacífico sur. El patrón es similar sobre el régimen de CSTs, pero aparece lógicamente confinado a latitudes menores. Los grupos de APPs 5 y 6, asociados respectivamente a bloqueos que ocurren al este y al oeste del extremo austral de Sudamérica, muestran patrones similares a los del grupo 4. En estos compuestos se observa una influencia sobre el régimen de ciclones en regiones al norte del bloqueo, que explica más del 20% en la ocurrencia de los casos en altura. En particular, el grupo 6 muestra un patrón en superficie relativamente intenso respecto a lo observado con los grupos. Esto se aprecia costa afuera de Chile central, con valores por sobre 0.1 en el compuesto.

Si bien este análisis muestra una clara influencia de APPs sobre la frecuencia de ciclones en 500 hPa situados al norte de las perturbaciones, no es claro que los compuestos del grupo subtropical (CSTs) estén representando un impacto sobre el régimen de Bajas Segregadas. Los paneles de la Fig. 3.8 que ilustran estos compuestos (a la derecha) asociados a los grupos APPs 5 y 6, muestran un rasgo donde efectivamente la concentración anómala de ciclones ocurre al norte de la zona de máximo flujo, pero esta última aparece deprimida y no define un claro *jet*. Este rasgo en la circulación es coherente y define precisamente el bloqueo asociado a cada patrón de APPs, pero dificulta la distinción entre tipos de bajas. Los compuestos de CSTs asociados al grupo-APP 4 son aún menos identificables como casos segregados pues, además de presentar una reconocible corriente subtropical al norte de la señal de ciclones, muestran un patrón en superficie que se asocia más bien a un anómalo desplazamiento hacia el ecuador del régimen de sistemas migratorios propio de latitudes medias.

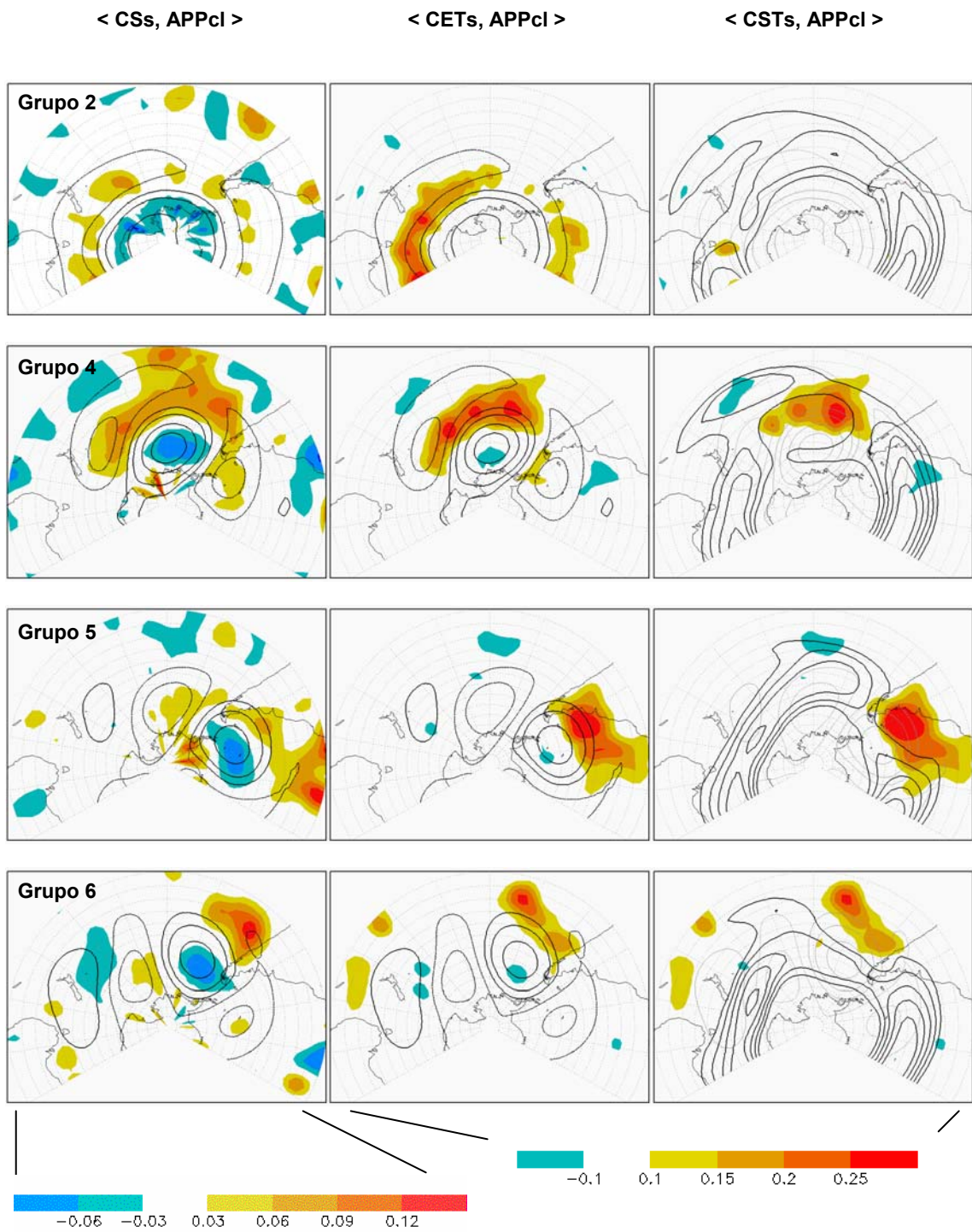


Fig. 3.8 Compuestos asociados a los grupos de APPs 2, 4, 5 y 6 del Hemisferio Sur. Ciclones en superficies (CS), CETs y CSTs en paneles de la izquierda, centrales y de la derecha respectivamente. Contornos negros indican las anomalías de Z_{500} (paneles de la izquierda y del centro) y el viento geostrófico en 500 hPa (paneles de la derecha) asociados a cada grupo (se omite contorno 0, negativos en línea punteada).

4 PROYECCIONES

En este capítulo se describen las proyecciones hacia fines del siglo XXI de los fenómenos en estudio: Anomalías Positivas Persistentes (APPs) y Ciclones Extratropicales en altura (CETs y CSTs). Para este análisis se reconstruyeron las climatologías descritas en los capítulos anteriores, pero sobre los campos diarios de Z_{500} obtenidos del modelo global *HadCM3* (Gordon et al. 2000, detalle en la siguiente sección), del que se disponen dos periodos de treinta años correspondientes a fines del siglo XX (1960-1989) y XXI (2070-2099). El primer periodo se usó como corrida de control, con la que se evaluó el estado medio de los fenómenos en el clima presente (CP) del modelo. El segundo grupo de datos (CF) es el resultado de una integración con emisiones antrópicas tipo IPCC-SRES A2 para gases de efecto invernadero y aerosoles. Esta es una proyección realizada bajo un escenario socio-económico de carácter levemente pesimista, que considera un proceso global bastante desigual, con un desarrollo económico y tecnológico de tipo regional y un crecimiento neto poblacional continuo (*Special Report on Emissions Scenarios, Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC-AR3 2001*).

A continuación se describe en forma general la componente atmosférica del modelo *HadCM3*. Luego se evalúa el comportamiento promedio de Z_{500} y parte de su variabilidad observada en los dos periodos disponibles. En las siguientes dos secciones se exponen los rasgos generales de los fenómenos descritos en los capítulos 2 y 3, como resultado de sus climatologías reconstruidas sobre los datos del modelo.

4.1 **HadCM3: descripción de modelo**

Se trata de un modelo global acoplado (atmósfera-océano) desarrollado en su tercera versión por el Centro para la Predicción Climática e Investigación de Hadley (*Hadley Centre for Climate Prediction and Research, UK; Gordon et al. 2000*). La componente atmosférica del modelo (*HadAM*) incluye 19 niveles en la vertical con una resolución horizontal de $2.5^\circ \times 3.75^\circ$ latitud-longitud, equivalente a una grilla cartesiana de 73×96 puntos. Esta resolución corresponde en superficie a celdas de aproximadamente 417×278 Km en el Ecuador y $295 \times$

278 Km en 45° de latitud, escala comparable con la asociada a la malla de resolución espectral T42. Esta versión no requiere de ajustes de flujo superficiales e incluye un esquema de radiación con 6 bandas espectrales en onda corta (visible, radiación solar) más 8 bandas de baja frecuencia (infrarrojo, radiación terrestre). Los efectos en el balance radiativo producidos por gases de efecto invernadero como dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O) y ozono (O₃) están representados explícitamente, y se incluye también una parametrización simple de aerosoles. El esquema de suelo considera congelación y fusión de humedad superficial, además de escorrentía y drenaje. La evaporación incluye una resistencia en las estomas vegetales dependiente de la temperatura, presión de vapor y concentración de CO₂. El albedo superficial es dependiente de la profundidad de la capa de nieve, de la temperatura existente sobre ésta y sobre hielo, así como del tipo de vegetación. Además de un esquema de convección, HadAM posee un modelo de nubes y precipitación de gran escala, formulado en base a una variable explícita de contenido de agua en nubes. Esta variable determina, junto con la concentración de gotas, el radio efectivo de estas últimas. El modelo puede representar, opcionalmente, el transporte de óxidos de azufre producto de emisiones antrópicas, que incluye procesos de oxidación y remoción por deposición seca (física) y húmeda.

4.2 HadCM3 y Z₅₀₀

La Fig. 4.1 muestra los campos medios de Z₅₀₀ para las tres bases de datos en estudio (reanálisis NCEP-NCAR, HadCM3-CP y HadCM3-CF), separados en los semestres boreales cálido (mayo-octubre, MJJASO) y frío (noviembre-abril, NDEFMA). Se ilustran también las diferencias entre los datos del modelo y de reanálisis, y entre las dos bases (periodos) del modelo. Los campos asociados a la salida de control de HadCM3 (CP) muestran, en general, una buena representación espacial de la altura del nivel de 500 hPa; variable que se destaca por la simetría entre ambos hemisferios durante los meses centrados en el invierno boreal, con valores bajo los 5100 mgp en las zonas polares y llegando a más de 5800 mgp en latitudes menores a 30° de latitud. Esta simetría desaparece durante el semestre cálido del Hemisferio Norte, durante el cual el eje de máximos valores aparece corrido hacia dicho hemisferio y no se aprecian alturas bajo 5400 mgp en torno al Polo Norte. El modelo representa también las deformaciones de las isóneas en torno a las masas continentales, claramente apreciables en el límite oriental de la región Soviética y en Norteamérica.

La diferencia entre los campos medios de fines del siglo XXI y XX del modelo (CF-CP) muestra un claro hinchamiento general de la columna troposférica, cercana a 60 mgp. Este fuerte contraste es coherente con las diferencias de temperatura superficial global entre el clima presente y el clima proyectado bajo el escenario estudiado acá, observadas en las simulaciones de HadCM3 y en las de casi todos los modelos globales de última generación (IPCC 2001). De acuerdo también a lo esperado con estos datos, los cambios aparecen más intensos en el Hemisferio Norte, particularmente durante los meses centrados en el verano boreal. Si bien esta asimetría en las diferencias entre ambos periodos –asociada a la desigual distribución de masas continentales– es evidente, los valores representan no más del 5% de las alturas promedio del nivel de 500 hPa, por lo que no se rompen las diferencias estacionales en la distribución media de esta variable.

Parte de la variabilidad presentada por los campos de Z_{500} se evaluó mediante un simple cálculo de varianzas a distintas escalas de tiempo. Las Figuras 4.2 a 4.4 ilustran para cada hemisferio los mapas de desviación estándar (DS) de las anomalías de Z_{500} para tres bandas de interés; una asociada a la variabilidad de alta frecuencia y dos de baja frecuencia. La primera corresponde a la DS calculada mes a mes a partir de los valores diarios de Z_{500} . Estos valores fueron luego promediados definiendo una variabilidad intra-mensual promedio, representativa principalmente del régimen atmosférico a escala semanal (sinóptico) y del extremo de frecuencias mayores dentro de la banda intraestacional. En forma equivalente, las magnitudes representadas en el segundo grupo de mapas fueron obtenidas como las DS de los promedios mensuales de Z_{500} , las que fueron calculadas para cada año en forma independiente y luego promediadas (Fig. 4.3). Con esto se filtraron las variaciones asociadas a periodos mayores de un año (interanuales), y se representaron principalmente variaciones de baja frecuencia dentro de la banda intraestacional (periodos mayores a 1 mes naturalmente). La Fig. 4.4 representa la variabilidad a escalas interanuales y mayores, calculada como la DS de las medias anuales de Z_{500} .

En general, en las Figuras 4.2 a 4.4 se observa una buena reproducción por parte del modelo en la distribución espacial de las tres variables calculadas, respecto a lo que muestran los campos de reanálisis. El régimen de alta frecuencia en el Hemisferio Sur se caracteriza por un anillo de valores intensos en latitudes medias-altas, con máximos relativos sobre el Océano Pacífico austral (Fig. 4.2a). Este patrón es claramente reconocible en los dos periodos del modelo, pero aparece sobrestimado en magnitud respecto al reanálisis (Fig. 4.2b). Los resultados para fines del siglo XXI insinúan un corrimiento de la zona de máxima varianza hacia

mayores latitudes, especialmente sobre los océanos Atlántico e Índico austral. Los datos del modelo para el Hemisferio Norte reproducen igualmente el patrón de alta frecuencia observado en los datos de reanálisis que, sin la simetría del Hemisferio Sur, presenta zonas de máxima actividad sobre los océanos y sobre el norte de Rusia. A diferencia de su homólogo del sur, esta variabilidad aparece subestimada en magnitud en altas latitudes y sobreestimada en latitudes medias. La diferencia entre los resultados de fines del siglo XXI y XX muestra en este caso valores principalmente negativos, con un claro descenso en la actividad intramensual sobre Groenlandia, Rusia y el Pacífico boreal.

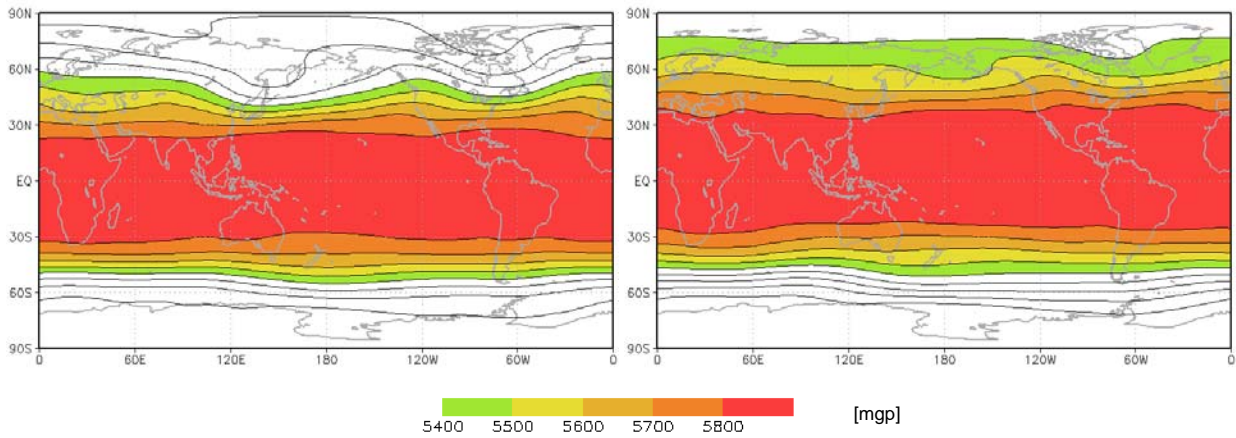
Como se vio en el segundo capítulo, la DS calculada a partir de promedios mensuales de Z_{500} muestra en su distribución espacial una clara similitud con el campo medio de frecuencia de APPs (Fig. 4.3). Estos patrones aparecen bien representados en las distribuciones asociadas a los campos de HadCM3, pero subestimados en magnitud en gran parte del globo, especialmente en el Hemisferio Norte. Por su parte, las proyecciones del modelo muestran un aumento de esta actividad en diversas regiones, particularmente sobre el continente Antártico y el Pacífico septentrional.

La variabilidad interanual de los campos de reanálisis muestra un máximo global en su DS sobre el Océano Pacífico austral. Esta región ha sido extensamente descrita por su respuesta a las fases del ciclo ENOS (e.g., Kiladis and Mo 1998), principal modo global de oscilación a estas escalas de tiempo. Debido, por un lado, al menor tamaño de las series ocupadas –cuyas comparaciones hacen diferencias menos significativas– y por otro lado, a la dificultad de reproducir este régimen natural, esta actividad es la peor representada por el modelo dentro del espectro de variabilidad analizado (Fig. 4.4). Igualmente, éste logra reproducir las zonas de alta actividad sobre el Pacífico austral y boreal, sobreestimadas y subestimadas en magnitud en el primer y segundo caso. Los resultados para el siglo XXI muestran, por su parte, un aumento de esta actividad en estas dos regiones, particularmente intensa en el Pacífico sur oriental. Para más detalles respecto a la variabilidad climática interna del modelo HadCM3 revisar el estudio de Collins et al. (2001).

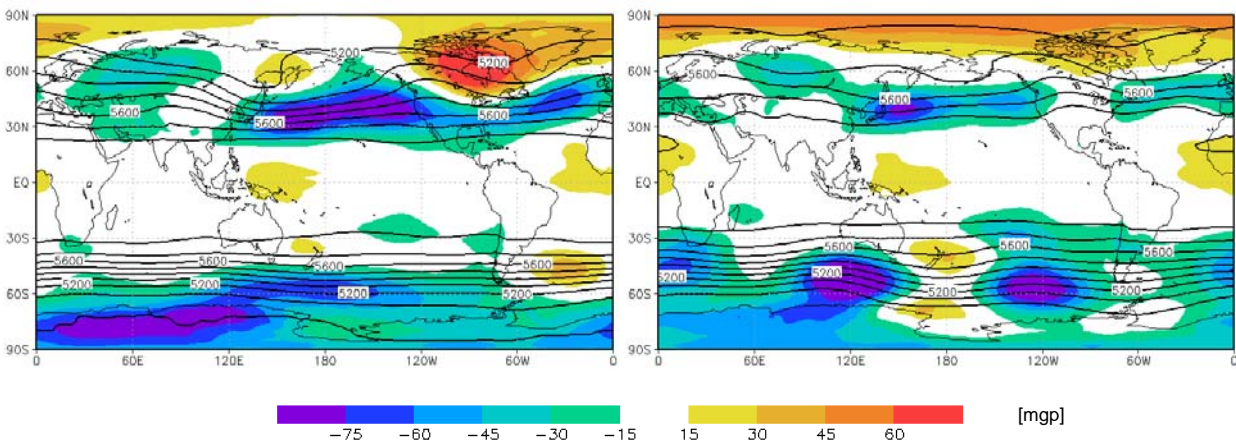
< Z₅₀₀ - NDEFMA >

< Z₅₀₀ - MJJASO >

a. Reanálisis



b. HadCM3 - CP (modelo – reanálisis en colores)



c. HadCM3 - CF (CF-CP en colores)

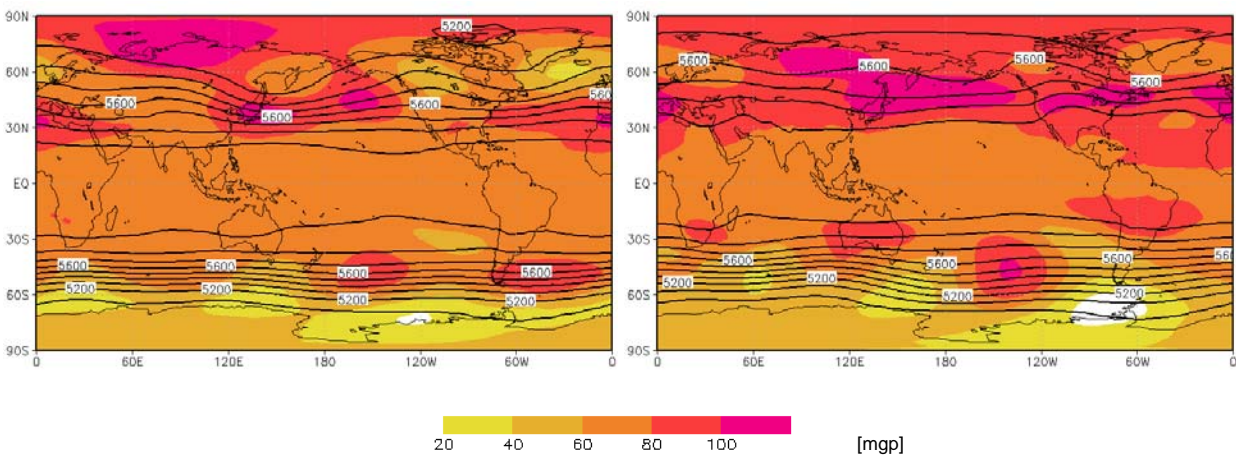


Fig. 4.1 Campos medios estacionales de Z₅₀₀. Nov-abr (paneles de la izquierda) y may-oct (derecha). Contornos cada 100 m. Reanálisis NCEP-NCAR respecto al periodo 1960-1989 (a), HadCM3 durante el periodo de clima presente 1960-1989 (b) y HadCM3 para el periodo proyectado 2070-2099 (c). En colores, diferencia entre el modelo y el reanálisis (b) y diferencias entre los dos periodos del modelo (c).

Variabilidad de alta frecuencia

DS ($|Z_{500}'|_{\text{día}}$) [mgp]

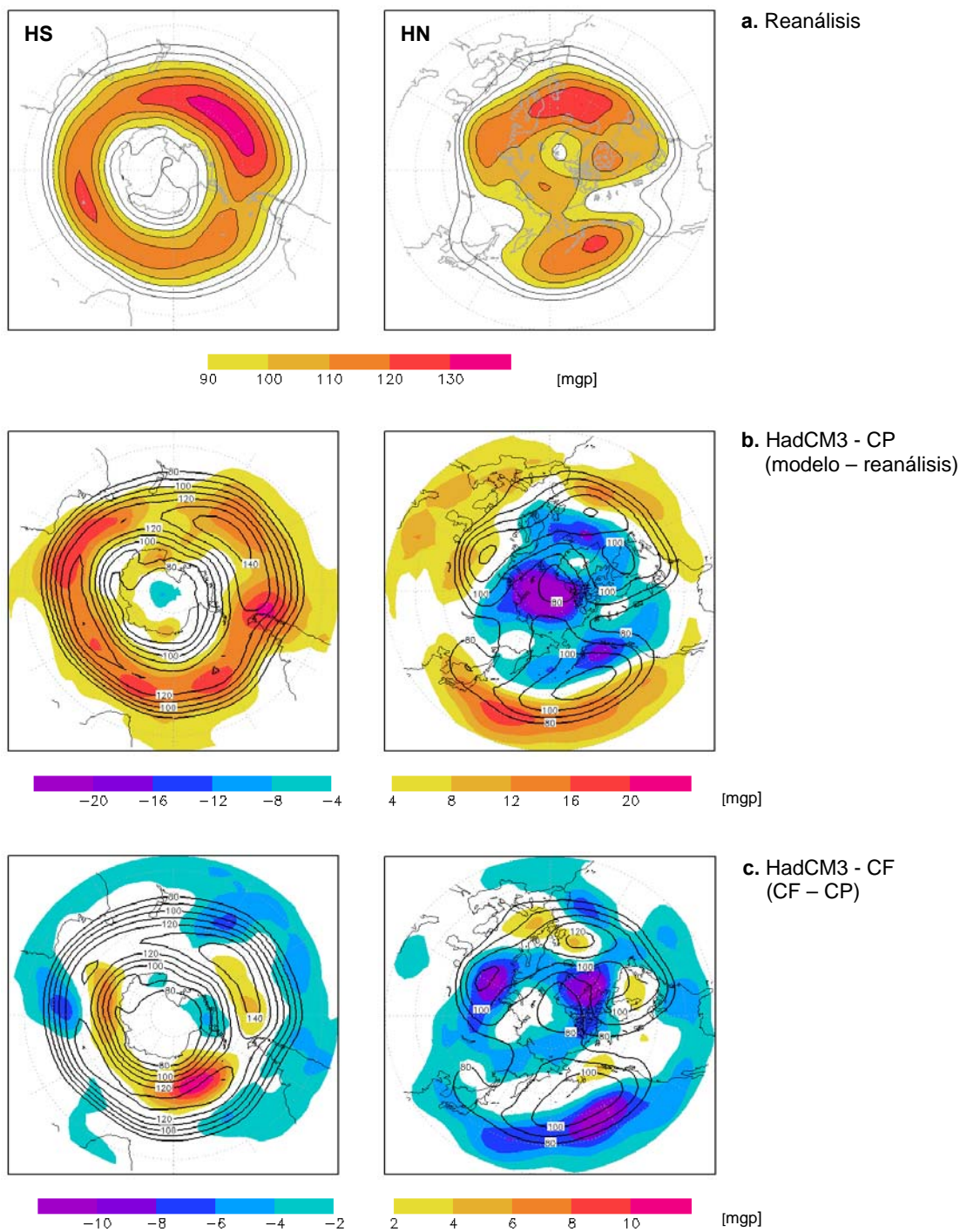


Fig. 4.2 Desviación estándar (DS) de valores diarios de Z_{500}' (en mgp). Cálculo realizado mensualmente y luego promediado. Hemisferio Sur y Norte en paneles de la izquierda y derecha respectivamente. Resultados para los reanálisis NCEP-NCAR (a), y HadCM3 en el sXX (b) y sXXI (c). Colores señalan diferencias entre los datos reanálisis y del modelo (b), y entre los periodos futuro y presente del modelo (c).

Variabilidad de baja frecuencia I

DS ($|Z_{500}'|_{\text{mensual}}$) [mgp]

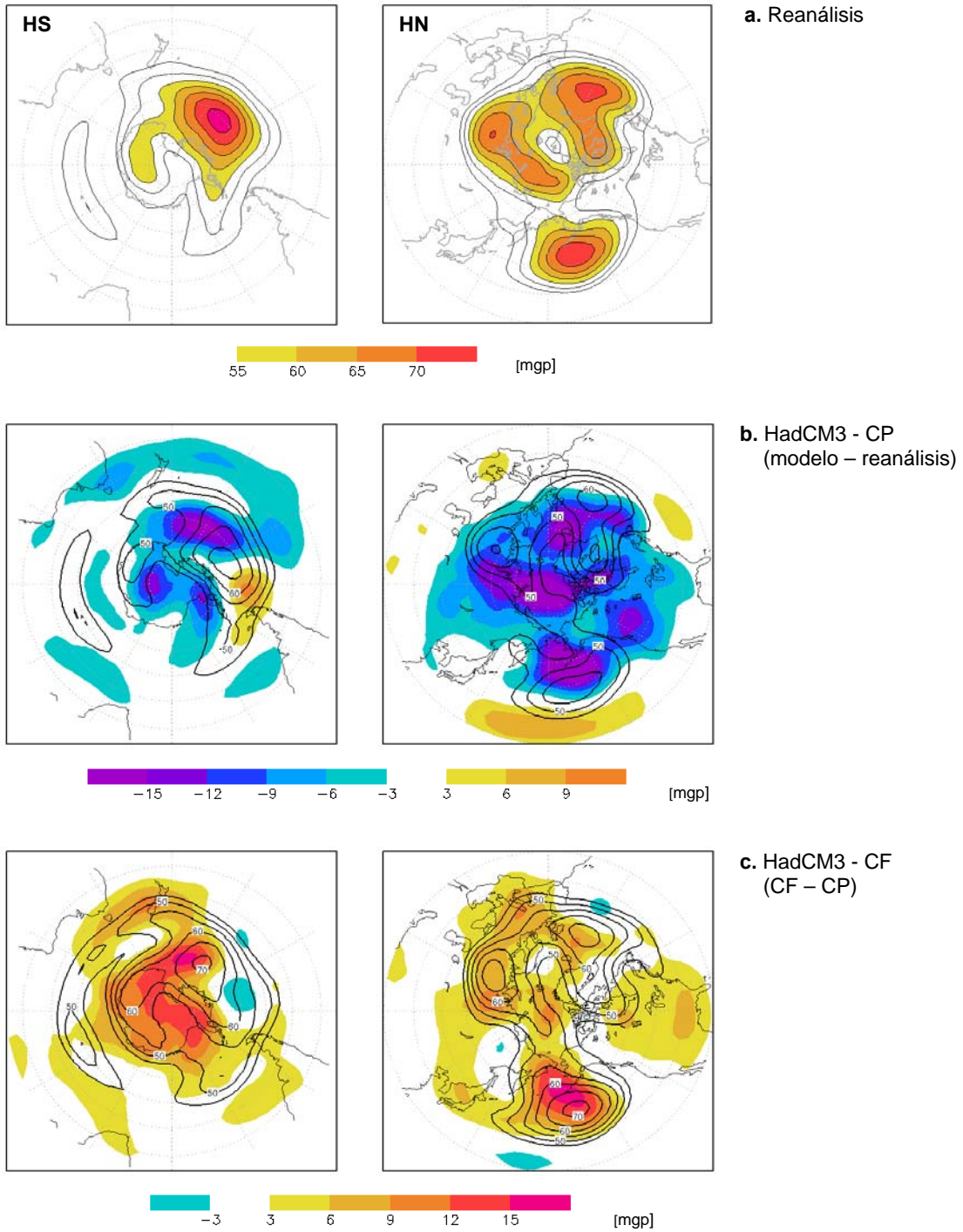


Fig. 4.3 Igual que Fig. 4.2, pero para DS calculadas a partir de series mensuales de Z_{500}' . Cálculo realizado anualmente y luego promediado.

Variabilidad de baja frecuencia II $DS (|Z_{500}'|_{anual})$ [mgp]

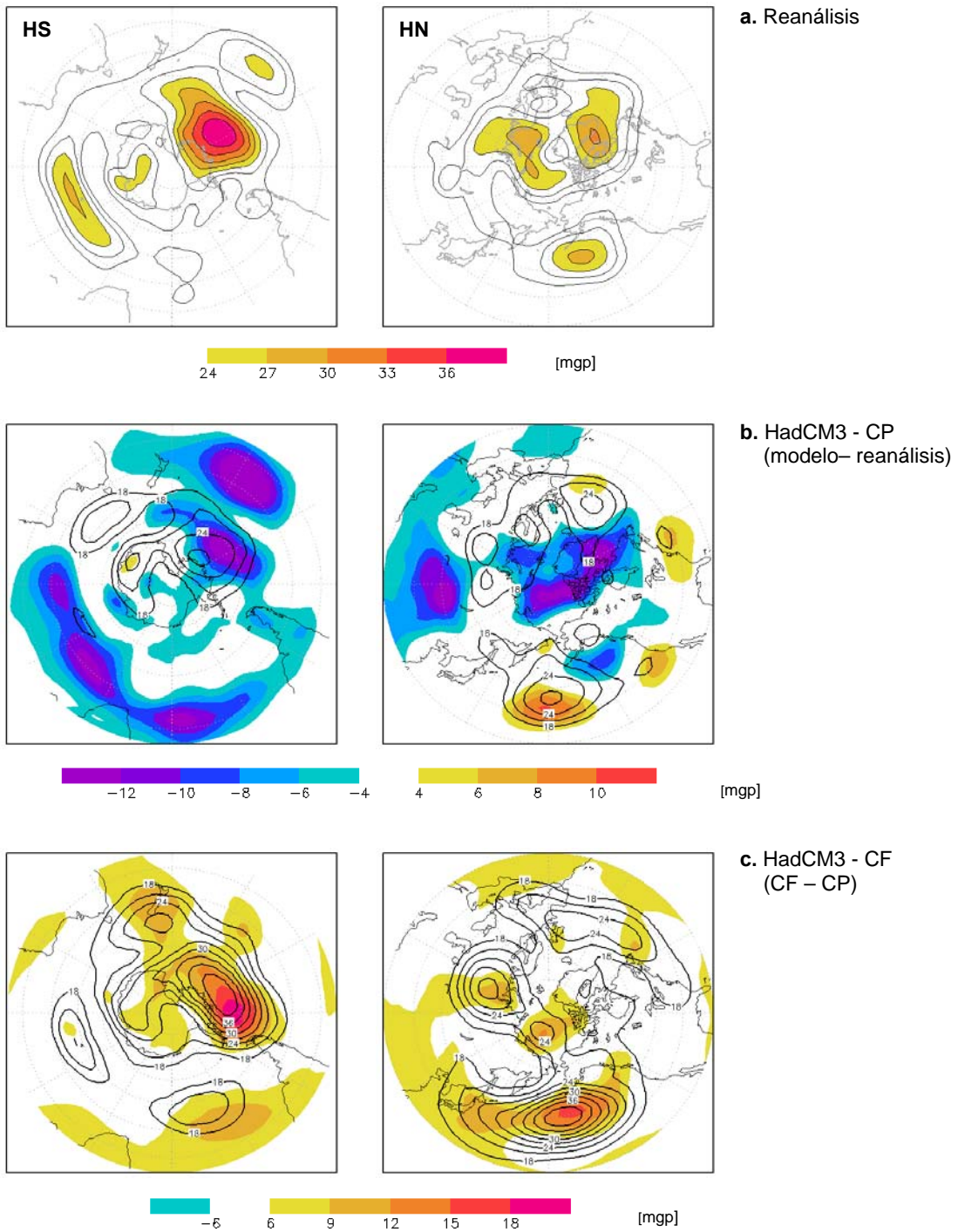


Fig. 4.4 Igual que Fig. 4.2, pero para DS calculadas a partir de medias anuales de Z_{500}' .

4.3 APPs

Para la identificación de anomalías persistentes sobre los campos del modelo HadCM3 se usó una técnica idéntica a la descrita en el segundo capítulo. Se registraron, por lo tanto, episodios de APPs definidos como anomalías en Z_{500} mayores a 100 mgp persistentes por 5 o más días. Las series de anomalías (Z_{500}') fueron construidas para cada punto del globo de la misma forma que las series de reanálisis (e.g., Fig. 2.2), pero en forma independiente para cada periodo del modelo; es decir, éstas se calcularon respecto al promedio climatológico de 360 días (ciclos anuales) asociado a cada conjunto por separado (CP y CF).

La Fig. 4.5 resume las distribuciones de las frecuencias anuales medias de APPs para las tres bases de datos en estudio (reanálisis, HadCM3-CP y HadCM3-CF). En la figura se aprecia una buena representación por parte del modelo en la distribución espacial del fenómeno, coherente con lo observado en los mapas que caracterizan una parte de la variabilidad intraestacional de Z_{500}' (Fig. 4.3). Sin embargo, también es evidente la subestimación que presentan las APPs del modelo frente a los resultados de reanálisis en ambos hemisferios. En el mapa promedio de la línea base de HadCM3 (CP) se registra un máximo de 40 días de APPs por año sobre el Pacífico austral, mientras que durante el mismo periodo la frecuencia de APPs de reanálisis muestran valores por sobre los 60 días año⁻¹ en el mismo sector. Por su parte, en las proyecciones hacia fines del siglo XXI se observa un aumento generalizado de APPs en todos los sectores del globo en donde se manifiesta el fenómeno.

Los rasgos recién descritos se aprecian claramente en los regímenes anuales de la frecuencia media de APPs representativos de las regiones típicamente afectadas por el fenómeno (Fig. 4.6). El número promedio de días al mes con APPs muestra, por un lado, una subestimación del fenómeno durante todo el año por parte del modelo respecto al reanálisis y, por otro, un claro aumento entre datos proyectados del fenómeno (CF) y los de clima presente (CP), lo que también es evidente en todos los meses de año. Si bien el ciclo anual de APPs –de mayor actividad invernal– se reproduce en grandes rasgos en los dos grupos de datos del modelo y en ambos hemisferios, se aprecia a su vez un sesgo estacional entre ellos. Entre un periodo y otro, el Hemisferio Sur muestra diferencias más acentuadas durante los meses de primavera y verano austral y moderada en otoño, lo que se traduce en un acercamiento entre los extremos del ciclo en los datos proyectados (el mínimo se desplaza hacia el otoño). En el Hemisferio Norte se insinúa algo similar, pero con un leve desplazamiento en ambos extremos.

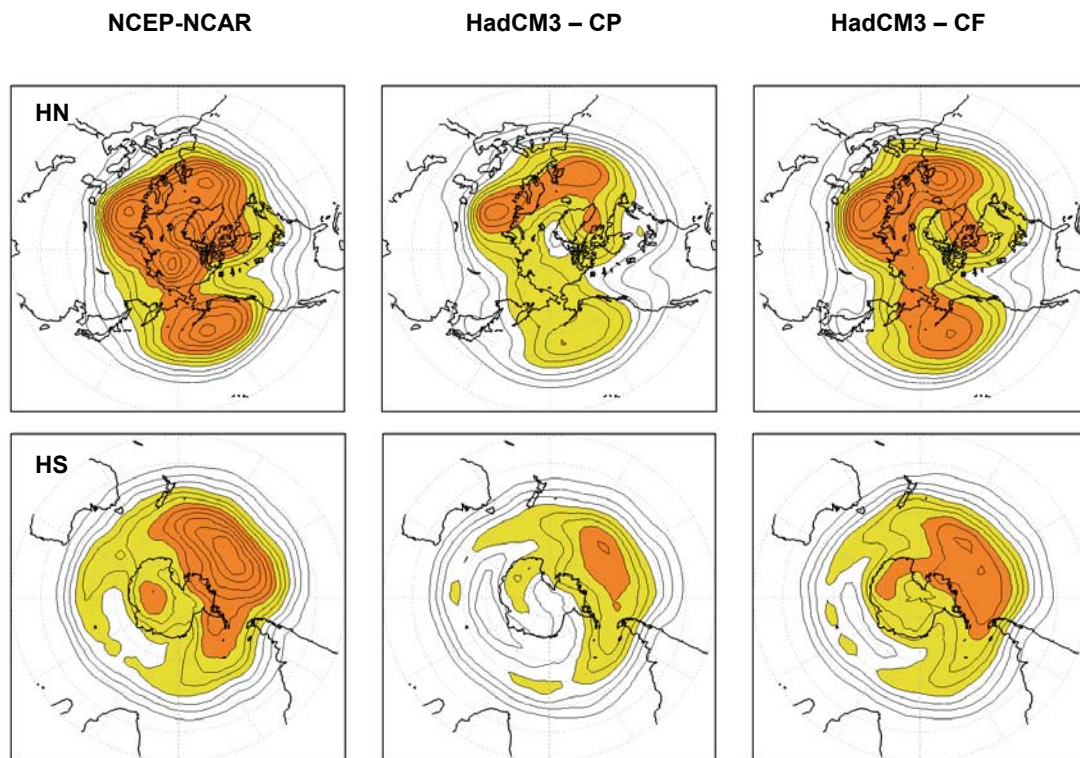


Fig. 4.5 Frecuencias anuales medias de días-APP (días año⁻¹) para el Hemisferio Norte (paneles superiores) y Sur (inferiores). A la izquierda, climatología para el periodo 1960-1989 obtenidos de reanálisis. Al centro y la derecha, corrida de control de HadCM3 (1960-1989, CP) y de fines del siglo XXI (2070-2099, CF) proyectados bajo el escenario de emisiones A2. Contornos cada 5 días año⁻¹. Colores indican contornos de 20 y 35 días año⁻¹.

Los rasgos estacionales sugeridos en los ciclos anuales de la Fig. 4.6 se revelan más claramente en la distribución espacial de las diferencias entre los regímenes de APPs de clima futuro y presente (CF-CP, Fig. 4.7). En el Hemisferio Norte los cambios más significativos se concentran en el primer semestre del año, donde destaca un significativo aumento de APPs sobre el Pacífico septentrional durante el invierno boreal. Se observa en este caso una extensa región que muestra más de 6 días de diferencia entre ambos periodos durante los tres meses de la estación (DEF), sector que en la línea base del modelo registra no más de 30 días con APPs anuales en promedio. Curiosamente, en este mismo sector se observa una leve disminución de APPs durante la temporada opuesta (JJA). Resalta también en este hemisferio el aumento del fenómeno entre Rusia y el Atlántico norte durante la primavera.

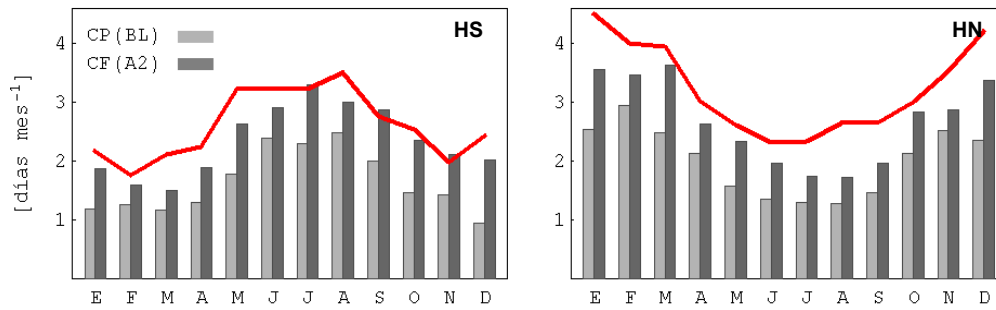


Fig. 4.6 Frecuencia mensual media de APPs para el Hemisferio Sur y Norte. Valores promediados sobre latitudes mayores a 40°. Grises claros y oscuros corresponden a los datos de HadCM3 de clima presente y futuro respectivamente. Curva gruesa representa los valores obtenidos de reanálisis para el periodo 1960-1989.

En el Hemisferio Sur, los aumentos de APPs más importantes proyectados por el modelo se observan sobre la Antártica y en su entorno durante casi todo el año, y aparecen particularmente intensos durante la primavera austral. En este sector, entre septiembre y octubre, se registran en promedio entre 4 y 6 días más de APPs en los datos de fines del siglo XXI, valor cercano al tiempo de APPs registrado durante la misma temporada del periodo de clima presente del modelo (no se muestra); es decir, un aumento de un 100% aproximadamente. La región comprendida entre el extremo austral de Sudamérica, la península Antártica y el mar de Bellinghausen, muestra un significativo aumento de APPs que es particularmente intenso en otoño (de un ~ 50%), moderado en primavera y verano y prácticamente nulo durante el invierno.

Diferencias (CF-CP) entre la frecuencia estacional media de APPs en HadCM3

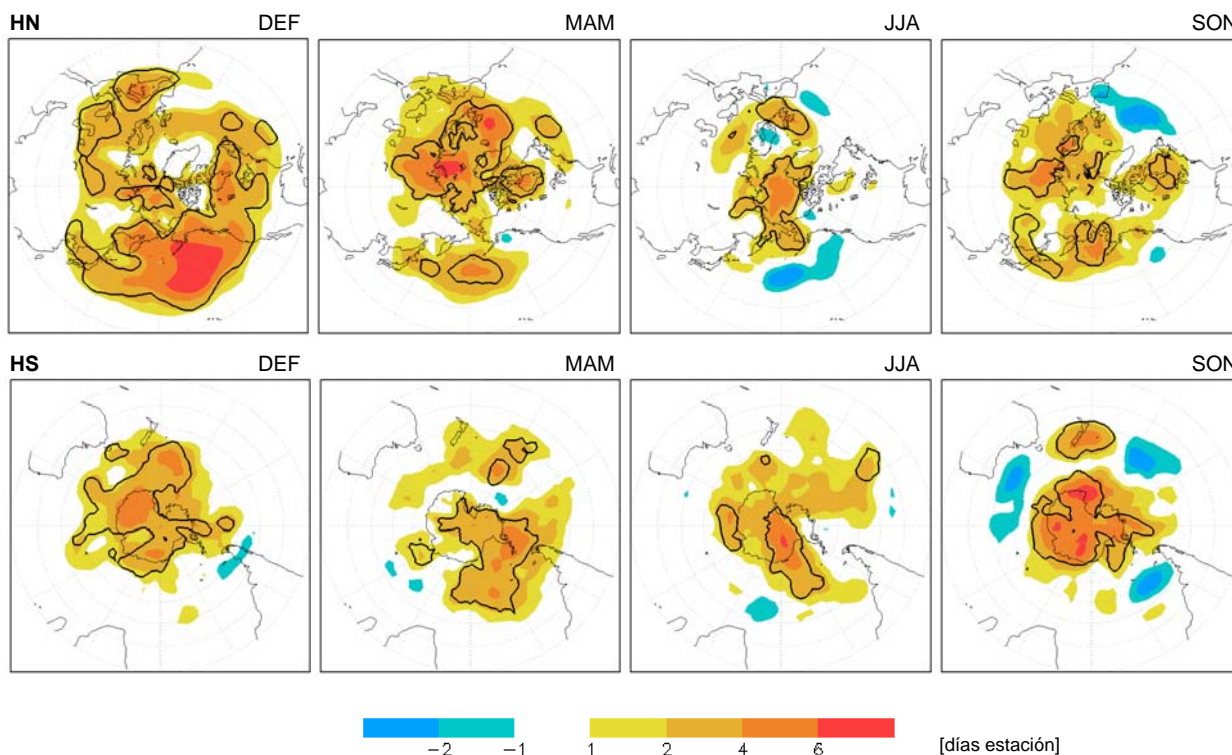


Fig. 4.7 Diferencias entre las frecuencias medias estacionales de APPs de fines del siglo XXI (CF, 2070-2099) y siglo XX (CP, 1960-1989). Contornos gruesos confinan áreas con diferencias significativamente distintas de cero, con un nivel de confianza estadística superior al 95%.

Grupos de APP en el Hemisferio Sur

Para evaluar los cambios en los rasgos espaciales comunes de APPs proyectados por HadCM3, se repitió el mismo ejercicio de agrupamiento descrito en el segundo capítulo, pero con los campos diarios de las APPs obtenidos del modelo. Luego de una primera etapa en la búsqueda de patrones, realizada a partir de matrices anuales de similitud (ver anexo A para la descripción detallada del método), se realizaron tres experimentos, donde se sometieron a un *clustering* final los grupos del modelo con sus dos periodos tratados en forma independiente y en conjunto. En un tercer experimento, a partir de las tres bases en estudio, se buscaron patrones comunes de APPs asociados a la variabilidad interna de HadCM3 y del reanálisis (NCEP-NCAR).

Si bien los datos de HadCM3 muestran una menor actividad de APPs en sus frecuencias anuales medias respecto a los resultados de reanálisis, el ejercicio de *clustering* sobre los campos del modelo considera en su primera etapa un promedio cercano al 80% de los 360 días del año, cifra similar a la obtenida con el reanálisis (83% en el Hemisferio Sur). Los grupos de APPs obtenidos para las dos bases del modelo tratadas en forma independiente (primer experimento, no se muestra) tienen configuraciones similares a los descritos en el segundo capítulo, con patrones de APPs distribuidos principalmente sobre el Pacífico sur y con algunos compuestos reproduciendo en forma casi exacta los modos del reanálisis observados en la Fig. 2.9.

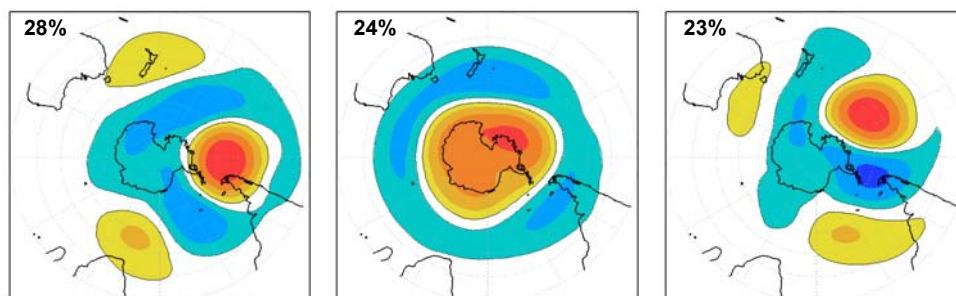


Fig. 4.8 Compuestos de Z_{500}' asociados a los 3 grupos-APPs más abundantes y comunes respecto a la base de datos completa del modelo HadCM3 (CP y CF).

La Fig. 4.8 expone los compuestos de Z_{500} de los tres grupos de APPs más abundantes comunes en los datos de HadCM3, resultado del análisis efectuado sobre la base completa del modelo (60 años, CP y CF; segundo experimento). Se reconocen en estos grupos una estructura anular y dos modos tipo PSA, semejantes a los patrones de los grupos 2, 3 y 6 de la Fig. 2.9. El modo anular (al centro de la Fig. 4.6) es, en este caso, más solidario al compuesto de la AAO (Fig. 2.10), ya que considera la zona de fuerte actividad en el extremo austral del Pacífico, representada en forma independiente por el grupo-PPA 4 del reanálisis. Los compuestos de Z_{500}' asociados a los otros dos modos de APPs ilustrados en la Fig. 4.8, a la derecha e izquierda de ésta, son casi idénticos a los compuestos de los grupos de APPs del reanálisis 3 y 6 respectivamente (Fig. 2.9). Sin embargo, sus representaciones son distintas respecto al total de días de cada conjunto: el grupo-APP 6 del reanálisis, cuya estructura se identifica con el modo de circulación PSA-2 de diversos análisis (e.g., Mo y Nogués-Paegle 2001), es el menos frecuente dentro de su base (NCEP-NCAR), mientras que su homólogo en

HadCM3 es el de mayor representación. Esto puede ocurrir tanto por una diferencia entre la manifestación del modo dentro la variabilidad interna de HadCM3 y el reanálisis NCEP-NCAR, como por una diferencia en la presencia de este modo entre los dos periodos del modelo.

Para evaluar los cambios asociados a estos patrones de APPs entre los dos periodos del modelo y comparar su representación respecto a lo que se observa en datos de reanálisis, se repitió el ejercicio de *clustering* mezclando las tres bases de datos (tercer experimento). A partir de este análisis se obtuvieron los seis grupos comunes que se resumen en la Fig. 4.9. Se forzó este número final de *clusters* para tener cifras comparativas con los resultados descritos en el segundo capítulo.

Como se aprecia en el análisis de agrupamiento descrito anteriormente, en la Fig. 4.9 se repiten las estructuras de APPs observadas en los datos de reanálisis tratados independientemente y, salvo el caso de menor representación (grupo 6 de la figura) –con anomalías de circulación sobre el extremo occidental del Pacífico sur–, se observan estructuras paralelas entre los grupos de ambos análisis. Esto se aprecia entre los compuestos de los *clusters* 1, 3, 4 y 5 de la Fig. 4.9, y entre los compuestos 3, 5, 1 y 6 de la Fig. 2.9, respectivamente. El modo anular (grupo 2) es, como en el análisis realizado solamente sobre los datos del modelo (exp. 2), más solidario al compuesto de la AAO en su distribución espacial, y aunque menos evidente que su homólogo de la Fig. 4.8, reúne tanto a las APPs situadas en torno al Polo Sur como al grupo que ocurre sobre el extremo austral de Pacífico. Esto aparece coherente con la inexistencia en este análisis de un grupo independiente que sea solidario al grupo 4 del reanálisis (Fig. 2.9).

Las contribuciones en cada base de datos de los grupos de la Fig. 4.9 se ilustran en la Fig. 4.10. Estos valores corresponden a las fracciones de la frecuencia media de cada modo APP relativa a cada periodo. Sin considerar el último caso (6), que tiene una baja representación en todas las bases, se distinguen en las magnitudes asociadas a los grupos 2 y 3 diferencias significativas entre el periodo de control del modelo y el reanálisis. El modo anular (grupo 2) tiene una mayor contribución en el registro del reanálisis, alcanzando más del 20% del total de días considerados en su periodo (48 años) y cercano al 15% respecto al periodo de control de HadCM3. Con magnitudes equivalentes, el grupo 3 muestra una situación inversa.

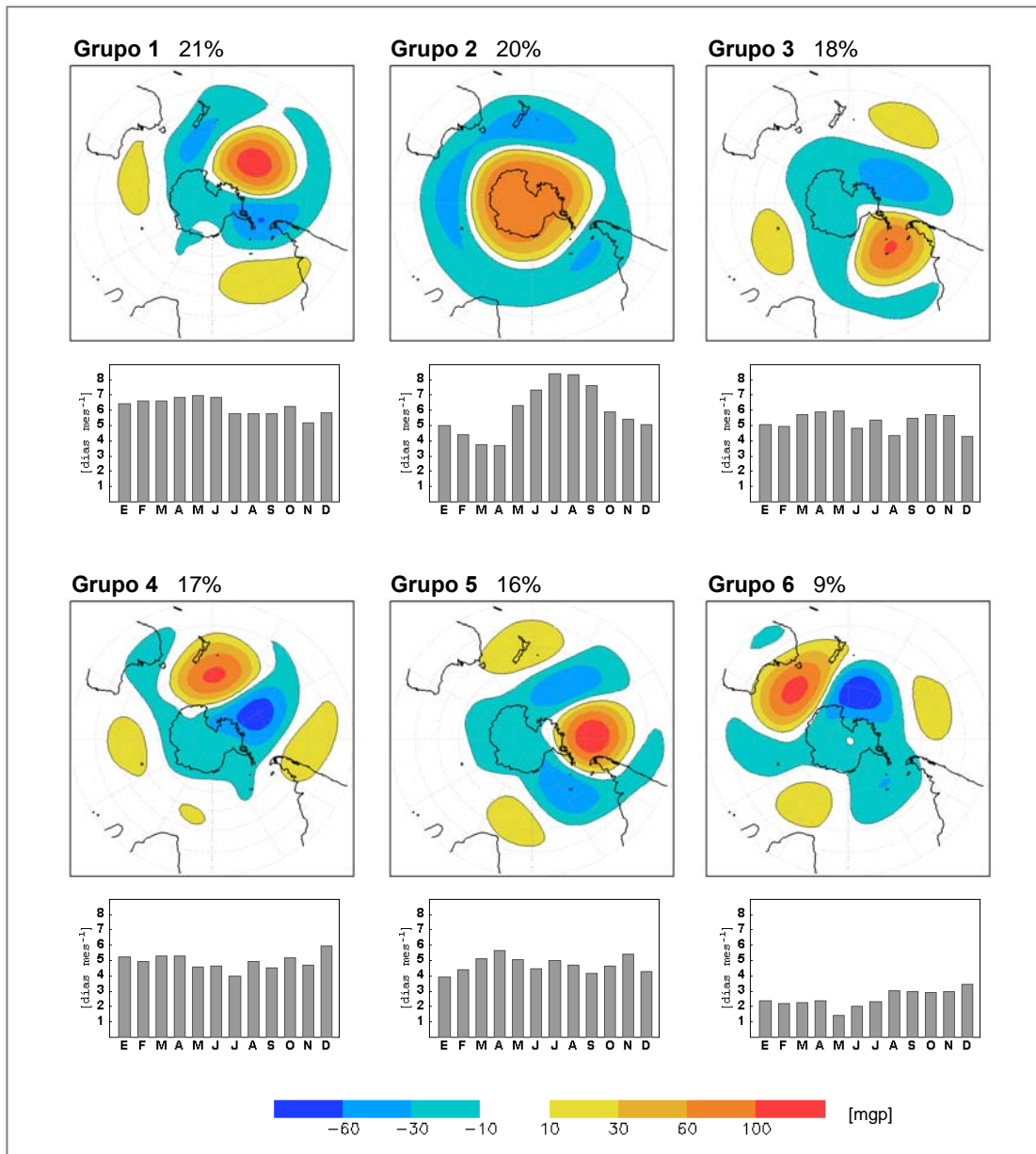


Fig. 4.9 Compuestos de $Z_{500'}$ asociados a 6 patrones (grupos) comunes de APPs identificados para la base completa de 48 años de reanálisis y 60 años del modelo HadCM3. Ciclos anuales se ilustran en la parte inferior de cada panel.

Coherente con lo que se aprecia en la Fig. 4.7, las contribuciones de los modos de APPs durante el periodo de fines del siglo XXI presentan aumentos significativos respecto al periodo de control en los grupos 2 y 5. Respecto a este último caso, se puede entonces concluir que, gracias a este aumento, el grupo muestra una fuerte representación en el análisis hecho en forma independiente sobre los datos del modelo (Fig. 4.8), y no es producto de una diferencia entre su presencia en el reanálisis y HadCM3. La significativa disminución observada en el

régimen proyectado del grupo-APP 1, aparece coherente no por la posición de su zona de alta actividad sobre el Pacífico sur-central, sino por su estructura inversa similar a la del grupo 5, caracterizada por anomalías negativas entre el extremo austral de Sudamérica y la península Antártica.

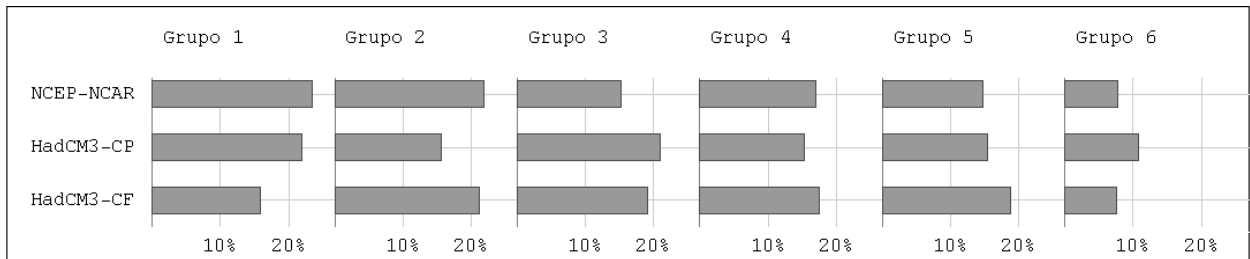


Fig. 4.10 Contribución relativa a cada base datos (reanálisis, HadCM3-CP, HadCM3-CF) de la frecuencia de APPs asociada a cada grupo del análisis ilustrado en la Fig. 4.9.

4.4 CSTs

Registro de ciclones extratropicales (CETs)

Para el registro de ciclones extratropicales en los campos del modelo se aplicó el mismo esquema descrito en el capítulo 3. Para ello fue necesario un ajuste previo de los campos diarios de Z_{500} , cuya resolución original es menor a la utilizada en la búsqueda de mínimos locales (equivalente a la grilla del reanálisis NCEP-NCAR). Esto se hizo mediante campos continuos interpolados en la grilla original, que posteriormente fueron evaluados en una grilla de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ latitud-longitud. De la misma forma descrita anteriormente, la densidad de ciclones fue calculada con ajustes latitudinales en celdas de 1×1 puntos de grilla y expresadas en número de casos por superficies de 10^6 km^2 .

Densidad de CETs [#Cs $(10^3 \text{ km})^2 \text{ año}^{-1}$]

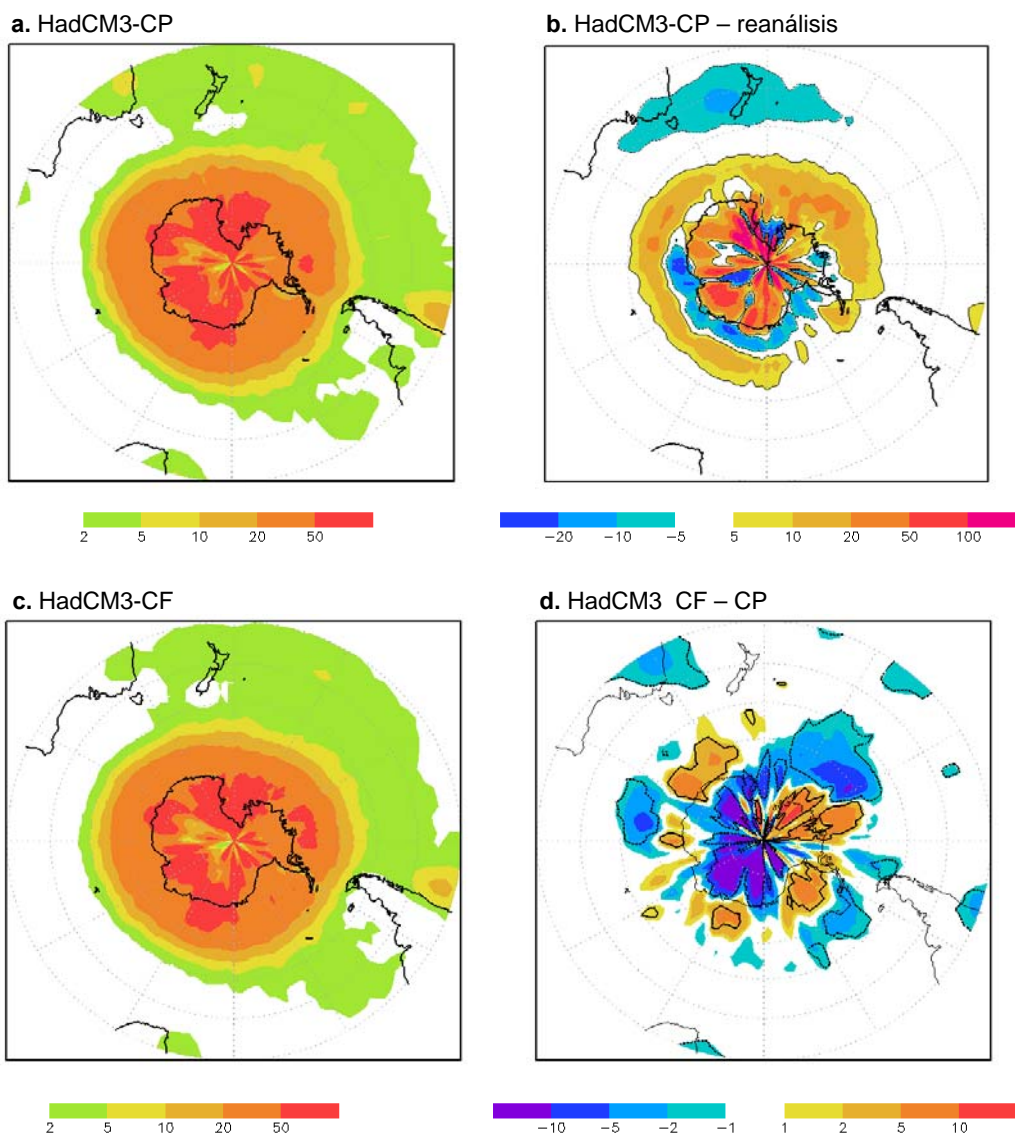


Fig. 4.11 Densidades anuales medias de ciclones extratropicales (CETs).

- a. Registro correspondiente al periodo de control del modelo HadCM3 (CP, 1960-1989).
- b. Diferencia entre el modelo (CP) y el reanálisis durante el mismo periodo (b).
- c. CETs en clima proyectado del modelo (CF, 2070-2099).
- d. Diferencia entre CF y CP. Contornos gruesos confinan áreas con valores significativamente distintos de 0 con un nivel de confianza superior al 95%.

La Fig. 4.11 resume el registro de CETs asociado a los datos de HadCM3, y compara las densidades de ciclones entre sus dos periodos, por un lado, y entre su línea base y el resultado sobre el reanálisis, por otro. En una primera aproximación, los mapas del modelo muestran una distribución similar respecto a lo observado en el reanálisis, con una concentración de ciclones confinada hacia latitudes altas del Hemisferio Sur. En magnitud, la corrida de control del modelo

(HadCM3-CP) sobreestima en gran parte del Hemisferio la densidad de CETs (Fig. 4.11b). Esta diferencia se observa particularmente en una franja zonal cercana a 60°S y sobre la Antártica. Un patrón contrario se insinúa en el semi-anillo situado entre estas dos regiones y entre las longitudes 90°W y 90°E. La mayor actividad ciclónica por parte del modelo aparece coherente con la también sobreestimada variabilidad de alta frecuencia (Fig. 4.2). Destaca también la menor densidad de ciclones en el registro del modelo en las regiones subtropicales del Pacífico occidental, sector donde no aparece el máximo local asociado al régimen de Bajas Segregadas, evidente en los mapas de reanálisis (Fig. 3.2).

Aunque a primera vista el modelo muestre una distribución media de CETs bastante similar en ambos periodos (CP y CF), la diferencia entre éstos revela valores significativos (Fig. 4.11d). Estos cambios están dominados por valores negativos sobre la Antártica y en ciertas regiones en torno a 60°S. Entre estos dos sectores se aprecian diferencias más bien positivas. Este patrón, apreciable en la distribución latitudinal de diferencias de ciclones (Fig. 4.12), junto al que se observa en la diferencias del régimen de alta frecuencia (Fig. 4.2c), concuerdan con antecedentes que proyectan hacia el siglo XXI – bajo el mismo escenario considerado acá– un desplazamiento hacia el polo del anillo de máxima variabilidad atmosférica (e.g, Yin 2005).

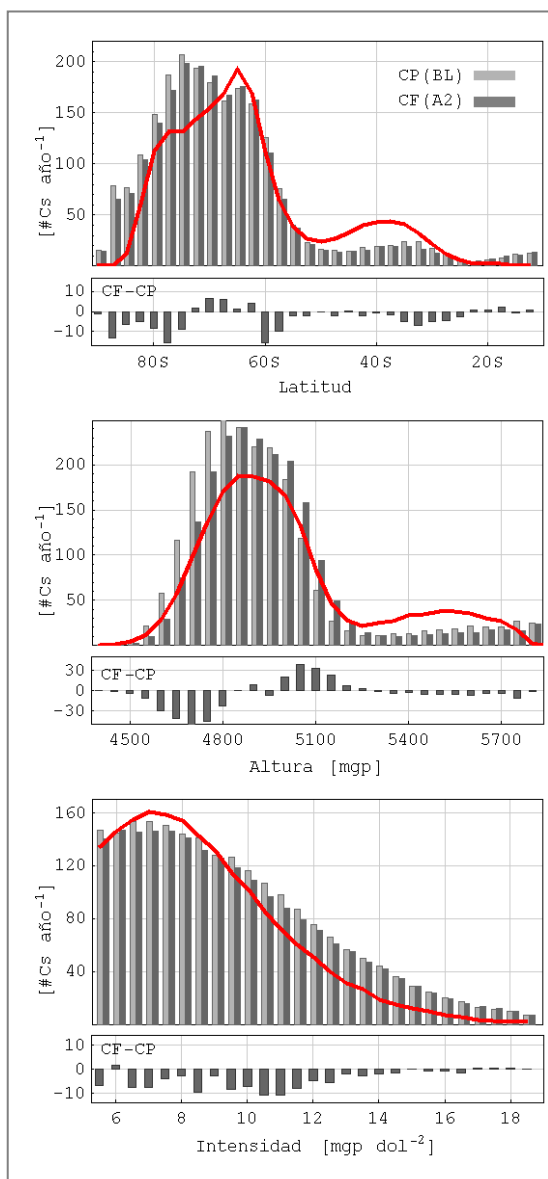


Fig. 4.12 Distribuciones del número anual promedio de CETs según latitud (a), altura geopotencial (b) e Intensidad (c) de sus centros. Grises oscuros y claros para el registro proyectado (CF) y de tiempo presente (CP) del modelo HadCM3. Diferencias en subpaneles. Curva gruesa indica valores asociados al registro en reanálisis.

El registro del grupo subtropical de ciclones (CSTs) se hizo con la misma técnica descrita en el capítulo 3, es decir, mediante una estimación de *jet* de máximo flujo. Para esto se construyeron mapas de viento geostrófico calculados a partir de los datos de Z_{500} del modelo. Como se aprecia en la Fig. 4.11, las distribuciones del subgrupo CSTs en el modelo no son muy solidarias a la climatología del reanálisis, cuyas máximas densidades al oeste del Pacífico aparecen claramente subestimadas.

Dado el sesgo en la concentración de CSTs en el sector occidental del Pacífico, la distribución espacial de densidad de ciclones observada en las corridas del modelo muestra un rasgo más uniforme en la franja zonal situada en torno a 35°S (Fig. 4.13). Por su parte, se reproducen los máximos observados en los resultados del reanálisis sobre las costas occidentales de África y Sudamérica. En este último caso, como se aprecia claramente en la diferencia entre ambas bases (modelo y reanálisis), el máximo aparece desplazado unos pocos grados hacia el norte (Fig. 4.13b). Se observa también en los mapas asociados al modelo, una segunda región de altas densidades de CSTs en latitudes menores, rasgo particularmente claro sobre la Polinesia. Estas zonas representan la concentración de mínimos con baja curvatura presentes en el *plateau* ecuatorial del campo de Z_{500} , casos que no tienen relación con las BSs discutidas acá.

La proyección hacia fines de siglo muestra una disminución intermitente en la frecuencia de CSTs en latitudes cercanas a 30°S y se insinúan aumentos débiles y localizados en el régimen de latitudes mayores. Dentro de este patrón poco distintivo, destaca la significativa disminución de ciclones en torno a los sectores continentales, al sur oeste de Sudamérica y África, y al sur este de Australia.

Si bien la identificación de los CSTs depende directamente de la posición e intensidad del *jet* de máximo flujo, la disminución de ciclones proyectada por el modelo sobre el límite sur-occidental de Sudamérica no parece depender directamente de algún cambio en el régimen de los "Oestes". La Fig. 4.14 muestra el detalle para el verano y el invierno austral de las diferencias entre las dos bases del modelo de los CSTs en la región del Pacífico sur-oriental. La disminución general de ciclones observada sobre la costa del norte de Chile se manifiesta durante todo el año con similar intensidad (no se muestran los mapas de otoño y primavera). En la figura se ilustran también las diferencias entre ambos periodos (CP y CF) de los campos medios de viento geostrófico. Como se puede deducir de la figura homóloga, pero para los campos de Z_{500} (Fig. 4.1), el régimen de circulación proyectado por HadCM3 sobre esta región muestra cambios altamente dependientes de la temporada del año, con un fuerte aumento de la

magnitud del viento sobre las regiones del norte de Chile durante el invierno y la primavera austral, y una disminución de menor intensidad sobre el centro y sur del país durante el verano y el otoño.

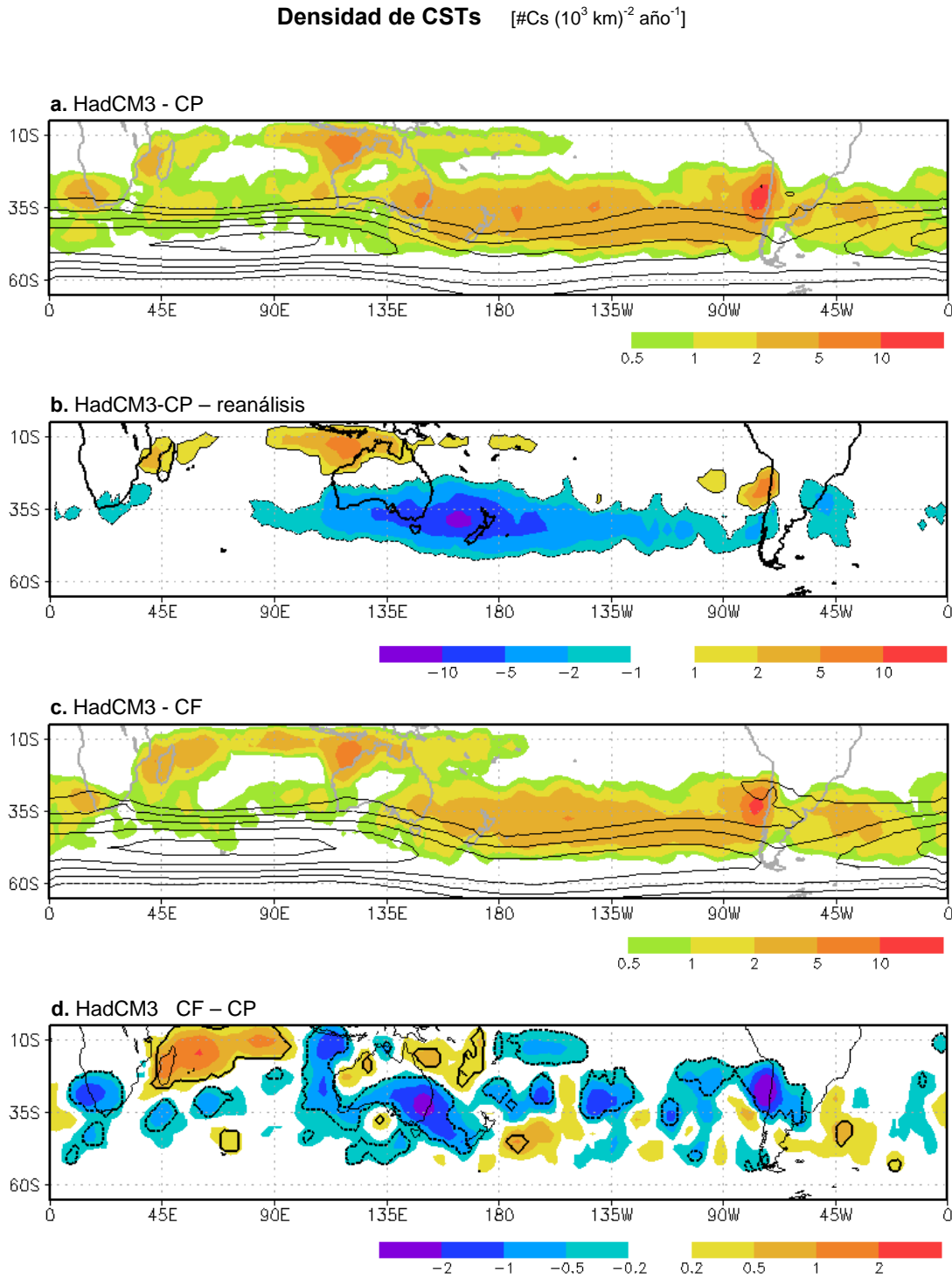


Fig. 4.13 Igual que Fig. 4.11, pero para CSTs. Paneles (a) y (c) ilustran también el viento geostrófico medio asociado a cada periodo (isotacas cada 2 m s^{-1} trazadas a partir de 16 m s^{-1}).

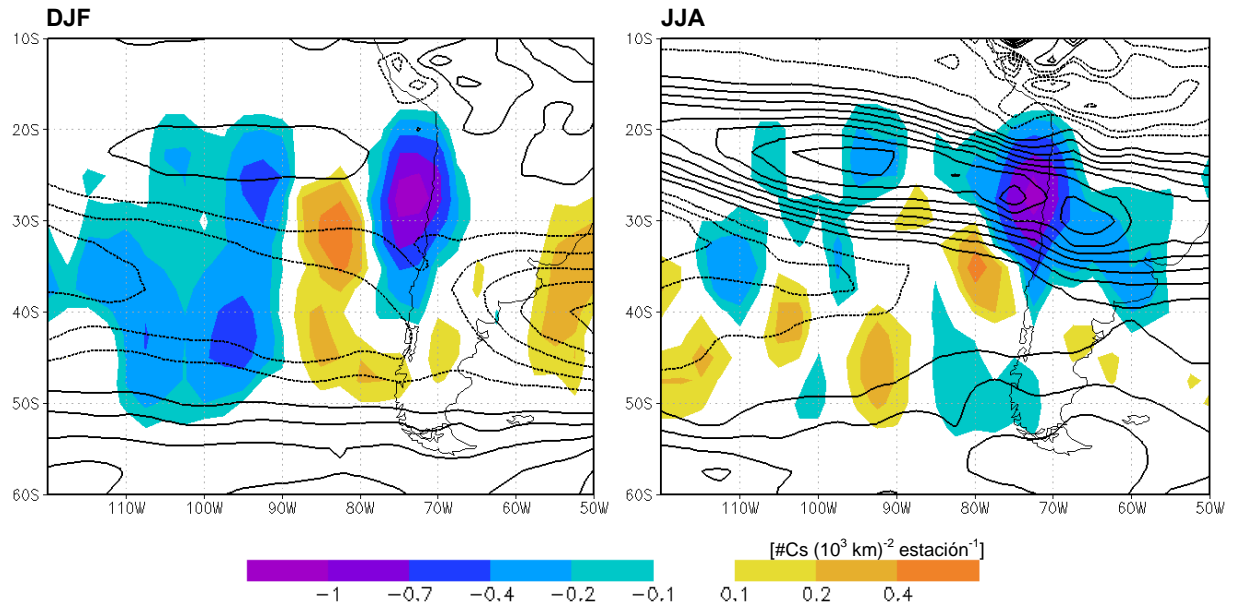


Fig. 4.14 Detalle para la región del Pacífico oriental de la diferencia entre la densidad estacional media de CSTs de los registros de clima futuro (CF) y presente (CP) del modelo HadCM3. Verano e invierno austral en paneles de la izquierda y derecha respectivamente. Contornos indican la diferencia del viento geostrófico medio entre cada periodo. Isotacas cada 0.1 m s^{-1} . Negativos en líneas punteadas (se omite el contorno 0).

5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este informe se ha descrito un estudio climatológico de anomalías positivas persistentes (APPs) y ciclones extratropicales (CETs y CSTs) en la tropósfera media (500 hPa) durante el periodo 1958-2005. Con particular énfasis en el Hemisferio Sur, se han analizado también los lazos entre estos fenómenos en el contexto de la variabilidad del régimen pluviométrico de Chile y se evaluaron sus estados medios en un clima proyectado hacia fines del siglo XXI. A continuación se discuten los resultados principales y se puntualizan las conclusiones que se derivan en cada tema tratado.

APPs y anomalías de precipitación en Chile

Las APPs descritas en el segundo capítulo, definidas como anomalías en Z_{500} persistentes por más de cuatro días, muestran un régimen promedio que es coherente con los patrones que definen la variabilidad intraestacional de latitudes altas. Particularmente en el Hemisferio Sur, los patrones espaciales de las APPs son representativos de los rasgos principales que caracterizan la variabilidad de baja frecuencia en la circulación del Hemisferio (i.e., modo anular/AAO y modos PSA 1 y 2). Las frecuencias asociadas a estos patrones o grupos-APPs muestran una significativa modulación sobre las series pluviométricas de distintas estaciones situadas en el centro y sur de Chile. En este análisis se reconocen algunos rasgos bien documentados respecto al régimen de precipitación del país asociado a patrones de circulación sobre el Pacífico austral (e.g., Montecinos y Aceituno 2003), y se revelan otros rasgos no tratados anteriormente. Estos resultados se resumen en las figuras 2.18 y 2.19, de las que se concluye que:

- Durante el otoño austral (marzo-mayo), el régimen de precipitación en la zona centro-sur de Chile (i.e., Santiago, Chillán, Concepción, Valdivia y P. Montt) tiene una coherencia significativa con la frecuencia de APPs que ocurren en torno a 120°W sobre el extremo austral del océano Pacífico (Mar de Amundsen). Durante la primavera (septiembre-noviembre), el mismo patrón de APPs modula positivamente el régimen de la zona sur del país (P. Montt, P. Aysén, Coyhaique, Balmaceda).

- Las APPs que se manifiestan sobre el sector oriental de Pacífico austral muestran una relación con la precipitación de Chile altamente sensible a la estricta posición de cada episodio y a la temporada del año en que éstas ocurren. Cualitativamente, para eventos de APPs en torno a 60°S, se concluye que este patrón genera anomalías positivas de precipitación en la zona central del país (Santiago, Chillán y Concepción) sólo durante la primavera austral y anomalías negativas en el sur del país durante todo el año.
- El modo anular de APPs tiene una significativa coherencia con el régimen de precipitación de la zona centro-sur de Chile durante los meses del otoño austral.

Respecto a lo comentado en el último punto, cabe destacar que la relación entre el modo-APP de altas latitudes y la precipitación en regiones subtropicales y medias del Hemisferio Sur, debe darse mediante mecanismos de distinta naturaleza a los que se describen tradicionalmente para los bloqueos (APPs) de latitudes menores. Como se comenta en el segundo capítulo, el grupo anular de APPs (Fig. 2.9, grupo 2) reúne las perturbaciones que ocurren exclusivamente en torno al Polo Sur generando, por lo tanto, anomalías de circulación en latitudes medias distintas a las producidas por las APPs centradas en torno a 70°S o 60°S (bloqueos comunes). El patrón de la AAO, aparte de la componente simétrica, considera perturbaciones en latitudes menores, como lo manifiesta su compuesto en Z_{500} con una clara extensión hacia el Pacífico (Fig. 2.10). Este rasgo resulta, de hecho, en una importante modulación de este índice sobre la precipitación en la zona centro-sur de Chile durante el otoño y durante los últimos tres meses del año (Fig. 5.1). La señal observada con el segundo grupo-APP en la Fig. 2.19 representa –por lo menos– una gran parte del impacto de la componente simétrica del modo anular sobre la precipitación en Chile. Esta relación, aparte de ser un aspecto poco descrito en el régimen climático del país, puede constituir una variable importante para la predicción del tiempo a escala estacional.

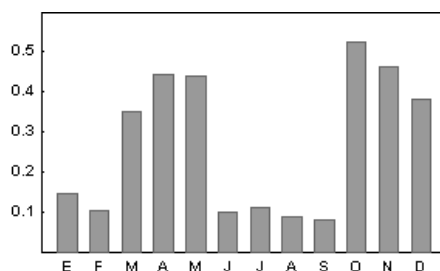


Fig. 5.1 Coeficientes de correlación (interanual) entre series mensuales del índice de la Oscilación Antártica (AAO) y precipitación en el centro-sur de Chile (Chillán, Concepción, Valdivia y Pto.Montt).

APPs y CSTs

Dentro de los objetivos específicos de este estudio se planteó evaluar un posible vínculo entre el régimen de bloqueos atmosféricos en el Hemisferio Sur –caracterizados acá como APPs en latitudes medias-altas– y la ocurrencia de Bajas Segregadas (BSs) en latitudes subtropicales. En el tercer capítulo se intentó, a partir de un registro preliminar de ciclones extratropicales en 500 hPa (CETs), identificar mediante un esquema objetivo un subgrupo de estos ciclones coherente con observaciones anteriores de BSs (Fuenzalida et al. 2005, F05). El conjunto resultante (CSTs) muestra una densidad media cuya distribución espacial es solidaria a la de BSs, pero dado el tamaño del registro, ésta debe incluir un grupo no despreciable de casos que no satisfacen la condición de baja segregada, tal como éstas se definen en F05.

En forma comparativa, se realizó un análisis de compuestos asociada a la frecuencia de APPs de los grupos descritos en el segundo capítulo, que incluyó tanto a la base de CSTs, como al registro de CETs, además de otra base externa de ciclones en superficie. Esta última se incorporó para evaluar, por un lado, su coherencia con los sistemas en altura (CETs), y por otro lado, los mecanismos en el régimen superficial que explican el aumento de tormentas al norte de los bloqueos desarrollados en el Pacífico austral. El resultado de este análisis se resume en la Fig. 3.8, de la que se destaca lo siguiente:

- Todos los patrones de APPs muestran una clara influencia en el régimen de CETs, y explican en algunos casos más de un 25% de la presencia de ciclones en regiones situadas al norte de las perturbaciones.
- El régimen de CSTs costa afuera de Chile central se explica aproximadamente en un 15% por la frecuencia de APPs que ocurren en el sur-este del Pacífico (grupo 6). A diferencia de los compuestos asociados a los otros modos de APPs, la baja latitud de esta señal de CSTs y el compuesto asociado de circulación permiten identificar a las depresiones de este grupo como Bajas Segregadas.
- Las APPs que se manifiestan en el sector oriental del Pacífico austral muestran, hacia el norte de las perturbaciones, una débil (~10%), pero reconocible señal positiva de ciclones en superficie.

Como resultado anexo, cabe destacar la fuerte tendencia positiva observada en la densidad anual de ciclones en latitudes media-altas (en torno a 70°S), caracterizada por un

fuerte aumento de su régimen durante la última década analizada (1995-2005). En el registro de CSTs se aprecia también, una clara tendencia positiva durante todo el periodo estudiado.

Proyecciones

Respecto a la proyecciones de la atmósfera simuladas numéricamente hacia fines del siglo XXI, se tiene cierta certeza de que la circulación de gran escala asociada al mismo modelo usado en este trabajo (HadCM3) genera una disminución de la precipitación en la zona central y sur de Chile bajo los mismos escenarios acá descritos (Informe para CONAMA-Chile, DGF 2007).

Como se concluye en la primera parte, las APPs que se manifiestan sobre el Pacífico austral modulan una parte importante del régimen de la precipitación en Chile, y explican en promedio, hasta un 25% de la variabilidad de las lluvias observada interanualmente en cierta región. Aunque son importantes, estas cifras no permiten caracterizar directamente los cambios proyectados en la precipitación en base a los cambios en el régimen de bloqueos. La evaluación de los impactos de las APPs sobre el régimen pluviométrico de Chile radica en la comprensión de su variabilidad intraestacional. En ese sentido resulta fundamental hacer un estudio más completo en base a variables propias de los aspectos temporales (periodos secos extensos, tormentas extremas, ciclos anuales, etc).

Los análisis descritos en cuarto capítulo muestran cambios significativos en el régimen de APPs. Si bien el modelo subestima la frecuencia media del fenómeno como en un 30% aproximadamente respecto a lo observado en el reanálisis (NCEP-NCAR), la buena representación espacial y la reproducción de sus modos principales (Fig. 4.8), permiten concluir que el aumento promedio del régimen de APPs es intrínseco a los cambios de gran escala expuestos por HadCM3 en el estado medio de Z_{500} y en su variabilidad (figuras 4.1 a 4.5). Igualmente, cabe destacar la dependencia estacional de estos cambios y la manifestación de éstos en algunos de los modos que más afectan la región austral de Sudamérica, como el aumento de APPs sobre el sector oriental del Océano Pacífico sur (grupo 5, Fig. 4.10), cuyo idéntico patrón en el clima presente revela principalmente impactos negativos en el régimen del centro y sur de Chile.

Las proyecciones de múltiples modelos globales hacia fines del siglo XXI muestran un cambio en Z_{500} con geometría anular sobre el Hemisferio Sur, lo que se manifiesta en un claro

aumento en la polaridad de la AAO (i.e., mayores diferencias de presión entre latitudes medias y altas; Fyfe et al. 1999). En este análisis, se observa un aumento en la actividad del grupo zonal-simétrico de APPs hacia un clima futuro. Esto no es inconsistente con los cambios proyectados del índice de la AAO, puesto que los modos de APPs fueron calculados a partir de anomalías de Z_{500} calculadas independientemente en cada periodo; es decir, en estos modos no se manifiestan directamente los cambios en el campo promedio de Z_{500} (Fig. 4.1c). El aumento de este tipo de APPs estaría, por lo tanto, insinuando una actividad más intensa del SAM en un clima proyectado bajo los escenarios escogidos.

El modelo no muestra un claro patrón de diferencias entre las densidades medias de CSTs de ambos periodos (CF-CP). La representación de este tipo de ciclones tampoco es del todo solidaria en su distribución espacial por parte de HadCM3 respecto a lo observado en el reanálisis, por lo que, a partir de estos resultados no se puede concluir algo sólido respecto a cambios en el régimen general de CSTs. Localmente, la disminuciones significativas en la densidad de CETs al oeste de la cordillera de Los Andes y al sur-este de Australia en el clima proyectado (CF-CP), pueden estar representando una señal coherente con los cambios en régimen de la circulación en zonas de orografía compleja.

BIBLIOGRAFÍA

Aceituno, P., 1988: On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface Climate. *Mon. Weather Rev.*, **116**, 505–524.

Ambaum, M. H. P., B. J. Hoskins, and D. B. Stephenson, 2001: North Atlantic Oscillation or Arctic Oscillation? *J. Climate*, **14**, 3495-3507.

Carleton A. M., 2003: Atmospheric teleconnections involving the Southern Ocean. *J. Geophys. Res.*, **108**, DOI: 10.1029/2000JC000379.

Collins, M., S. F. B. Tett, and C. Cooper, 2001: The internal climate variability of HadCM3, a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, **17**, 61-81.

Departamento de Geofísica (DGF), U. de Chile, 2007: Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI. *Informe para la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA, Chile)*.

Diaz, A., and P. Aceituno, 2003: Atmospheric Circulation Anomalies during Episodes of Enhanced and Reduced Convective Cloudiness over Uruguay. *J. Climate*, **16**, 3171-3185.

Dole, R. M., and N. D. Gordon, 1983: Persistent anomalies of the extratropical Northern Hemisphere wintertime circulation: Geographical distribution and regional persistent characteristics. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 1567–1586.

Fuenzalida, H., 1982: A country of extreme climate. *Chile: Essence and Evolution* (in Spanish), H. García, Ed., Instituto de Estudios Regionales de la Universidad de Chile, 27–35.

—, **R. Sanchez, and R. Garreaud, 2005:** A climatology of cutoff lows in the Southern Hemisphere. *J. Geophys. Res.*, **110**, DOI: 10.1029/2005JD005934.

Fyfe, J. C., G. J. Boer, and G. M. Flato, 1999: The Arctic and Antarctic oscillations and their projected changes under global warming. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 1601–1604.

Garreaud, R. D., and D. Battisti, 1999: Inter-annual (ENSO) and inter-decadal (ENSO-like) variability of the Southern Hemisphere tropospheric circulation. *J. of Climate*, **12**, 2113-2123.

—, **J. Rutllant, and H. Fuenzalida, 2002:** Coastal Lows along the Subtropical West Coast of South America: Mean Structure and Evolution. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 75-88.

—, **P. Aceituno, and I. Ramos, 2006:** Intraseasonal variability of the rainfall in South-central Chile (30-50°S). *Proceedings of Eighth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Foz de Iguazu, Brazil, April 24-28, 2006*, 1773-1776.

Ghil, M., and K. Mo, 1991: Intraseasonal oscillations in the global atmosphere. Part II: Southern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 780-790.

Gordon, C., C. Cooper, C. A. Senior, H. Banks, J. M. Gregory, T. C. Johns, J. F. B. Mitchell, and R. A. Wood, 2000: The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transport in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, **16**, 147-168.

Hanley, D. E., M. A. Bourassa, J. J. O' Brien, S. R. Smith, and E. R. Spade, 2003: A Quantitative Evaluation of ENSO Indices. *J. Climate*, **16**, 1249-1258.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*, 881pp.

Kalnay, E., and co-authors, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.

Karoly, D. J., 1989: Southern Hemisphere circulation features associated with El Niño–Southern Oscillation events. *J. Climate*, **2**, 1239–1252.

Kaufman, L., and P. J. Rousseeuw, 1990: Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. *New York: John Wiley & Sons*.

Keable, M., I. Simmonds, and K. Keay, 2002: Distribution and temporal variability of 500 hPa cyclones characteristics in the Southern Hemisphere. *Int. J. Climatol.*, **22**, 131-150.

Kidson, J. W., and M. Sinclair, 1995: The Influence of Persistent Anomalies on Southern Hemisphere Storm Tracks. *J. Climate*, **8**, 1938-1950.

Kiladis, G. N., and H. F. Diaz, 1989: Global Climatic Anomalies Associated with Extremes in the Southern Oscillation. *J. Climate*, **2**, 1069–1090.

—, and **K. C. Mo, 1998**: Interannual and intraseasonal variability in the Southern Hemisphere. *Meteorology of the Southern Hemisphere, Meteor. Monogr.*, No. 49, Amer. Meteor. Soc., 307–336.

Lejenäs, H, and H. Økland, 1983: Characteristics of Northern Hemisphere Blocking as determined from long time series of observational data. *Tellus*, **35A**, 350-362.

Liebmann, B., and C. A. Smith, 1996: Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 1275–1277.

Liu, Q., 1994: On the definition and persistence of blocking. *Tellus*, **46A**, 286–298.

Mo, K. C., and R. W. Higgins, 1998: The Pacific South American modes and tropical convection during the Southern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1581–1598.

—, and **J. Nogués-Paegle, 2001**: The Pacific–South American modes and their downstream effects. *Int. J. Climatol.*, **21**, 1211-1229.

Montecinos, A., and P. Aceituno, 2003: Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *J. Climate*, **16**, 281–296.

Murray, R. J., and I. Simmonds, 1991: A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: Development and operation of the scheme. *Aust. Meteor. Mag.*, **39**, 155–166.

Nogués-Paegle, J., L. A. Byerle, and K. C. Mo, 2000: Intraseasonal Modulation of South American Summer Precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 837-850.

Pizarro, J. G., and A. Montecinos, 2000: Cutoff cyclones off the subtropical coast of Chile. Preprints, *Sixth Int. Conf. on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Santiago, Chile, Amer. Meteor. Soc.*, 278–279.

Renwick, J. A., 1998: ENSO-Related Variability in the Frequency of South Pacific Blocking. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 3117–3123.

—, **2005**: Persistent Positive Anomalies in the Southern Hemisphere Circulation. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 977–988.

Rex, D.F. 1950: Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. *Tellus*, **2**, 275-301.

- Robertson, A. W., and C. R. Mechoso, 2003:** Circulation Regimes and Low-Frequency Oscillations in the South Pacific Sector. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1566-1576.
- Rondanelli, R., L. Gallardo, and R. Garreaud, 2002:** Rapid changes in ozone mixing ratios at Cerro Tololo (30°10'S, 70°48'W, 2200 m) in connection with cut-off lows and deep troughs. *J. Geophys. Res.*, **107**, DOI: 10.1029/2001JD001334.
- Rutllant, J., and H. Fuenzalida, 1991:** Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. *Int. J. Climatol.*, **11**, 63–76.
- Simmonds, I., and K. Keay, 2000:** Mean Southern Hemisphere Extratropical Cyclone Behavior in the 40-Year NCEP-NCAR Reanalysis. *J. Climate*, **13**, 873-885.
- Sinclair, M. R., J. A. Renwick, and J. W. Kidson, 1997:** Low-frequency variability of Southern Hemisphere sea level pressure and weather system activity. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2531–2542.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 2000:** Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J. Climate*, **13**, 1000-1016.
- , ——, and G. C. Hegerl, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part II: Trends. *J. Climate*, **13**, 1018-1036.
- Tibaldi, S., and F. Molteni, 1990:** On the operational predictability of blocking. *Tellus*, **42A**, 343-365.
- Trenberth, K. E., 1982:** Seasonality in Southern Hemisphere eddy statistics at 500 mb. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 2507–2520.
- , 1991: Storm tracks in the Southern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 2159–2178.
- , and K. C. Mo, 1985: Blocking in the Southern Hemisphere. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 3–21.
- Walker, G. T., and E. W. Bliss, 1932:** World Weather V. *Mem. Roy. Meteor. Soc.*, **4**, 53-84.
- Wallace, J. M., 2000:** North Atlantic Oscillation/annular mode. Two Paradigms – One Phenomenon. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 791-805.
- Wolfram, S., 2003:** The Mathematica Book, Fifth Edition.
- Xie, P., and P. A. Arkin, 1997:** Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2539 - 2558.

Yin, J. H., 2005: A consistent poleward shift on the storm tracks in simulation of 21st century climate. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L18701, DOI: 10.1029/2005GL023684.

ANEXOS

A Identificación de los modos espaciales de APPs

Como se introduce en la sección 2.4, el estudio de los patrones regionales de APPs se basó en un análisis de agrupamiento de mapas realizado en dos etapas. Los datos analizados consistieron en proyecciones polares de mapas binarios de APPs, cuyas zonas activas e inactivas fueron representadas por unos y ceros, respectivamente. Las proyecciones se hicieron sobre una malla de 21×21 puntos de grilla por hemisferio, abarcando desde el Polo Norte (Sur) hasta 20° de latitud norte (sur). Con esta geometría y tipo de grilla se redujo la resolución original de los campos (i.e., 29×144 pts. para una región hemisférica equivalente) y se eliminaron las condiciones de borde, puesto que las estructuras de APPs –que no alcanzan latitudes bajas– no aparecen divididas en una proyección polar, ya que no existe una longitud límite. De esta forma se retuvo la estructura de gran escala de las zonas diariamente afectadas por APPs (los detalles asociados a una resolución mayor no interesan en este tipo de análisis) y se simplificaron los procesos de cómputo.

La primera etapa de agrupamiento se basó en la búsqueda de patrones de APPs año a año, para lo cual se definió un índice de similitud que compara cuantitativamente un par de mapas. Para los días asociados, el índice representa el grado de intersección de las zonas afectadas por APPs normalizada por la extensión de éstas. De esta forma, se construyeron para cada año matrices de similitud (365×365 elementos) a partir de los mapas polares (PS_{PPAi}) como

$$SM_{ij} = \frac{PS_{PPAi} \cap PS_{PPAj}}{\sqrt{S(PS_{PPAi}) S(PS_{PPAj})}} \quad i, j = [1, 365]$$

con S el número de puntos de grilla por mapa con valor unitario, representativo de la extensión de las zonas afectadas por APPs. Así, el parentesco entre dos mapas puede tomar valores entre 0 y 1 dependiendo del área común afectada por APPs en relación a sus tamaños. Los límites superior e inferior del índice corresponden respectivamente a dos días cuyos mapas coinciden exactamente o no comparten puntos de grilla perturbados por el fenómeno (e.g., Fig.

A1). Definida de esta forma, la similitud entre dos mapas no se puede indefinir, puesto que si al menos uno de los casos en comparación tiene un tamaño S nulo (sin registro de APPs), tanto el numerador como el denominador del índice se anulan. Las matrices resultantes son entonces, simétricas y de diagonal unitaria.

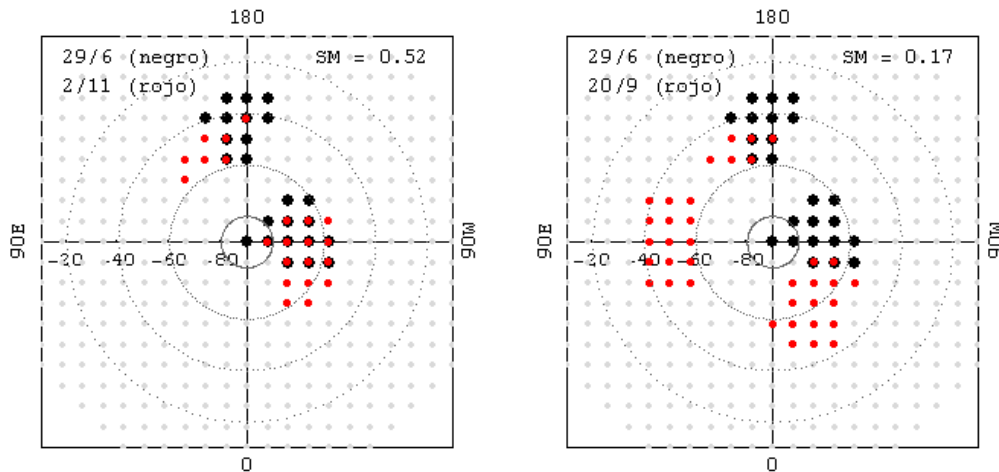


Fig. A1 Proyecciones polares de mapas binarios de APPs sobre el Hemisferio Sur. Se indican las fechas de 1984 correspondientes y sus similitudes asociadas (SM).

Para cada año, a partir de la matriz de similitud asociada, se buscaron conjuntos de mapas diarios que satisficieran una similitud mayor o igual a 0.4 entre todas las combinaciones posibles de pares de elementos. La elección de este límite es ambigua, y define un parámetro para el tipo de agrupación pretendida. En este caso se escogió un valor luego de varias pruebas de inspección visual y tal que se consideraran un número apreciable de mapas por grupo. De hecho, con un índice de similitud superior, se tienden formar sólo grupos constituidos por elementos vecinos, es decir, por días asociados a un mismo episodio de APP. En la identificación de estos grupos se consideraron, como punto de partida, las 365 columnas de la matriz de similitud. Cada grupo queda constituido por los elementos (días) de la columna que tengan asociados un índice superior al límite escogido (0.4). Posteriormente, este conjunto original de 365 grupos es ordenado por tamaño y reducido. En la reducción se filtraron los casos cuyos elementos presentaran una intersección superior a la mitad de su tamaño con algún grupo establecido previamente (el primero es el más numeroso). Tampoco fueron considerados los conjuntos con menos de cinco elementos, pues no tiene sentido definir un patrón de APPs con menos de cinco días al año. Construidos de esta forma, se permite que ciertos días se asocien a más de un grupo. La Fig. A2 ilustra el resultado de esta primera etapa

para 1997, donde figuran los compuestos normalizados de los seis grupos más numerosos de un total de 47 casos encontrados ese año. Las mayores intersecciones producidas en este ejemplo se dan entre los pares de grupos 2 y 5, y 4 y 6, ambos con tres días en común. En este caso se aprecian distintas configuraciones de APPs, la mayor parte de ellas sobre latitudes medias-altas. Por su parte, el primer grupo muestra un patrón que reúne las APPs desarrolladas en torno al Polo Sur (Fig. A2).

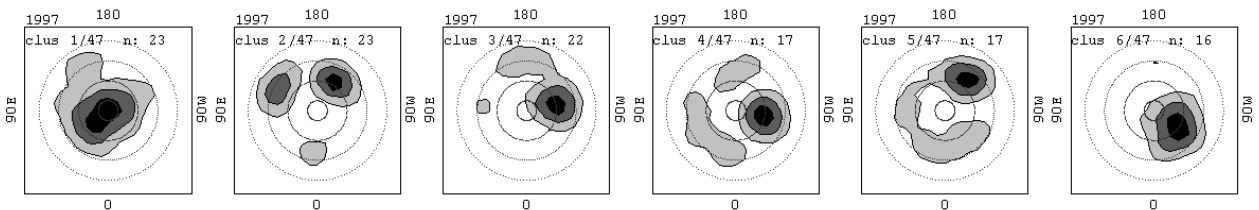


Fig. A2 Seis primeros grupos de APPs encontrados en 1997 como resultado de la primera etapa de agrupamiento (ver detalle en el texto). Compuestos normalizados de los mapas binarios de APPs asociados a cada grupo (contornos de 0.1, 0.4 y 0.9). En la parte superior se indica el número de días asociado a cada grupo.

La segunda etapa del análisis consistió en un análisis tradicional de agrupamiento (*clustering*), aplicado sobre el conjunto completo de grupos obtenido en la primera etapa (todo el periodo). Para ello se construyeron mapas normalizados de compuestos de APPs asociados a cada grupo obtenido en la primera etapa. Cada compuesto corresponde al mapa promedio de los elementos del grupo (días) y luego escalado en base al(los) punto(s) de grilla de máximo valor (este toma valor uno; e.g., Fig. A2). En el *clustering* final se ocuparon distancias euclidianas entre los componentes de los mapas como función base (Kaufman 1990). El número final de *clusters* determinados con técnicas estadísticas resultó muy sensible a cada método y a los parámetros utilizados en ellos, por lo que se optó por forzar un valor predefinido. Luego de varios experimentos en el Hemisferio Sur se fijaron seis grupos finales, considerando que éstos describieran patrones heterogéneos y que tuvieran un grado importante de autonomía (i.e., que se apreciaran en distintos experimentos). Sin un mayor análisis, se optó por ocupar los mismos parámetros en el Hemisferio Norte (ver anexo B).

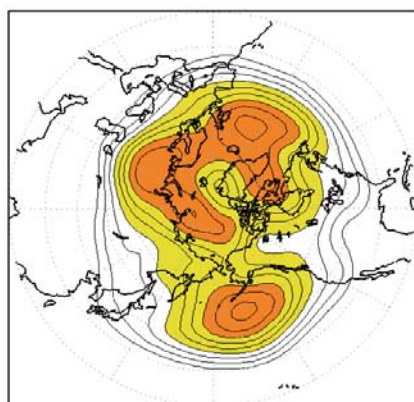
Entre 1958 y 2005 se formaron en una primera etapa un promedio de 44 grupos por año, los cuales consideran en promedio el 83% de los días del año. Así, un total de 2101 compuestos normalizados fueron sometidos a *clustering* obteniéndose con ellos los 6 patrones

finales que se describen en la sección 2.4. Éstos se enumeraron considerando la fracción asociada a cada uno respecto del total de días considerados por los grupos.

B APPs en el Hemisferio Norte

La Fig. B1a ilustra la distribución espacial de frecuencias de APPs en el Hemisferio Norte, resultado de un análisis idéntico al descrito en el capítulo 2 para el Hemisferio Sur. El régimen de APPs en este caso, medido en términos de días por año, muestra un patrón más distribuido, pero menos simétrico que su homólogo del sur. Se aprecia un máximo bien definido costas afuera de Canadá, sobre el Pacífico Boreal. Otro máximo de similar magnitud (sobre 7 eventos año^{-1}) se observa al norte de Europa; éste se encuentra menos definido al interior de una zona de fuerte actividad que se extiende en torno al círculo polar desde Groenlandia hasta el norte de Rusia, y luego hacia el Ártico. Estos máximos coinciden con las zonas de alta densidad encontradas por Dole y Gordon (1983) para anomalías permanentes tanto positivas como negativas. Como en el Hemisferio Sur, la distribución de APPs observada en la Fig. B1a coincide también con el régimen de baja frecuencia (intraestacional) en la variabilidad atmosférica de Z_{500} del Hemisferio Norte (Fig. B1b).

a. Frecuencia de APPs



b. DS_ Z_{500}

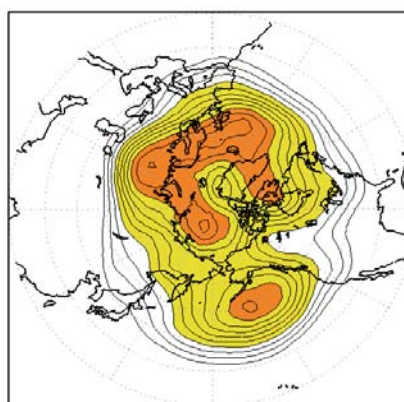


Fig. B1 (a)* Frecuencia media APPs ilustrada en días totales por año asociados a las APPs. Isolíneas cada 5 días año^{-1} . Zonas coloreadas indican contornos de 25 y 50 días año^{-1} . (b) Desviación estándar media (promedio de 48 años) de anomalías mensuales de Z_{500} . Resultado expresado en días ($SD_{\text{men}} \times 365/12$). Isolíneas cada 5 días. Colores indican contornos de 45 y 60 días (* mapas suavizados).

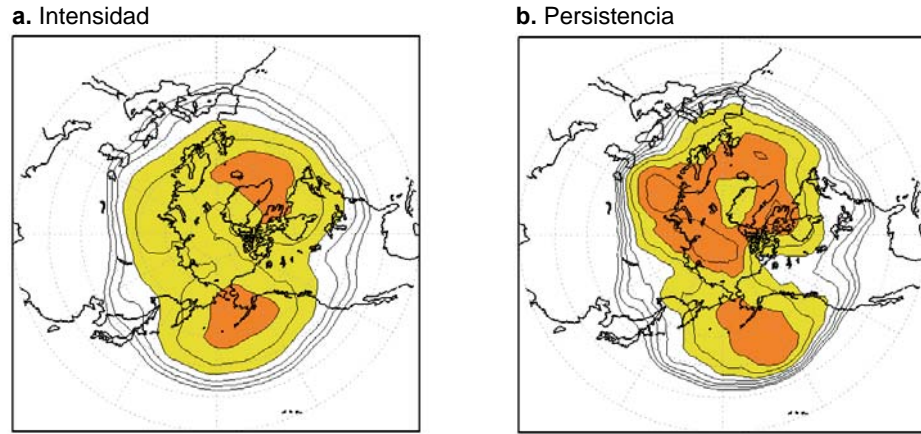


Fig. B2 (a) Intensidad media de APPs en Hemisferio Norte. Isolíneas cada 20 mgp. En colores, contornos de 160 y 200 mgp. (b) Persistencia media de APPs. Isolíneas cada 0.5 días. Colores indican contornos de 7 y 8 días.

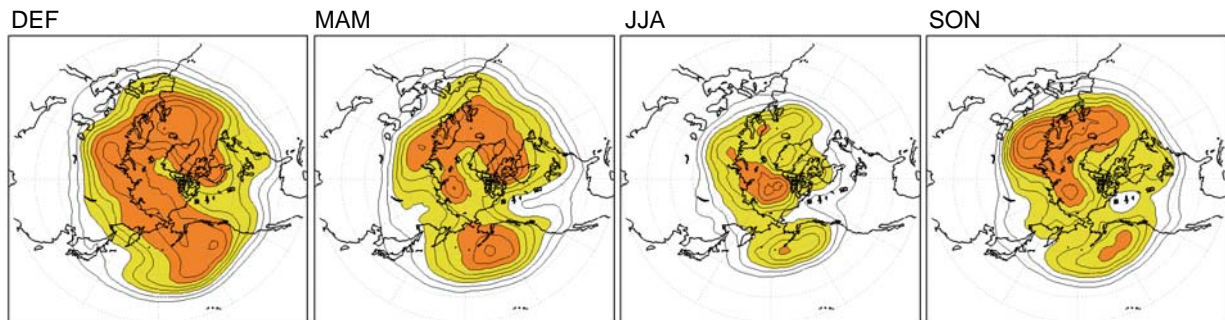


Fig. B3 Frecuencia estacional media de APPs en el Hemisferio Norte. Paneles corresponden a los periodos de verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON) austral. Isolíneas cada 2 días estación⁻¹. Colores ilustran contornos de 6 y 12 días estación⁻¹.

Las distribuciones medias de intensidad y persistencia de APPs se resumen en la Fig. B2. Aunque menos definidas, las zonas de alta densidad de APPs sobre los océanos del Hemisferio Norte aparecen también como las de mayor intensidad del fenómeno. En promedio, los episodios más extensos son también coherentes con las zonas de alta frecuencia, con máximos locales en Rusia occidental y, al igual que en el Hemisferio Sur, al interior del círculo polar.

El régimen anual de APPs en el Hemisferio Norte es claramente apreciable en las distribuciones estacionales de fenómeno (Fig. B3). Coherente con la simetría entre los ciclos anuales de frecuencia del fenómeno de ambos hemisferios (Fig. 2.7), se observa un distribución

generalizada de máxima actividad durante el invierno boreal (diciembre-enero) y un mínimo durante la temporada opuesta (julio-agosto). Este régimen de APPs puede alcanzar una gran amplitud en ciertas regiones, como sobre el extremo septentrional del Atlántico, donde la actividad invernal dobla aproximadamente a la actividad estival.

Grupos de APPs en el Hemisferio Norte

Para la caracterización de los patrones regionales de APPs en el Hemisferio Norte se hizo el mismo análisis de agrupamiento que definió los modos del Hemisferio Sur (descrito en el Anexo A). En la primera etapa del método se obtuvieron 2044 grupos asociados al periodo completo, equivalente a un promedio de 43 grupos por año, y en el que se consideró un 86% de los días. Al igual que en Hemisferio Sur, en la segunda etapa de *clustering* se forzaron seis grupos finales. Los compuestos asociados a estos grupos y sus ciclos anuales se ilustran en la Fig. B4. Los patrones de APPs obtenidos en este caso no son fácilmente clasificables como los grupos del Hemisferio Sur; donde básicamente se observa un grupo cuya actividad muestra una simetría zonal confinada en altas latitudes, y el resto con configuraciones tipo trenes de onda en latitudes medias-altas sobre el Océano Pacífico. Esto es esperable puesto que en general el Hemisferio Norte, dada su mayor masa continental, muestra menos simetrías de circulación en comparación a su homólogo del sur. De igual forma, los grupos ilustrados en la Fig. B4 se identifican con una parte importante de la variabilidad de baja frecuencia asociada al Hemisferio Norte, y se distinguen entre ellos los patrones de algunos de sus modos de circulación conocidos.

Al igual que los grupos de APPs 1, 2 y 4 del Hemisferio Sur (Fig. 2.9), el 1^{er} y 2^{do} grupo en la Fig. B4 muestran una coherencia significativa con ambas fases del modo anular del Hemisferio Norte, también conocida como “Oscilación Ártica” (AO, Thompson y Wallace 2000). Este patrón de circulación, que –en comparación a la AAO– ha sido definido recientemente, está estrechamente asociado con la oscilación del Atlántico norte (NAO), fenómeno descrito desde la década del 30 (Walker y Bliss 1932). Aunque las distribuciones espaciales de la AAO y la NAO sean distintas y exista una abierta discusión acerca de la naturaleza de ambos fenómenos (e.g., Wallace 2000, Ambaum et al. 2001), en la actualidad estos modos suelen ser tratados como parte de un solo fenómeno.

Grupos de APP en el Hemisferio Norte

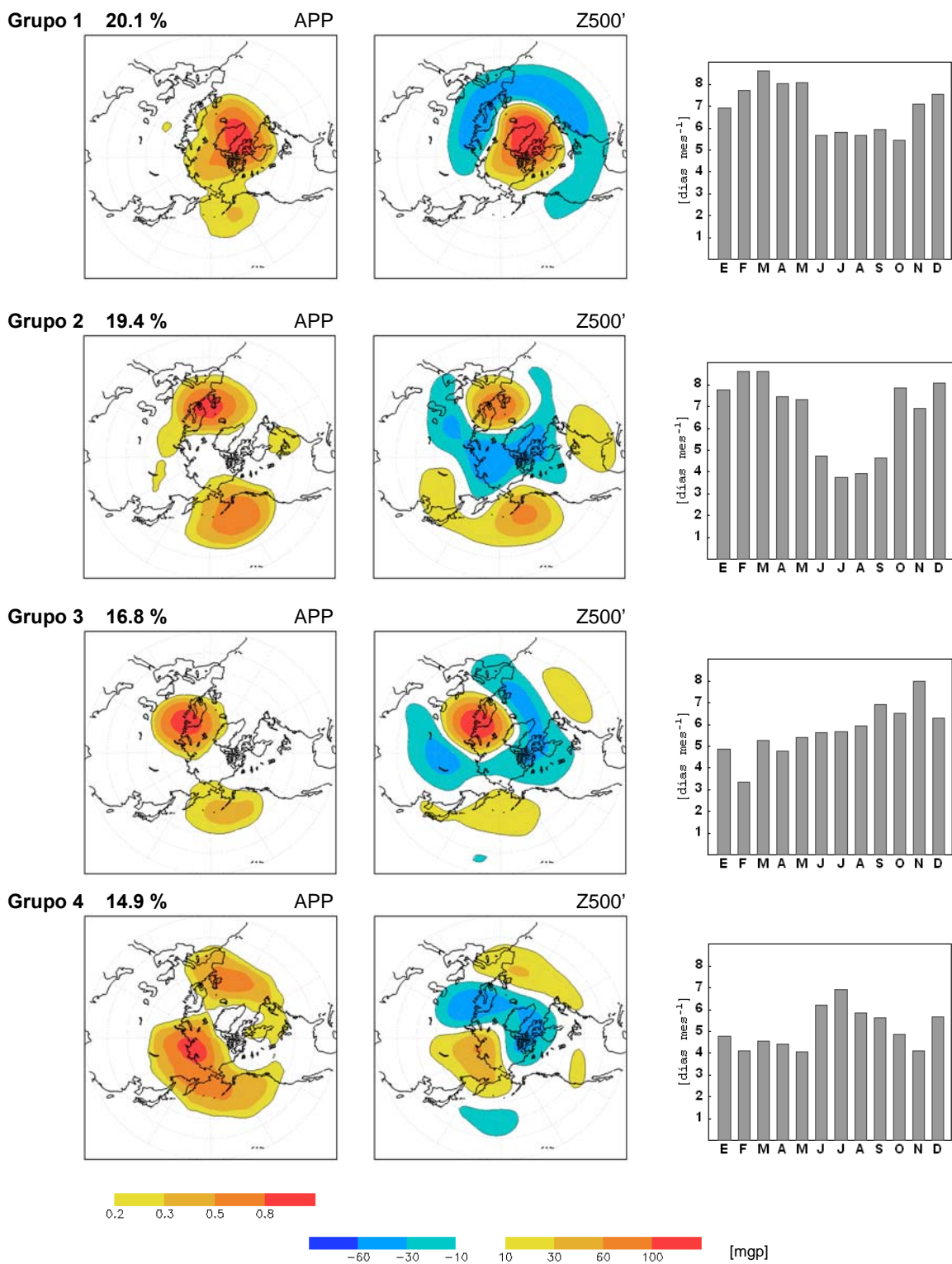


Fig. B4 Ver detalle en la página siguiente.

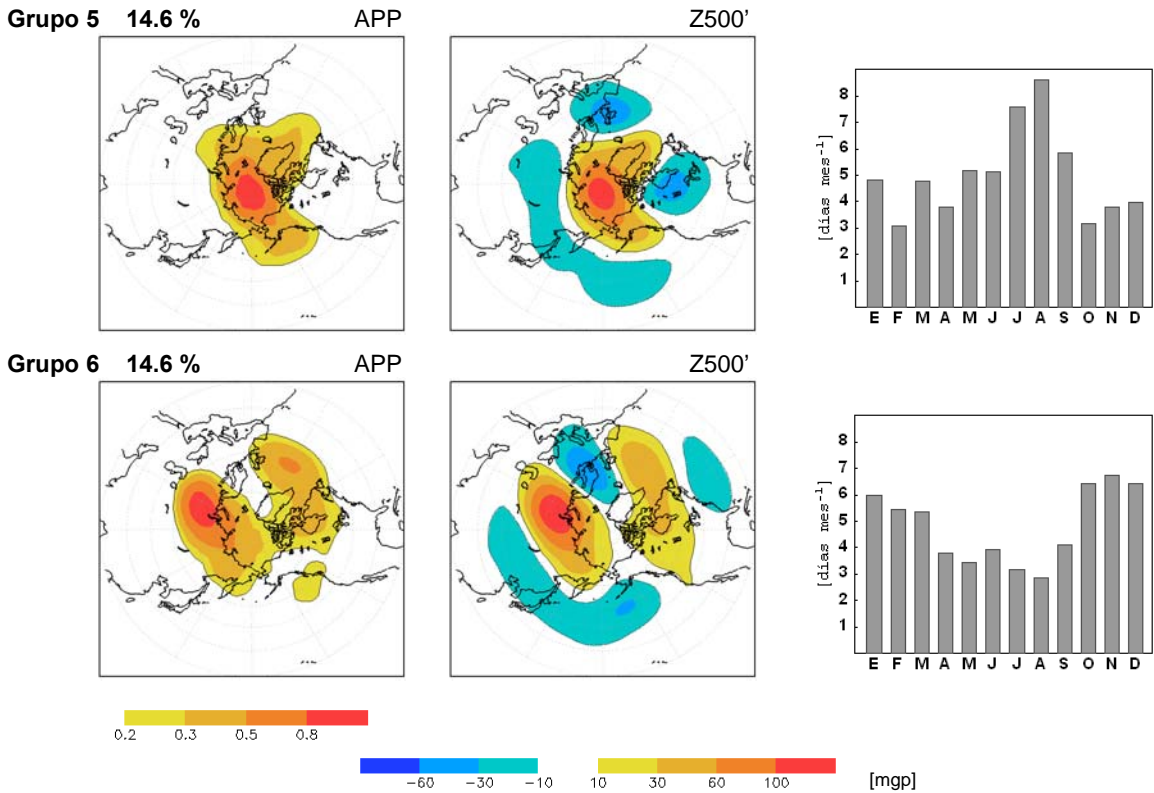


Fig. B4 Grupos de APPs en el Hemisferio Sur. Compuestos normalizados de mapas diarios de APPs (paneles de la izquierda) y de anomalías de Z_{500} (paneles centrales) asociados a cada conjunto. Se indica fracción de cada grupo respecto al número total de días. Paneles a la derecha representan los ciclos anuales construidos a partir del número medio mensual de días asociado a cada grupo.

La Fig. B5 muestra las series de tiempo entre 1990 y 2005 de los índices de la AO y la NAO. El primero está definido de forma análogo al índice de la AAO (componente principal en un análisis EOF en Z_{700} en el Hemisferio Sur, ver sección 2.2), pero sobre los campos de altura geopotencial en 1000 hPa (Z_{1000}), mientras que la NAO se identifica mediante técnicas similares, pero en una región más reducida. Entre los valores mensuales (anuales) de ambos índices se observa una relación que alcanza un factor de correlación de 0.6 (0.76) entre 1958 y 2005, pero existe documentación con coherencias mayores (Ambaum et al. 2001).

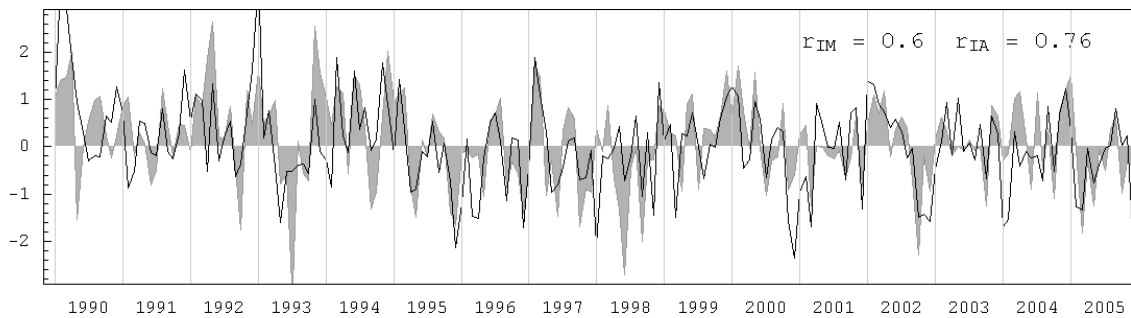


Fig. B5 Series de tiempo de índices mensuales de la NAO (gris) y AO (negro). Se indican correlaciones (1958-2005) entre ambas para sus valores intermensuales (r_{IM}) e interanuales (r_{IA}).

De carácter más regional, la NAO representa un intercambio de masas atmosféricas entre Groenlandia y las Islas Azores, por lo que su distribución aparece especialmente coherente con el primer grupo de APPs (no se muestra); de hecho, se obtiene una correlación de 0.82 entre su índice y la frecuencia anual del grupo-APP. Por su lado, el compuesto de Z_{500}' asociado a la diferencia entre las fases negativa y positiva de la AO, muestra una distribución hemisférica parcialmente anular, cuyos valores positivos en altas latitudes se definen en dos máximos: uno sobre Groenlandia y otro cerca del Polo (Fig. B6a). Los valores negativos de este compuesto (asociado a la fase positiva del modo) se restringen a los sectores oceánicos, sobre el Pacífico y Atlántico norte. Las coherencias entre las frecuencias del primer y segundo grupo de APPs y la AO se pueden apreciar en los patrones de dispersión entre sus series anuales (Fig. B6b), que definen respectivamente un factor de correlación de -0.74 y 0.79. El grupo 5, cuya distribución también pareciera representar la fase negativa de la AO, no muestra relación importante con la series de ésta, salvo para los meses del otoño boreal ($r = -0.64$).

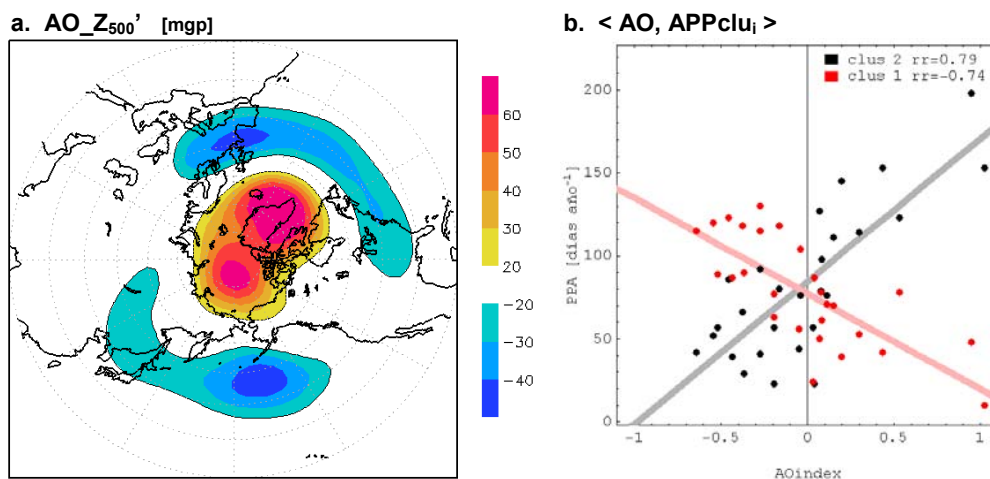


Fig. B6

- a.** Diferencia entre la fase negativa y positiva de la Oscilación Ártica (AO, ver detalle en el texto). Compuestos de Z_{500}' .
- b.** Diagramas de dispersión entre el índice anual de AO y la frecuencia de APPs asociada a los grupos 1 y 2 del Hemisferio Norte. Líneas gruesas representan las regresiones lineales. En la parte superior se indican los coeficientes de correlación entre las series.

C Tendencias de APPs durante la segunda mitad del siglo XX

En la Fig. C2 se ilustran las tendencias lineales de APPs en ambos hemisferios, calculadas para todo el periodo en estudio (1958-2005) a partir de las frecuencias anuales del fenómeno (en días año⁻¹). En el Hemisferio Sur se observa un patrón con una clara simetría zonal, definido por valores positivos en torno al Polo y en latitudes medias, y con valores negativos en las regiones intermedias. Las APPs están definidas a partir de series de Z_{500}' que, calculadas en base a un ciclo anual fijo en Z_{500} , tienen lógicamente tendencias del mismo orden que la variable de base (Z_{500}). El cálculo realizado para el régimen de APPs está, por lo tanto, sujeto a los cambios observados en los campos de referencia (Z_{500}'), y sus valores van a tener asociados una componente de la tendencia en Z_{500} (Fig. C1). Coherente con esto, la distribución de esta última muestra un patrón anular similar al de la Fig. C2.

Tendencias de Z_{500}

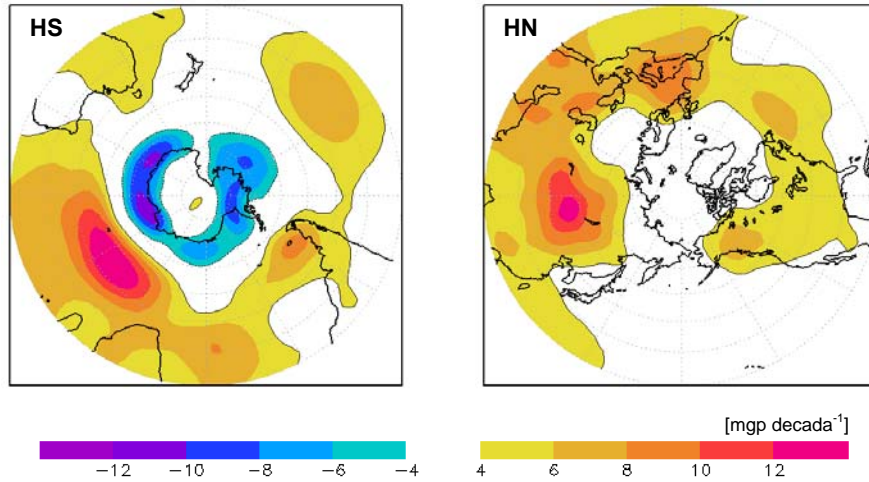
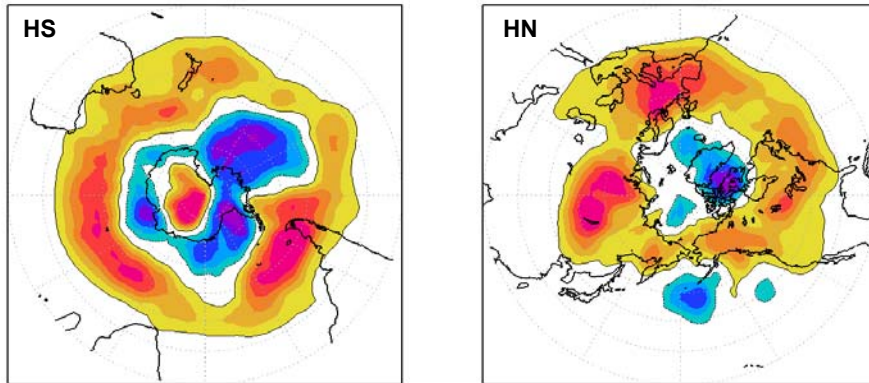


Fig. C1 Tendencias lineales de las medias anuales de Z_{500} (reanálisis NCEP-NCAR) entre 1958 y 2005. Hemisferio Norte y Sur en panel de la izquierda y derecha respectivamente.

a. Tendencias APP



b. Tendencias de APP (s/tend en Z_{500})

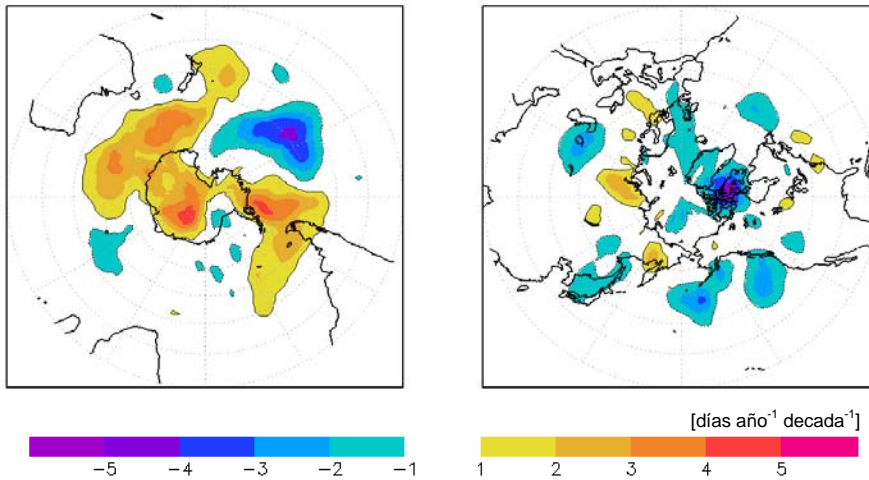


Fig. C2 (a) Tendencias lineales de frecuencias anuales de APPs para el periodo 1958-2005. (b) Tendencias de APPs para episodios registrados a partir de anomalías de Z_{500} calculadas con tendencia removida.

Para sustraer la componente de Z_{500} , se hizo un registro de APPs a partir de series de Z_{500}' con tendencia removida (ver detalles en la sección 2.2). Cabe señalar que el motivo de este ejercicio radica principalmente en la evaluación de tendencias, y no genera cambios importantes en los rasgos promedio de APPs descritos en el capítulo 2. La Fig. C2b muestra las tendencias de APPs asociada a esta base paralela; se aprecia en este caso un quiebre de la estructura anular del Hemisferio Sur observada en la Fig. C2a. Las magnitudes asociadas son menores, pero se destacan las tendencias no explicadas por los cambios en los campos de base. Destacan los aumentos en el régimen de APPs sobre gran parte de la Antártica, al sur de Australia y Nueva Zelanda, y en la región comprendida entre la península Antártica y el extremo austral de Sudamérica. Se aprecia también una región con tendencias negativas sobre el Pacífico sur, que aparece reflejada en los resultados de ambos registros de APPs (con y sin tendencia en Z_{500}).

Las tendencias de APPs en el Hemisferio Norte aparecen aún más influenciadas por los cambios en Z_{500} , que muestra un patrón similar al observado en el Hemisferio Sur (máximos en latitudes medias). Las APPs calculadas a partir del registro sin tendencia en Z_{500} no muestra un claro patrón de tendencias salvo por un zona con valores negativos muy localizada al oeste de Groenlandia (Fig. C2).

La Fig. C3 muestra las tendencias lineales de frecuencia de APPs asociadas a los seis grupos descritos en el capítulo 2 y en anexo B para los hemisferios Sur y Norte respectivamente. Estos patrones, identificados en el registro de las APPs calculadas sobre las bases de Z_{500}' con tendencia, muestran valores coherentes a los observados en la Fig. C2a. En el Hemisferio Sur destacan lógicamente los cambios asociados al modo anular (grupo 2 y 4) y al grupo 5, cuyo compuesto centra precisamente su máximo y mínimo en las zonas de fuertes tendencias inversas, en el Atlántico sur oeste y en el Pacífico sur respectivamente. Las tendencias de los grupos 2, 4 y 6 del Hemisferio Sur, así como las de los grupos 1 y 2 del Hemisferio Norte, son coherentes con los cambios documentados para los modos anulares de ambos hemisferios, que muestran un aumento en la polaridad de sus índices (aumento en el gradiente de presión medido entre latitudes medias y altas, Thompson et al. 2000).

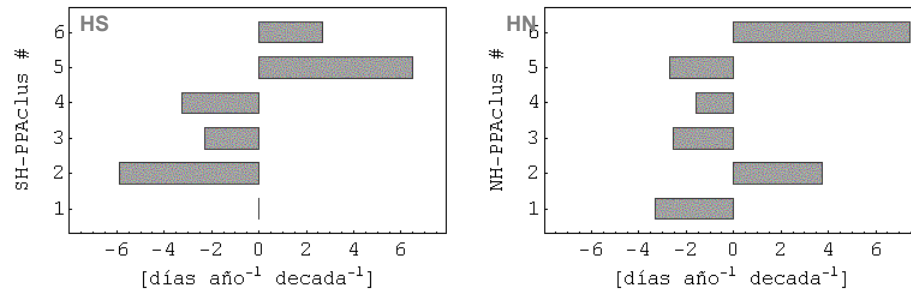


Fig. C3 Tendencias lineales en la frecuencia anual de APPs asociadas a los *clusters* de Hemisferio Sur (izquierda) y Norte (derecha) para el periodo 1958-2005.

Las series estacionales de frecuencia de los grupos 2, 4 y 5 de APPs en el Hemisferio Sur, revelan que las tendencias observadas anualmente son principalmente producto de cambios durante los meses más cálidos. Durante todo el periodo, el modo anular no muestra, de hecho, cambios significativos en los meses de invierno y primavera (grupo 2). Por su parte, la tendencia negativa de este grupo (2) observada en los meses de verano y otoño durante los últimos 40 años del siglo XX, reforzada por la baja actividad del modo durante la mayor parte de los 90s, se atenúa si se consideran los últimos años del registro.

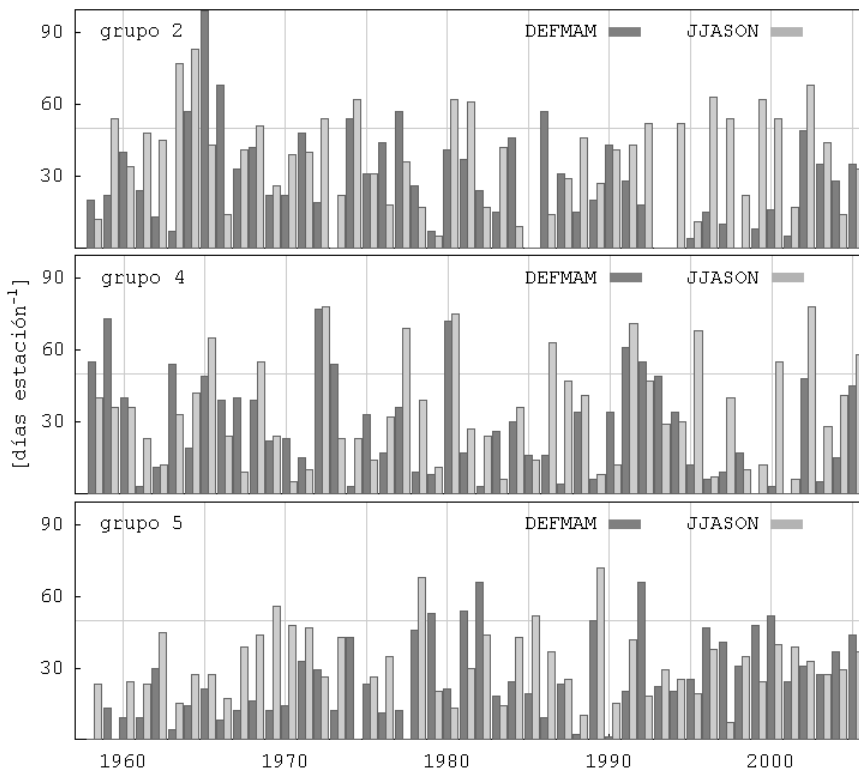


Fig. C4 Series de frecuencia temporal de APPs para los grupos 2, 4 y 5 del Hemisferio Sur. Verano y otoño austral (dic-may) en gris oscuro, invierno y primavera (jun-nov) en gris claro.

D Tendencias de CETs

La Fig. D1 resume, para el Hemisferio Sur, las tendencias lineales en la frecuencia anual de CETs durante todo el periodo en estudio (1958-2005). En ésta se insinúa un patrón con simetría zonal, con anillos de tendencias positivas en la periferia de la Antártica y en los sectores subtropicales, y valores negativos entre estas dos regiones. Este rasgo no se manifiesta sobre el Océano Pacífico austral, que exhibe principalmente tendencias negativas. Como es de esperar, la magnitud de los cambios es más intensa en latitudes altas, donde las densidades medias de CETs son también mayores. Los valores de la Fig. D1 muestran un mayor equilibrio espacial entre tendencias positivas y negativas si ésta se compara con los resultados descritos en K02, donde se advierten principalmente disminuciones en la frecuencia de casos en los sectores cercanos al círculo polar durante el periodo 1958-1997.

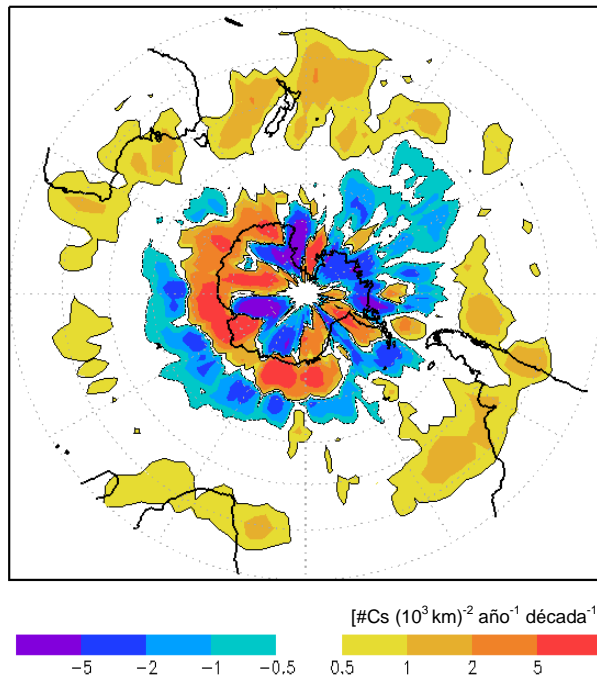


Fig. D1 Tendencias lineales de CETs para el periodo 1958-2005.

Al observar las frecuencias de CETs en sus series de tiempo, se revela que la diferencia entre las tendencias de ambos periodos (1958-1997 y 1958-2005) se debe principalmente a la fuerte actividad de los últimos años del periodo descrito en este trabajo. Entre 2001 y 2005 se tienen, de hecho, los cinco años con mayor número de ciclones en la franja zonal comprendida entre 70°S y 60°S de toda la serie (Fig. D2a). Las frecuencias de CETs en este anillo muestran

una clara tendencia positiva, pero que sólo es apreciable desde la década del ochenta. En latitudes un poco menores, entre 60°S y 50°S, el impacto de los últimos años de la serie es aún mayor, revirtiendo una tendencia negativa, observada entre las décadas del sesenta y noventa, a un rasgo más bien neutro, si se considera todo el periodo, o claramente positivo desde los años ochenta hacia el final de la serie (Fig. D2b).

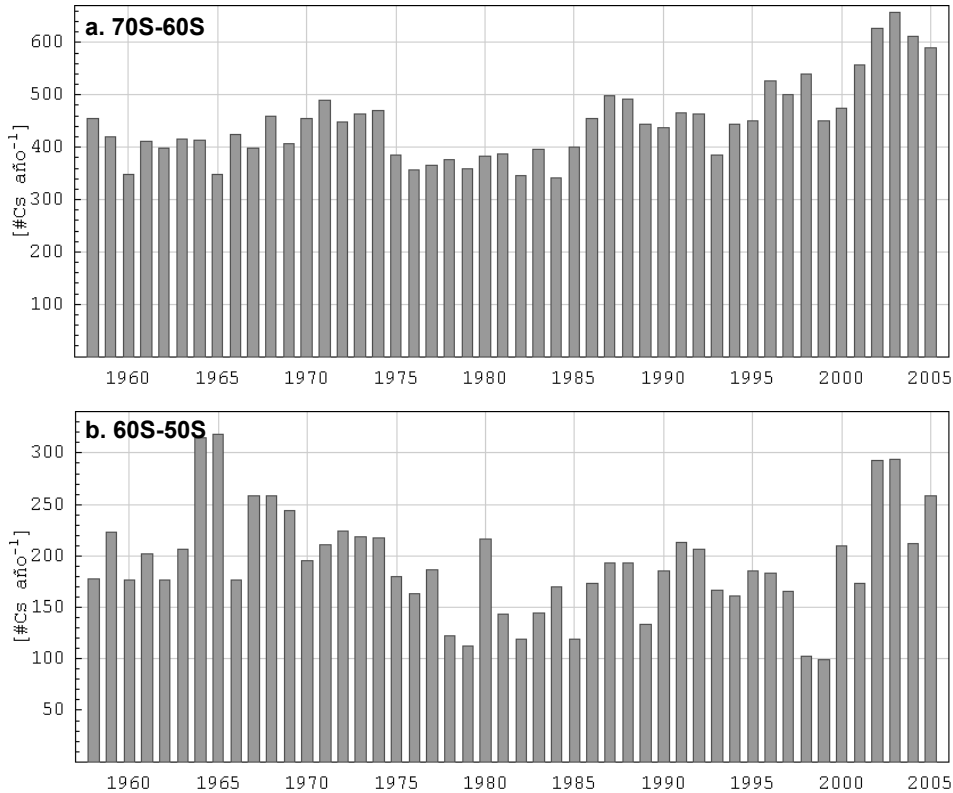


Fig. D2 (a) Serie de tiempo de frecuencia anual de CETs registrados dentro del anillo zonal entre 70S y 60S. (b) Igual que (a), pero para CETs registrados entre 60S y 50S.

Como se aprecia también en la Fig. D1, los ciclones de latitudes subtropicales (CSTs) muestran, en conjunto, un aumento sostenido en sus frecuencias anuales durante los 48 años registrados (Fig. D3). Particularmente, durante los últimos años de la serie (2000-2005) se observa un régimen elevado en la frecuencia de este grupo con un máximo histórico en el año 2005. Los CSTs observados al oeste de los Andes comparten esta tendencia, pero es sólo evidente desde mediados de la década del 70 y no se aprecia un régimen significativo durante los últimos años.

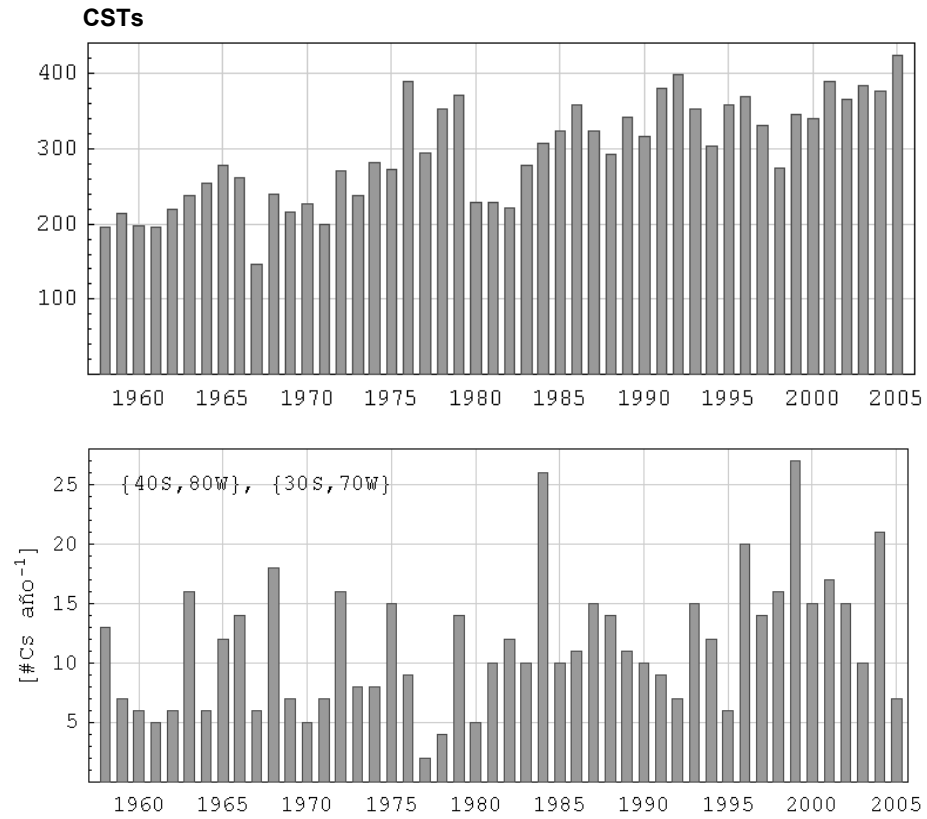


Fig. D3 Serie de frecuencia anual de CSTs registrados al interior de la franja zonal comprendida entre 50S y 10S (panel superior). Abajo, frecuencia de CETs registrados al interior de la celda de 10° x 10° comprendida entre 30S y 40S, y entre 70W y 80W.

