NEVADAS EN EL SUDESTE BONAERENSE: CLIMATOLOGÍA SINÓPTICA Y UN CASO DE ESTUDIO

Paola Salio [1,2], Claudia Campetella [1,2], Juan Ruiz [1,2],
Yanina Garcia Skabar [2,3] y Matilde Nicolini [1,2]

[1] Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. FCEN – UBA
[2] Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. CONICET-UBA
[3] Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas. FA - UBA

(Manuscrito recibido el 3 de julio de 2006, en su versión final el 24 de octubre de 2007)

RESUMEN

Este trabajo realiza una estadística de la frecuencia de las nevadas ocurridas sobre el sudeste de la provincia de Buenos Aires durante un período de 35 años (1960-2004). Utilizando información de tiempo presente se detectaron 32 eventos de nevada, 7 de los cuales produjeron nieve en más de una estación sinóptica.

A fin de comprender los patrones de circulación, se realiza una climatología sinóptica de las incursiones de aire frío que son responsables de nevadas en la región de estudio. Dichos patrones se caracterizan por anomalías extremas en las vaguadas asociadas a frentes fríos y en las cuñas posfrontales que denotan la intensidad de dichos sistemas. El campo de anomalías de altura geopotencial muestra en los casos de nieve generalizada un mínimo sobre la vaguada frontal que duplica la intensidad de la obtenida en los casos de nieve aislada. El intenso régimen ciclónico favorece la convergencia en niveles bajos y el fuerte enfriamiento, evidente en las anomalías del campo térmico en niveles medios, indicando la inestabilidad generada en la masa de aire que es conducida hacia el norte sobre la costa patagónica y el Mar Argentino.

En un caso particular de nevada generalizada, asociada a una fuerte incursión de aire frío ocurrida el 10 de julio de 2004 sobre el sudeste de la costa bonaerense, se analiza la situación sinóptica utilizando el modelo "Sistema de Modelado Atmosférico Regional" (RAMS) como herramienta de diagnóstico y se la relaciona con las muestras previamente encontradas, caracterizando la masa de aire polar y su evolución. La nevada se asocia a una inestabilización sostenida de la masa de aire, favorecida por calentamiento y humedecimiento en una trayectoria dominantemente marítima y por convergencia en un régimen ciclónico en niveles bajos.

ABSTRACT

This paper presents a statistic of the frequency of snow-fall occurred over the southeast of Buenos Aires province over a 35 year period (1960-2004). Considering present weather information 32 events were found and only 7 events show snow over more than one synoptic station.

A synoptic climatology of the cold air incursions that are responsible for snow-fall in the study region is shown in order to understand the circulation patterns. Atmospheric circulation patterns are characterized by extreme anomalies linked to the trough associated to cold front and the ridge in post-frontal areas that denote the intensity of these systems,. The anomalies field of geopotencial height shows a negative extreme over the frontal trough in the cases of generalized snow duplicate the intensity in cases with isolated snow. The intense cyclonic regime favors the convergence at low levels and the strong cooling, evident in the anomalies of temperature at mid-levels, indicating the instability generated in the air mass that is lead towards the northern Patagonian coast and the Argentinean Sea.

A case study of a generalized snow-fall related to a strong cold air incursion occurred on 10 July 2004 over the Southeast coast of the Buenos Aires province. The synoptic situation is analyzed in relation to the long period sample and the polar air mass evolution is characterized using RAMS model in a diagnostic mode. The snow-fall is related to a persistent destabilization favored by heating and moisturizing in a prevalently maritime trajectory and by convergence in a cyclonic regime.

1. INTRODUCCIÓN

Las nevadas en la costa de la provincia de Buenos Aires son fenómenos que ocurren en forma esporádica. En general se encuentran asociadas a incursiones de masas de aire de origen polar o antártico que alcanzan latitudes medias y subtropicales. Estos ingresos se producen detrás de frentes fríos que pueden alcanzar latitudes muy bajas y eventualmente pueden producir nevadas en las provincias centrales y del noroeste de Argentina, como así también en las zonas altas del sur de Brasil.

Las incursiones de aire frío de invierno y verano han sido ampliamente estudiadas por Garreaud (1999, 2000) quien discute los mecanismos físicos responsables de estas incursiones. También se centraron en el estudio de las situaciones sinópticas asociadas a extremos de temperaturas en la Argentina los trabajos de Scian (1970), Escobar y Bischoff (1999), Rusticucci y Vargas (1995 y 1993), Vera y otros (2002), Pezza y Ambrizzi (2005 a y b), entre muchos otros. Numerosos trabajos muestran la influencia de las heladas en la zona de la pampa húmeda argentina, como así también en la zona sur de Brasil donde las situaciones han sido ampliamente estudiadas debido al fuerte impacto sobre la agricultura del área. Este fenómeno ha sido analizado y documentado en numerosos trabajos entre los que se destacan Seluchi y Nery (1992), Marengo y otros (1997), Vera y Vigliarolo (2000), Müller y otros (2003), Müller (2005); Fernández Long (2005). Estos trabajos abordan fundamentalmente el tipo de situación sinóptica que genera estos eventos de alto impacto en la agricultura en la región. Por su parte, hasta el momento no se han realizado en el país estudios sobre las características particulares de la circulación atmosférica asociada a las incursiones de aire frío que son responsables de nevadas en regiones que se encuentran a nivel del mar, donde este fenómeno es muy poco frecuente. En Brasil existe bibliografía que destaca la ocurrencia de nevadas sobre las sierras de los estados de Río Grande del Sur y Santa Catalina. Souza (1998 a, b y 2002) encuentra que la presencia de nieve en estas regiones está asociada con el pasaje de un anticiclón migratorio que se localiza sobre el continente y un importante ciclón sobre el sur de la costa brasilera produciendo un importante flujo del sur, pero los trabajos mencionados no destacan la presencia de nieve en las áreas cercanas a nivel del mar. Pezza y Ambrizzi (2005, b) analizan numerosas situaciones de incursiones de aire frío sobre Argentina y Brasil ocurridas entre los años 1888 hasta 2003 destacando una situación sinóptica similar a la detectada en los trabajos de Souza y recalcando la importancia del anticiclón migratorio en los eventos detectados.

El foco de interés del presente trabajo se centra en primer lugar en desarrollar una climatología de los aspectos generales de la circulación y la estructura termodinámica de las situaciones asociadas a nevadas en el centro-este de la provincia de Buenos Aires. Con el fin de avanzar en la comprensión de los mecanismos particulares que generan las nevadas en la costa bonaerense, se estudia un caso particular ocurrido durante la madrugada y primeras horas del 10 de julio de 2004 en las costas de Mar del Plata y alrededores, durante el cual las playas y toda el área costera se cubrió con un manto blanco. Referido a este evento, el objetivo del presente trabajo es describir los cambios experimentados en la masa de aire y los procesos dinámicos y termodinámicos que posibilitaron la formación de la nieve, utilizando el modelo "Sistema de Modelado Atmosférico Regional" (RAMS) como herramienta de diagnóstico.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

La frecuencia de ocurrencia de las nevadas en el sudeste bonaerense se calcularon utilizando los reportes de tiempo significativo de las estaciones de superficie pertenecientes al Servicio

Meteorológico Nacional (SMN) y al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) correspondientes al período 1960-2004, Se seleccionaron las estaciones que presentan los registros más completos en dicho período: Mar del Plata (MDP), Tres Arroyos (TRA), Azul (AZ), Olavarría (OL), Balcarce (BAL), Necochea (NE), Tandil (TAN) y Coronel Suárez (CS). En la Tabla 1 se incluyen las coordenadas geográficas y la altura de las estaciones mencionadas.

Estación	**Latitud (S)**	**Longitud (O)**	**Altura (m)**
Mar del Plata	37º 56′	57º 35′	21
Tres Arroyos	38º 20′	60º 15′	115
Azul	36º 50′	59º 53′	147
Olavarría	36º 53′	60º 13′	166
Balcarce	37º 45′	58º 18′	130
Necochea	38º 34′	58º 42′	8
Cnel. Suarez	37º 26′	61º 53′	233
Tandil	37º 14′	59º 15′	175

Tabla 1: Ubicación geográfica de las estaciones sinópticas utilizadas.

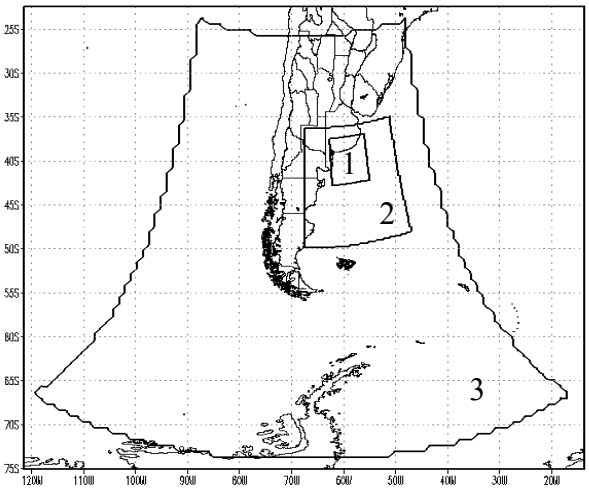


Figura 1: Dominios anidados utilizados por el modelo RAMS en la simulación.

A fin de analizar los campos de circulación asociados a los casos de nevadas detectados durante el período 1960-2004, se utilizaron los campos de altura geopotencial y temperatura en diferentes niveles de presión a las 12 UTC utilizando los reanálisis elaborados por el National Center of Environmental Prediction (NCEP) con una resolución horizontal de 2,5°.

La simulación numérica del caso particular de estudio seleccionado (evento de nevada ocurrido el 10 de julio de 2004) se realizó utilizando el RAMS como herramienta de diagnóstico. El RAMS es un modelo atmosférico de mesoescala de última generación que ha sido utilizado en Sudamérica en numerosas aplicaciones (Saulo et al, 2006; Nicolini y otros, 2005; García Skabar y Nicolini, 2006; entre muchos otros trabajos). Es un modelo no-hidrostático, con capacidad de anidado interactivo. Los diferentes procesos físicos que se encuentran representados por distintas parametrizaciones, incluyen la radiación, la convección profunda y somera, la turbulencia y los procesos en la superficie terrestre. Incorpora datos de topografía (resolución de aproximadamente 1 km), de uso de suelo (resolución de 1km), de tipos de suelo (resolución de 5 km) y de temperaturas semanales de la superficie del mar. Una descripción general de todos los procesos físicos incluidos en el modelo RAMS se pueden encontrar en Cotton y otros (2003). La versión del modelo RAMS utilizada en este caso de estudio es la versión Brazilian RAMS-3.2 (BRAMS-3.2) que incluye diferentes mejoras respecto a la versión original, principalmente la inclusión de la coordenada vertical que interseca el terreno llamada "shaved-eta", alternativa más apropiada para regiones con topografía compleja como la Cordillera de los Andes (Tremback y Walko, 2004), la parametrización de la convección somera (Souza y Emerson, 2002) y también diferentes opciones para la parametrización de la convección profunda (Grell, 1993). Para representar el caso de estudio se realizó una simulación de 72 horas, comenzando el 8 de julio a las 12 UTC. Las condiciones iniciales y de borde fueron obtenidas de los análisis operativos Global Data Assimilation System (GDAS) provenientes del NCEP, los cuales tienen una resolución horizontal de 1º en latitud y longitud y una resolución temporal de 6 horas. La simulación numérica se configuró con 3 dominios anidados, con resolución horizontal de 80, 20 y 5 km (Fig. 1), 30 niveles verticales en la atmósfera y 9 niveles en

el suelo. En el dominio de mayor resolución no se activaron las parametrizaciones de la convección. En todos los dominios se utilizó un esquema "bulk water" para la representación de la microfísica, con una subdivisión del agua en ocho especies diferentes (las especies representadas por el modelo son: vapor de agua, agua de nube, hielo prístino, nieve, agregados, graupel, granizo y agua de lluvia).

A fin de conocer el origen de la masa de aire que irrumpió sobre las costas bonaerenses y poder estudiar los posibles procesos que intervinieron en su modificación se utilizó el modelo de cálculo de trayectorias HYSPLIT 4 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) desarrollado por el Enviromental Research Laboratory de la Nacional Oceanic and Atmospheric Administration (Draxler y Hess, 2004). Este modelo permite el cálculo de trayectorias siguiendo una parcela a partir de los resultados de una simulación numérica mediante interpolaciones en 4 dimensiones (espacio y tiempo) del campo de velocidades. Una descripción del modelo se encuentra disponible en http://www.arl.noaa.gov/hysplit.html. Este modelo de trayectorias fue alimentado con los diagnósticos del modelo RAMS cada 3 horas, en el dominio de menor resolución (80 km), que cubre la mayor extensión horizontal (Fig. 1). Para alcanzar este fin se ejecutó el modelo HYSPLIT en modo "backward" o "hacia atrás", utilizando el campo tridimensional de movimiento a fin de conocer la posición de la partícula sometida a un desplazamiento advectivo.

3. NEVADAS EN EL SUDESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES: CLIMATOLOGÍA SINÓPTICA.

Durante el período analizado, 1960-2004, se registraron 32 eventos de nevada en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. La Tabla 2 resume la distribución mensual de los eventos registrados en el período de estudio. Estas frecuencias confirman que se trata de un fenómeno no habitual en esta región y que su ocurrencia se limita al período mayo-setiembre.

En este trabajo se define un evento de nieve generalizada (NG) cuando más de una de las estaciones utilizadas reportó nieve o bien hubo una misma estación que reportó nieve durante dos días consecutivos, mientras que los otros eventos se definen como nieve aislada (NA). De los 32 eventos de nevadas registrados en los 35 años analizados, sólo 7 corresponden a eventos de nieve generalizada como se detalla en la Tabla 3.
Con el fin de caracterizar la circulación atmosférica y los aspectos termodinámicos asociados a las dos categorías de eventos NG y NA, se realizó por separado la composición de los campos de altura geopotencial y de temperatura correspondientes a los días de ocurrencia de cada una de las categorías. Se obtuvieron además los campos de anomalías calculadas respecto del día climatológico, definido como la media de cada día de la muestra de tiempo estudiada a fin de aislar la onda anual de cada serie.

Meses	**Número de casos**
Mayo	1
Junio	8
Julio	11
Agosto	9
Septiembre	3

Tabla 2: Distribución mensual de los eventos de nevadas en el sudeste bonaerense para el período 1960-2004

Las Figuras 2 y 3 muestran la composición de los campos de altura geopotencial y espesor 1000/500 hPa para los casos de NG y NA respectivamente. La diferencia fundamental tanto en el nivel de 1000 como en 850 hPa entre ambos grupos de situaciones (Fig. 2.a a 2.d, 3.a a 3.d) radica en la intensidad tanto de la vaguada asociada al frente frío sobre el norte de Argentina y sur de Brasil como del anticiclón posfrontal. El aumento en la intensidad de ambos patrones con anomalías extremas que exceden los 120 mgp en 850 hPa y los 200 mgp en 500 hPa en el caso de eventos de NG, como así también de una mayor curvatura ciclónica de las isohipsas sobre la trayectoria atlántica, favorecen la convergencia en niveles bajos. Estas condiciones benefician a la inestabilidad de la masa de aire, posibilitando la formación de precipitación, ya sea sólida, líquida, o ambas durante los casos de NG. Para los casos de NG se observa en el nivel de 500 hPa (Fig. 2.e, 2.f, 3.e y 3.f) una inclinación del

eje de vaguada en la dirección NO-SE que conjuntamente con la intensa cuña a barlovento de los Andes favorecen una corriente conducente del sector sur sobre la costa patagónica y el Mar Argentino que se observa hasta la provincia de Buenos Aires. Un patrón similar a este último presenta el campo de 250 hPa (figura no mostrada). Por otro lado, los eventos de NA presentan una configuración de cuña-vaguada más débil. Si bien las anomalías negativas de altura geopotencial en todos los niveles analizados son más débiles en estos casos, su posición es similar a la correspondiente a los eventos de NG. Las diferencias más importantes se observan en las anomalías positivas que están posicionadas en la misma longitud pero 10º más al sur.

Nro evento	Día	Mes	Año	Estaciones
1	25	6	1960	AZ
2	4	8	1963	BAL
3	20	5	1965	CS
4	10	7	1965	NE
5	19	7	1966	AZ
6	1	9	1966	TRA
7*	11/13	6	1967	CS, MDP, TRA
8	15	6	1971	NE
9	22	6	1971	AZ
10	3	8	1972	NE
11	16	7	1973	TRA
12	14	3	1974	CS
13	31	8	1974	TRA
14 *	15/16	7	1975	CS, MDP, AZ, TAN, TRA
15	25	7	1975	NE
16	5	8	1975	CS

Nro evento	Día	Mes	Año	Estaciones
17	23	6	1977	CS
18	1	7	1980	TRA
19	14	7	1980	MDP
20	27	6	1984	BAL
21 *	19/20	7	1990	BAL (ambos días)
22	31	8	1990	BAL
23	12	9	1990	BAL
24 *	31/1	7/8	1991	CS, BAL, TRA, MDP, TAN
25	27	6	1994	MDP
26 *	7/8	7	1994	TAN, MDP
27	3	8	1995	MDP
28	27	6	1996	TRA
29	4	8	1997	TRA
30	10	9	1997	MDP
31 *	13/14	8	1999	TAN, TRA
32 *	10	7	2004	MDP, TRA

Tabla 3: Fecha de los eventos de nieve estudiados y estaciones que los registraron. Los eventos de nieve generalizada fueron indicados con un asterisco (*).

El campo térmico (Fig. 4) presenta importantes anomalías tanto positivas como negativas en todos los niveles troposféricos con un comportamiento similar al de las alturas geopotenciales. Las anomalías frías más profundas en los niveles medios en los casos de NG indican la presencia de una mayor inestabilidad en la atmósfera dominante en el área. El comportamiento de los campos de espesor 1000/500 hPa y de sus anomalías (Fig. 2.g, 2.h 3.g, 3.h es coherente con estos resultados.

Comparando el campo medio de 1000 hPa de los eventos de NA y NG con los resultados que presenta Garreaud (2000) sobre la circulación asociada a irrupciones de aire frío de invierno (día 0), se observa que en ambos grupos de eventos de nevada el anticiclón está desplazado más al sur y es más intenso. Si bien este resultado era esperable ya que este autor utilizó para seleccionar los eventos un punto de referencia situado en 25ºS-57,5ºO (cercano al extremo NE de la provincia de Formosa), la vaguada correspondiente al caso de

nieve generalizada es más intensa en latitudes más altas, lo que sumado a la posición más al sur del anticiclón lleva a un aumento en la intensidad del viento, con mayor componente del sur sobre el centro del país. Diferencias similares también se encuentran en niveles altos.

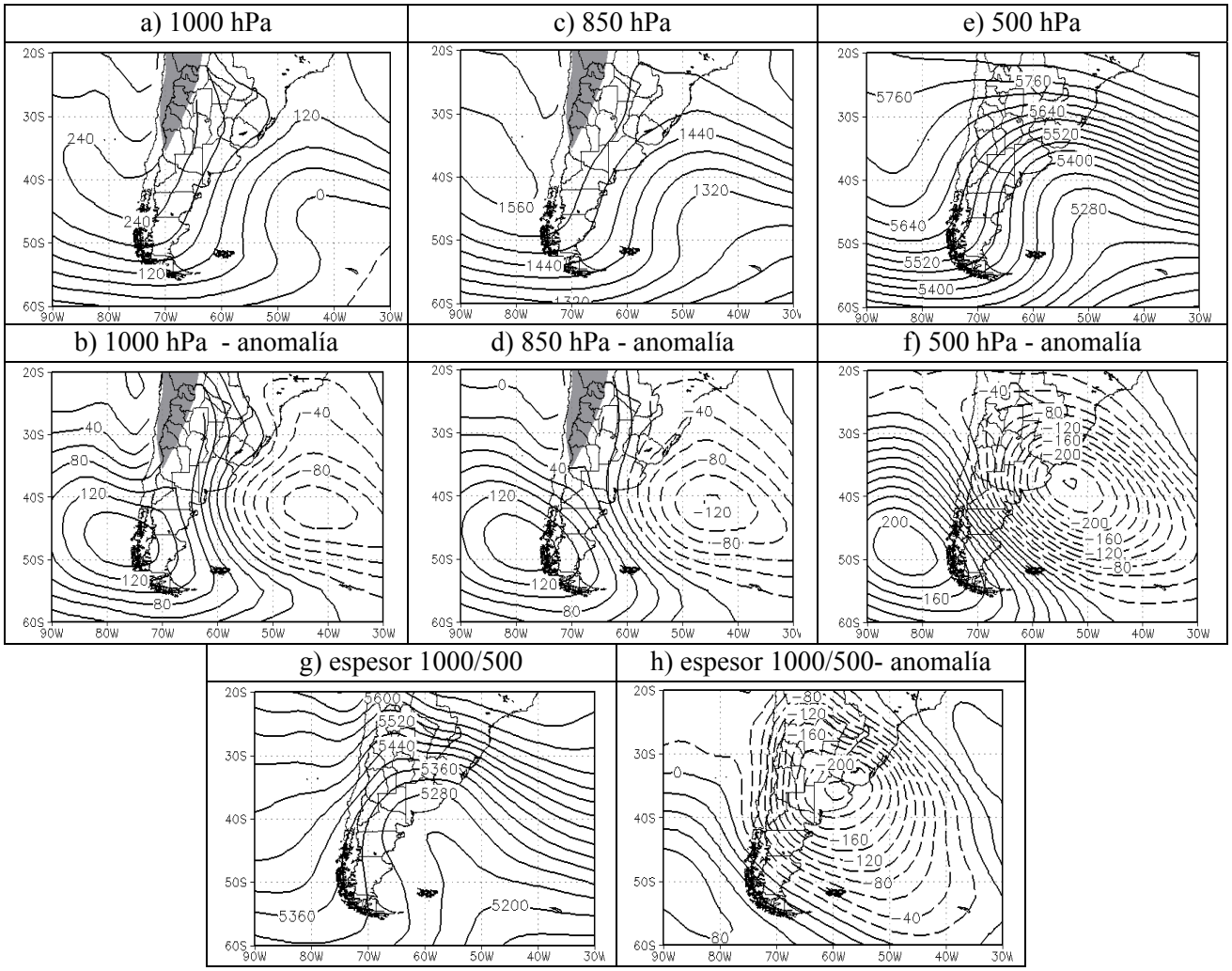


Figura 2: Campos medios de altura geopotencial y de sus anomalías para la composición de los eventos de nieve generalizada.

4. CASO DE ESTUDIO: 10 DE JULIO DE 2004

4.1 Evolución de la situación sinóptica en el período 8-10 de Julio de 2004

La situación sinóptica asociada al caso de estudio de nieve generalizada, muestra durante los días de la simulación una estructura aproximadamente cuasi-estacionaria en niveles bajos. El día 8 de Julio de 2004 a las 12 UTC la zona central de Argentina se encuentra dominada por vientos del sector sudoeste (Fig. 5.a). Un frente frío se ubica sobre Paraguay y sur de Brasil que se conecta con una zona de baja presión en el Atlántico Sur localizada en 51°S - 45°O (este frente no se destaca en las figuras mostradas dada la extensión meridional de la figura). El norte de Argentina está dominado por el anticiclón posfrontal, que con el correr de las horas se debilita aunque manteniéndose estacionario sobre el noreste de Argentina. Otro sistema de baja presión se localiza en 60°S - 68°O, que junto con el anticiclón al oeste del mismo (no observable en la presente figura) producen un importante flujo de aire polar hacia el sector sudoeste de los fiordos chilenos y sur de Argentina. Los campos obtenidos por el modelo RAMS no presentan diferencias significativas respecto de los correspondientes al

GDAS (Fig. 5.a, c y e) en cuanto a la posición de los sistemas de presión, aunque el RAMS tiende a simular una intensidad menor a la indicada por el análisis.

El día 9 de Julio de 2004 a las 12 UTC (Fig. 5.c) los sistemas de alta y baja presión que se encontraban en latitudes polares se desplazan al norte trasladando el flujo del sector sudoeste a toda la Patagonia y centro de Argentina. Este flujo persiste durante los días siguientes alcanzando su máxima intensidad el 10 de Julio de 2004 a las 12 UTC (Fig. 5.e), tiempo de ocurrencia de la nevada.

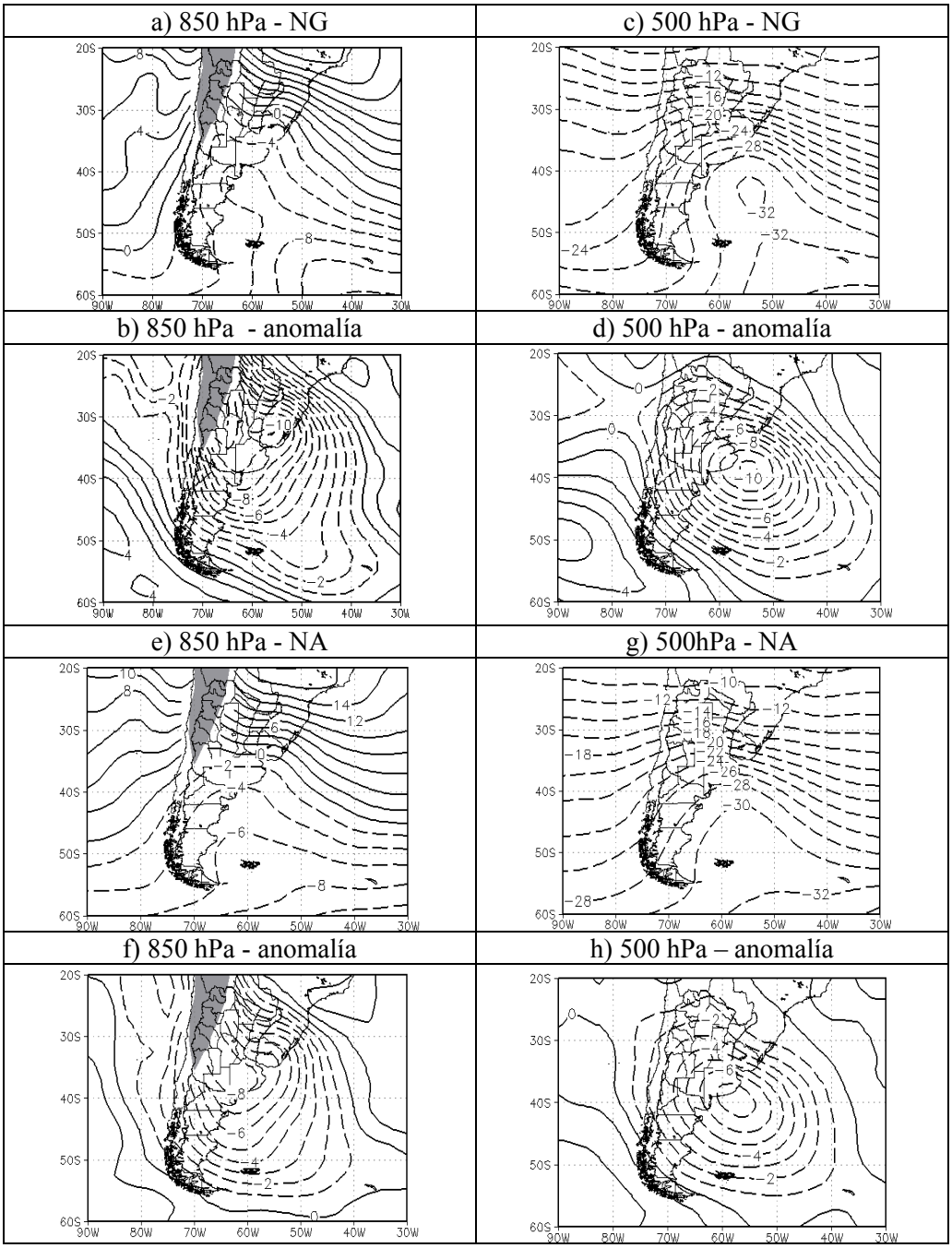


Figura 4: Campos medios de temperatura (ºC) y de sus anomalías para la composición de los eventos de nieve generalizada (panel superior) y de nieve aislada (panel inferior).

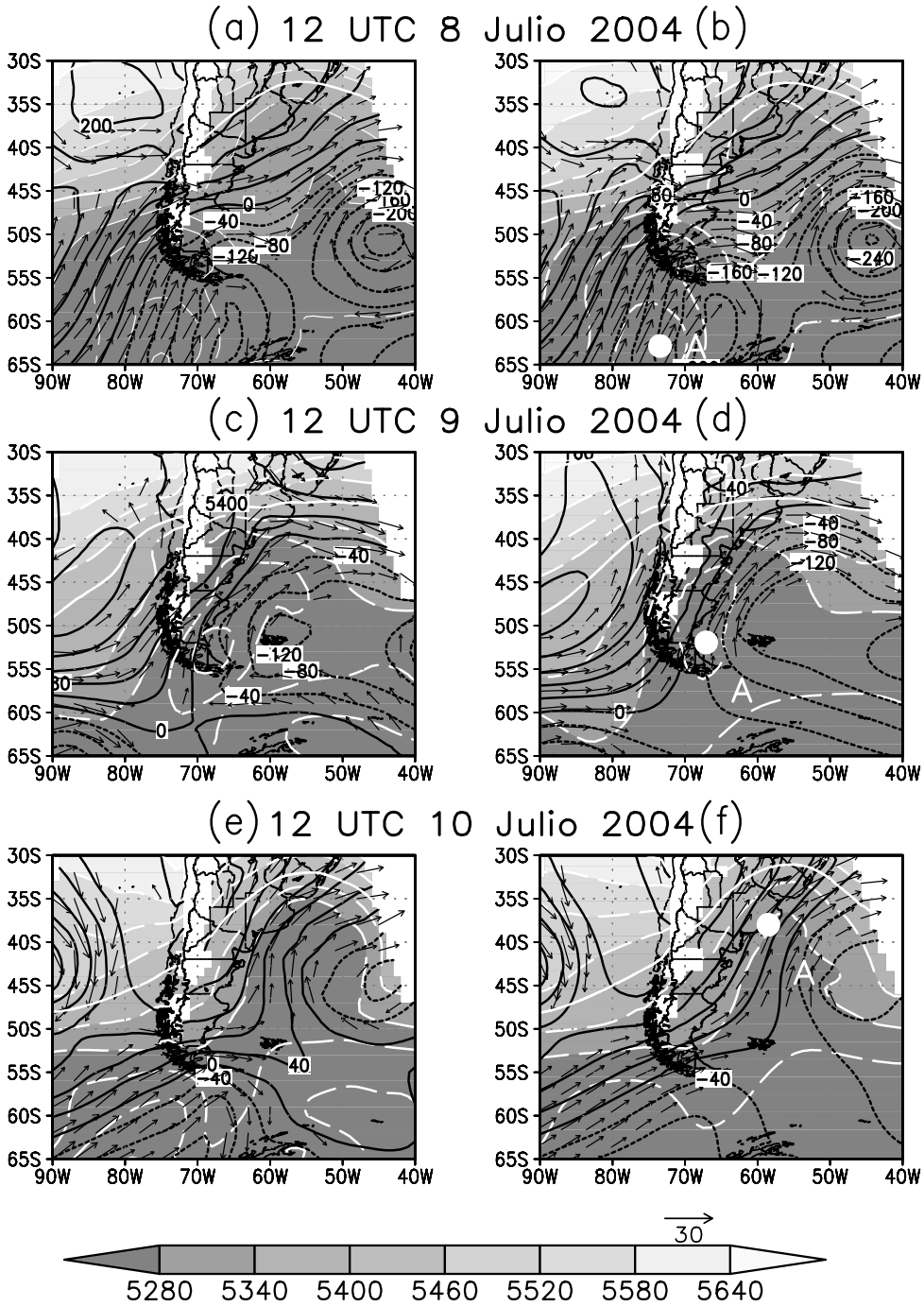


Figura 5: Campo de geopotencial en 1000 hPa (contornos), viento en 950 hPa (vectores, mayores a 10 ms^{-1}) y espesor 1000/500 hPa (sombreado), correspondientes a los datos del GDAS (Figura a, c y e) y del dominio 1 del RAMS (Figuras b, d y f). Los círculos blancos muestran la posición de la parcela que alcanza Mar del Plata el 10 de Julio de 2004 a las 12 UTC. Las zonas donde la orografía supera los 1000 m ha sido enmascarada.

El campo de espesores 1000/500 durante todo el período de estudio presenta valores inferiores a los 5400 mgp en la costa bonaerense y temperaturas potenciales equivalentes en 850 hPa (figura no mostrada) inferiores a los 290 K lo cual denota la presencia de aire polar en la región. Cabe destacar que el campo de espesores alcanza valores inferiores a los 5280 mgp el día 10 de Julio de 2004.

En la Figura 6, el campo de geopotencial en 500 hPa muestra la evolución de una vaguada, con un núcleo frío de -30º C durante el período de estudio, que se extiende desde el sur de la Patagonia hasta una latitud cercana a Mar del Plata. El día 8 de Julio de 2004 a las 12 UTC el eje de la vaguada se

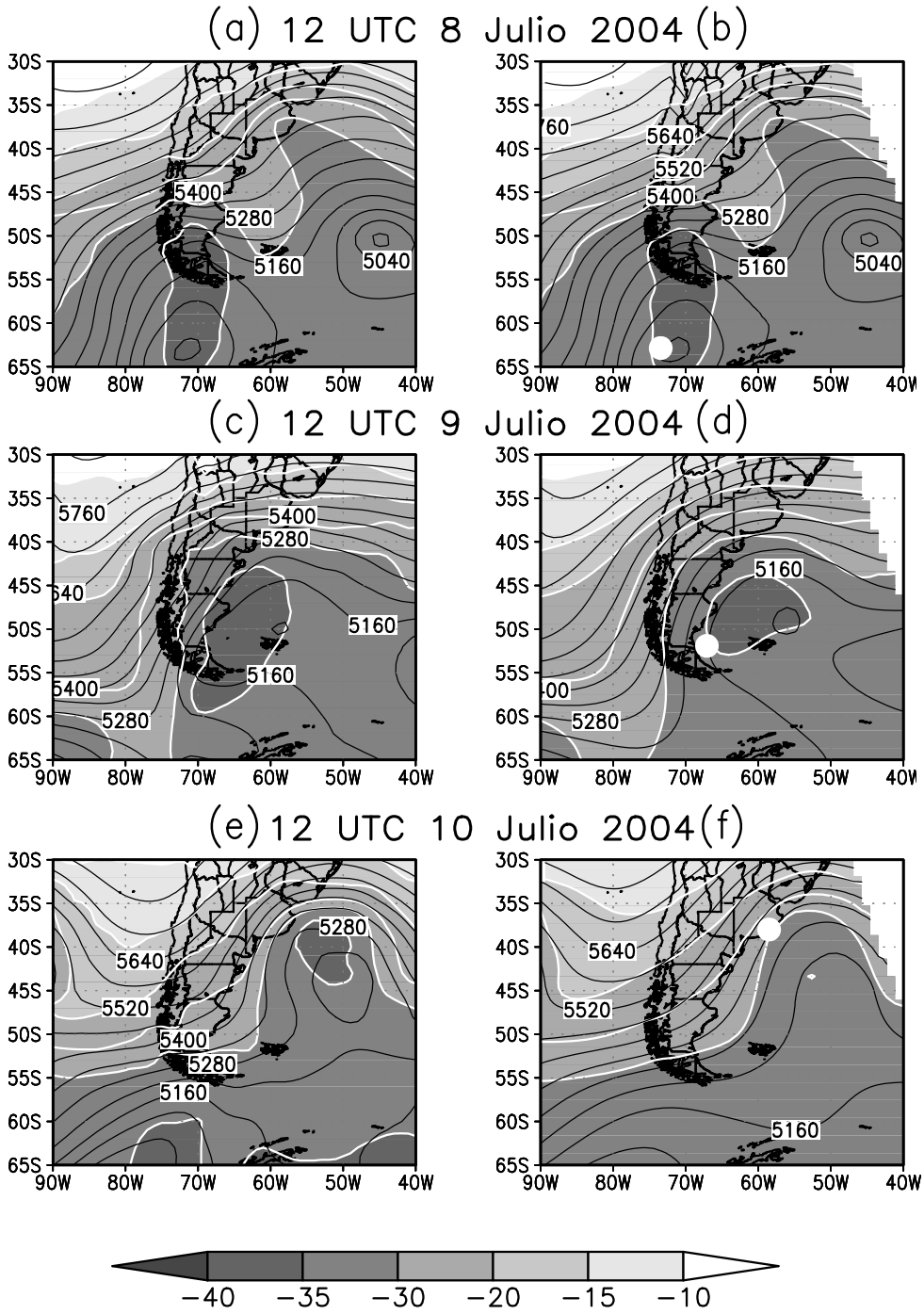


Figura 6: Campo de altura geopotencial (contornos negros) y de temperatura (sombreado) en 500 hPa correspondientes a los datos del GDAS (Figura a, c y e) y del dominio 1 del RAMS (Figuras b, d y f).

Los campos simulados por el RAMS incluyen un círculo blanco que identifica la posición de la parcela que alcanza Mar del Plata el 10 de Julio de 2004 a las 12 UTC.

ubica en 70°O, sobre el pasaje de Drake. El día 9 de Julio de 2004 a las 12 UTC presenta su eje con orientación noroeste – sudeste hacia el oeste de Mar del Plata y dada su ubicación favorece la advección de vorticidad ciclónica en niveles medios. A las 12 UTC del día 10 de Julio de 2004 la vaguada evoluciona hacia el este de Mar del Plata quedando la región de estudio influenciada por la parte delantera de una cuña que avanza desde el Océano Pacífico. Los análisis del GDAS frente a la simulación del modelo RAMS presentan un comportamiento similar a pesar de algunas diferencias importantes presentes el día 10 de Julio donde el RAMS subestima ligeramente el mínimo de temperaturas sobre el área de Mar del Plata y en latitudes mayores a 60ºS. Asimismo el modelo

RAMS simula el sistema ciclónico en 1000 hPa sobre el Océano Atlántico con menor curvatura que los análisis del GDAS, esto hace que la circulación ciclónica sobre la provincia de Buenos Aires simulada por el RAMS sea más débil a la representada por el GDAS y por ende una menor representación de la inestabilidad sobre el área.

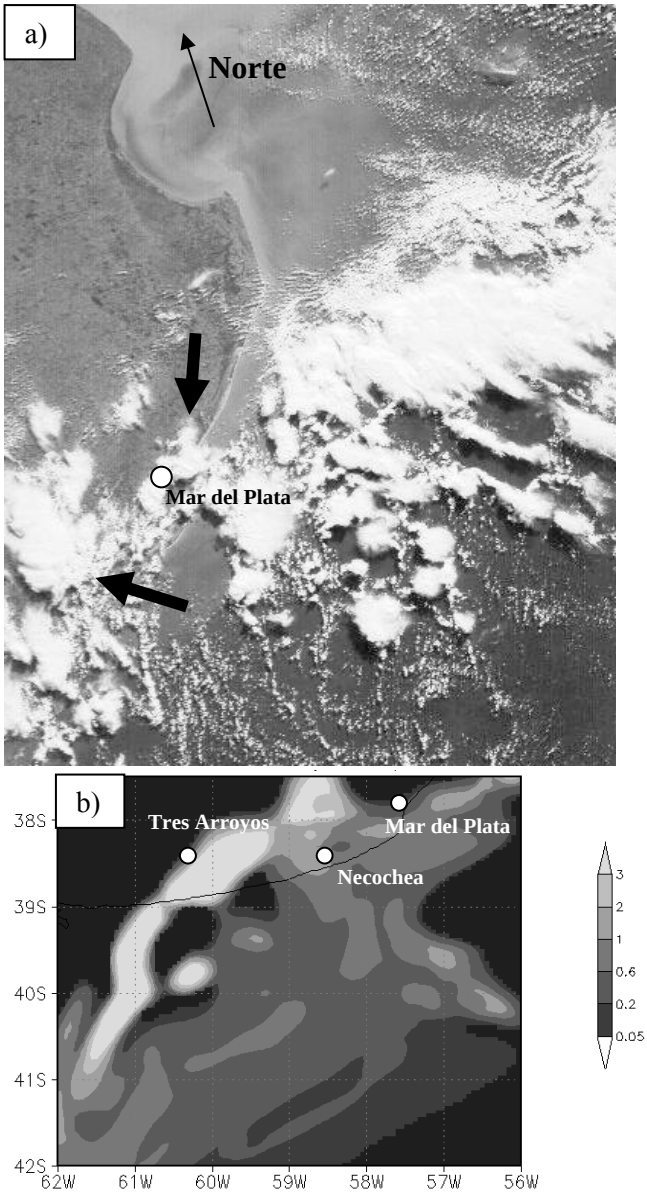
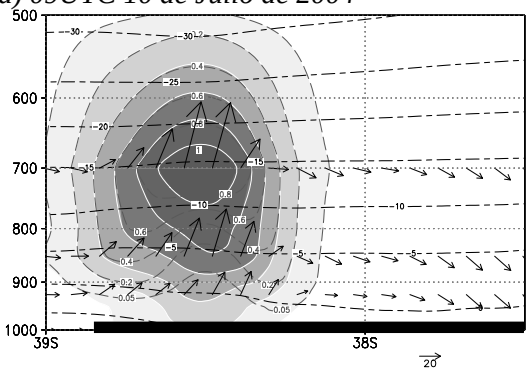
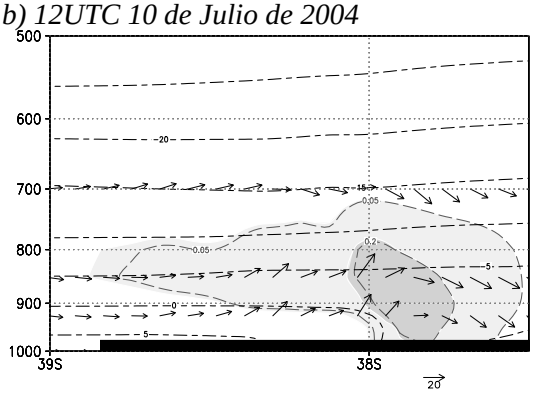


Figura 7: a) Imagen del campo nuboso del satélite SAC-C correspondiente a las 13:33 UTC, extraída de la página www.conae.gov.ar; b) Relación de mezcla total de hielo más agua líquida (g kg^{-1}), integrada entre superficie y 500 hPa, (correspondiente al dominio 3 del RAMS) a las 12 UTC del 10 de Julio de 2004.

a) 09UTC 10 de Julio de 2004



b) 12UTC 10 de Julio de 2004



c) 15UTC 10 de Julio de 2004

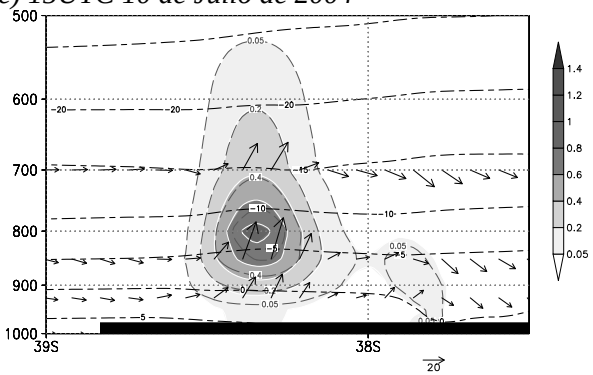


Figura 8: Corte vertical en 59ºS de la mezcla total de hielo más agua líquida (g kg^{-1}) (sombreado a partir de 0.05), de nieve más agregados (g kg^{-1}) (líneas grises), temperatura (ºC) (líneas negras cortadas), y circulación meridional compuesta por la velocidad ascendente en cm s^{-1} y la componente meridional en m s^{-1} (vectores), correspondientes al dominio 3 del RAMS, el 10 de Julio de 2004, a) a las 9 UTC, b) 12 UTC y c) 15 UTC. El área continental ha sido marcada con un segmento negro en cada corte vertical.

4.2 Evidencias de formación de la nieve por el Modelo RAMS

En la figura 7.a se presenta el campo de nubes observado por el satélite SAC-C, correspondiente a la hora 13:33 UTC del 10 de Julio de 2004. Esta

imagen, muestra la presencia de un campo nuboso conformado por numerosos celulares abiertos en toda la zona adyacente a Mar del Plata, destacándose dos regiones donde la nubosidad se concentra (indicadas con una flecha en el gráfico). El campo de nubosidad localizado hacia el sur de Mar del Plata muestra una mayor incursión sobre el continente, mientras el cercano a esta ciudad se mantiene principalmente sobre la costa y hacia el mar.

El modelo RAMS en el dominio 3, el de mayor resolución, muestra a las 12UTC del mismo día la presencia de un extremo en la relación de mezcla de agua líquida más hielo integrada entre superficie y 500 hPa (Fig. 7.b) que presenta una estructura de arco. La comparación de las Figuras 7a y 7b indica que la simulación ha sido capaz de reproducir la presencia de nubosidad en la costa bonaerense y esta nubosidad incluye a localidades donde se ha observado la ocurrencia de nieve en superficie, tanto sea en la zona de Mar del Plata como en Tres Arroyos.

La evolución temporal del corte vertical en 59°O (Fig. 8) previo al desarrollo de la nevada en la costa de Mar del Plata muestra la relación de mezcla de agua líquida y partículas de nieve y agregados. En horas de la mañana del 10 de Julio de 2004 es posible detectar una celda nubosa sobre el mar con importantes velocidades ascensionales y un influjo en la misma desde el sector sur (Fig. 8.a). Este sistema se extiende en la vertical hasta alrededor de 500 hPa y la precipitación asociada alcanza la superficie con temperaturas inferiores a 5°C. El campo nuboso evoluciona mostrando a las 12 UTC la presencia de la celda sobre el continente si bien su intensidad, desarrollo vertical y contenido de agua líquida son menores. Interesa destacar la presencia de temperaturas inferiores a 0ºC en superficie en la zona de precipitación sólida por debajo del sistema, reproduciendo la cobertura de nieve en esta región (Fig. 8.b). Si bien la relación de mezcla total de hielo simulado por el modelo presenta un valor pequeño, es importante notar que se desconoce el valor total de nieve acumulada en superficie dado que las estaciones meteorológicas de la región no miden la acumulación de esta variable, pero observaciones visuales indicaron la presencia de una fina cobertura en las playas. Tres horas después

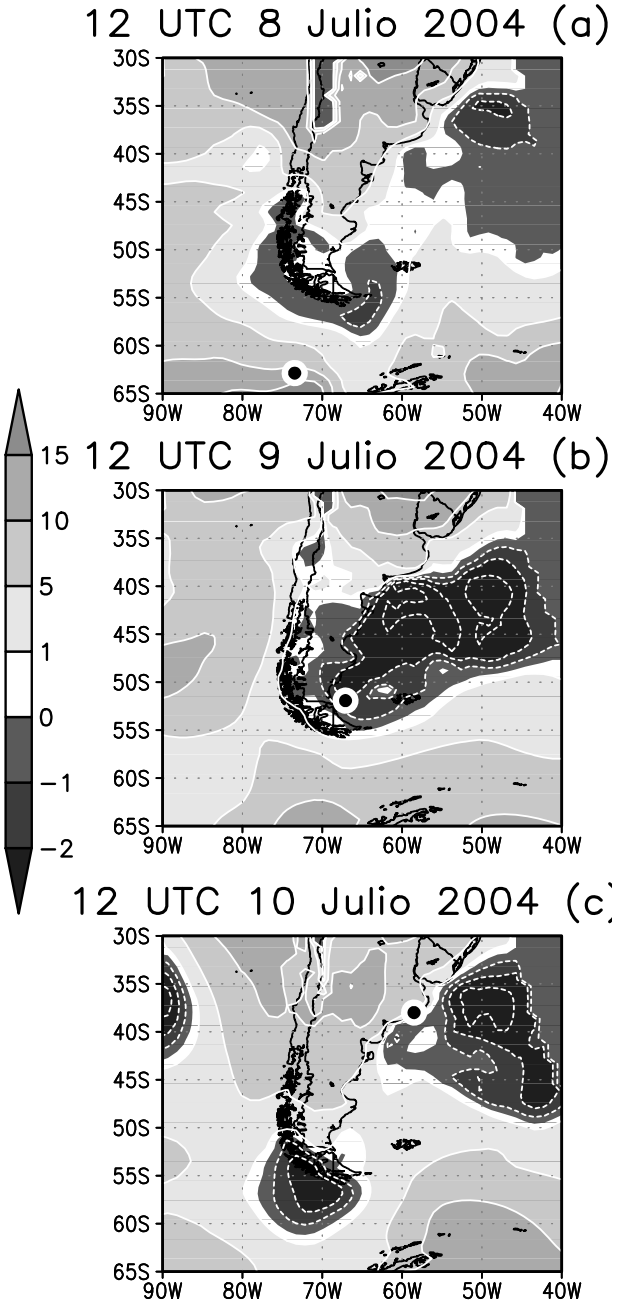


Figura 9: Lifted Index calculado como la diferencia entre la T de la parcela ascendida desde superficie y la del entorno en el nivel de 700 hPa, correspondientes al dominio 1 del RAMS. Valores sombreados en intervalos irregulares, gris oscuro para valores negativos y gris claro para valores positivos. El círculo negro indica la posición de la parcela que alcanza Mar del Plata el 10 de Julio de 2004 a las 12 UTC.

(15UTC del 10 de Julio de 2004), la simulación continua generando nuevos desarrollos sobre el mar en concordancia con la inestabilidad de la

masa de aire y la observación de los celulares abiertos, últimos vestigios de la presencia de este sistema nuboso predominantemente frío.

El carácter convectivo de la nubosidad asociada a la nevada sobre la costa, está vinculado a inestabilidad restringida a los niveles bajos y medios de la atmósfera. Esto es consistente con el moderado desarrollo vertical de la nubosidad simulada por el modelo. Esta inestabilidad no es capturada por índices como el Lifted Index dado que cerca del nivel de 500 hPa, la temperatura de la parcela ascendida desde la superficie costera resulta ser ligeramente inferior a la del entorno indicando una estratificación estable. Sin embargo, si consideramos la diferencia entre la temperatura de la parcela ascendida desde superficie y la del entorno en el nivel de 700 hPa, encontramos valores cercanos a cero sobre la costa y negativos sobre el océano adyacente (Fig. 9). A fin de indagar en los posibles procesos que contribuyeron al desarrollo de esta inestabilidad en niveles bajos se realizó un seguimiento lagrangiano de las parcelas de aire involucradas en el evento de nevada correspondiente a julio de 2004.

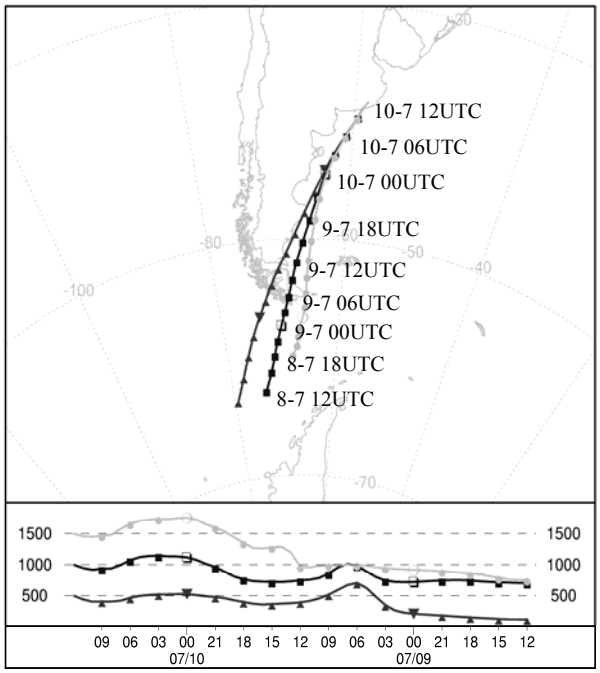


Figura 10: Trayectorias de las parcelas de aire que alcanzan la zona de Mar del Plata el día 10 de julio de 2004 a las 12 UTC en los niveles de 500 (gris oscuro - triángulos), 1000 (negro - cuadrados) y 1500 m (gris claro – círculos).

4.3. Análisis de trayectorias y evolución de la estructura térmica vertical de la masa de aire

El modelo de trayectoria HYSPLIT 4, alimentado por el campo de movimiento del modelo RAMS ha permitido reconstruir las trayectorias de las parcelas que alcanzan el día 10 de julio de 2004 a las 12UTC en tres niveles verticales diferentes (500, 1000 y 1500 m, ver Fig. 10) a la ciudad de Mar del Plata . Las tres trayectorias se originan en el centro del pasaje de Drake, presentando en todos los casos una leve curvatura ciclónica. En particular la trayectoria que alcanza los 1000 m de altura parte de 750 m al momento de su inicio y presenta un movimiento ascendente acorde con el paso de la cordillera. Es importante destacar que en la región donde la parcela atraviesa la cordillera ésta no supera los 700 m de altura en promedio. A fin de estudiar la evolución que experimenta la masa de aire en su recorrido desde latitudes polares hasta latitudes medias se han graficado los sondeos verticales de temperatura (T) y temperatura de rocío (T_d) cada 6 horas, a partir de las simulaciones del RAMS y en los puntos señalados en la Figura 10 para la trayectoria de la parcela que finaliza a 1000 m de altura.

El sondeo del día 8 de Julio a las 12UTC presenta una capa mezclada desde superficie hasta los 870 hPa con una temperatura en superficie de -7°C y -15°C de temperatura de rocío. Por encima de la capa mezclada se observa una inversión entre 850 y 750 hPa que inhibe el desarrollo de nubosidad. Al cabo de 6 horas la parcela se ha desplazado hacia el norte y, acorde al aumento en la temperatura de la superficie del mar (figura no mostrada), la masa de aire sufre un calentamiento y humedecimiento en superficie.

Este transporte de calor y humedad desde superficie produce la inestabilización de la masa de aire y por consiguiente un descenso del nivel de condensación por ascenso a 950 hPa y una extensión vertical del área positiva hasta 800 hPa. Si bien la temperatura en 700 hPa se mantiene constante, la inversión desaparece debido al calentamiento desde superficie.

A las 06UTC del 9 de Julio, antes de ingresar al continente, el sondeo presenta características aún más inestables y saturadas en una capa más

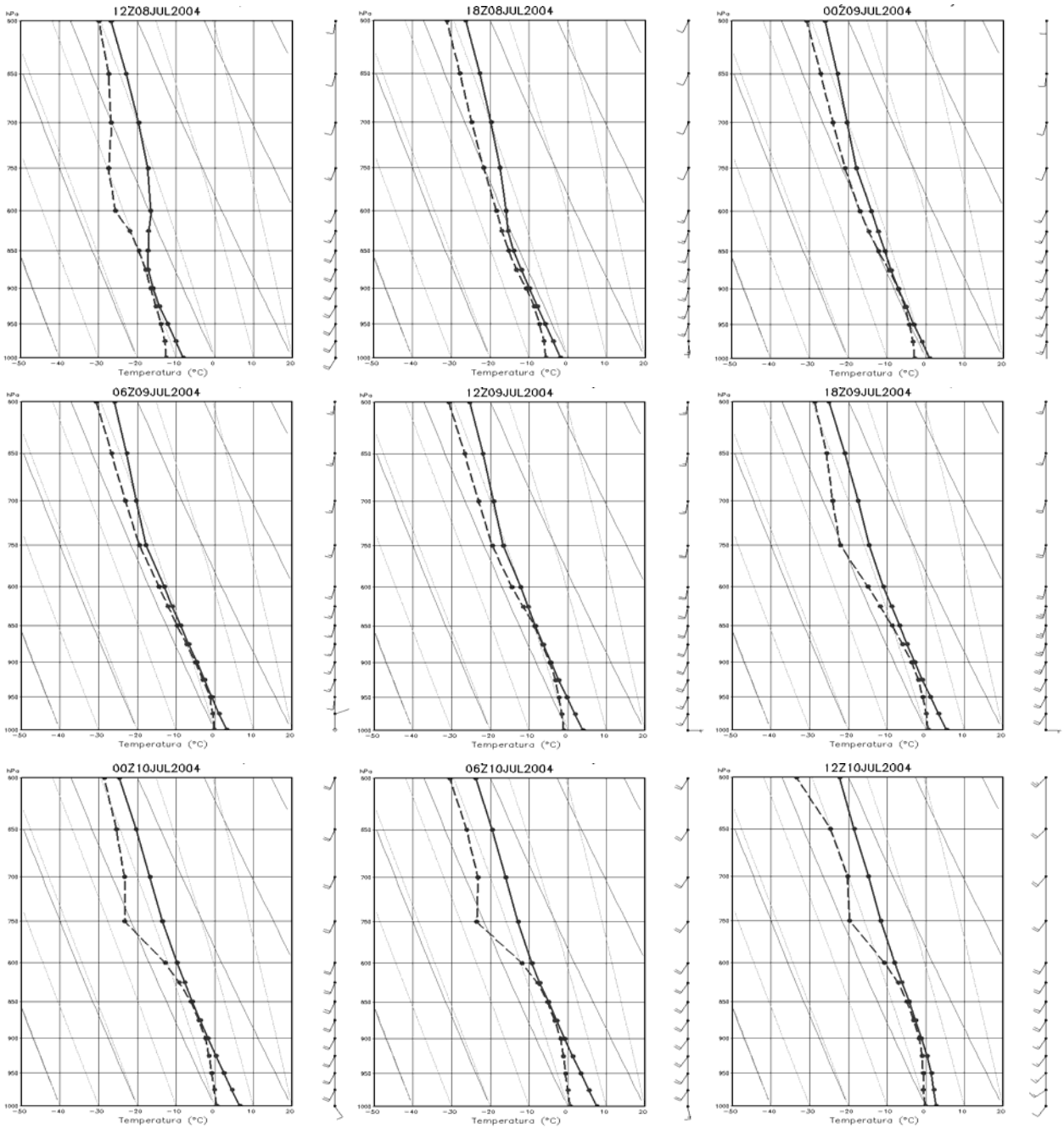


Figura 11: Sondeos de temperatura y de temperatura de rocío correspondientes al dominio 1 del RAMS en tiempos significativos (identificados en la figura 10) de la trayectoria de la parcela que arriba a Mar del Plata en el nivel de 1000 m.

profunda respecto a la estructura vertical 12 horas antes, debido al flujo sostenido de calor desde superficie en su recorrido marítimo.

El día 9 de julio a las 12Z la masa de aire se encuentra a sotavento de los Andes y ha cruzado la isla de Tierra del Fuego para entrar nuevamente al mar. El sondeo se ha calentado y secado en superficie respecto al sondeo 12 horas antes. Presenta una capa de mezcla entre superficie y 900 hPa, asociada a un empuje térmico positivo que alcanza los 650 hPa.

Entre las 18UTC del 9 de Julio y las 06UTC del 10 de Julio se observa en superficie un aumento de 2º tanto en T como en T_d, y se destaca un aumento en el espesor de la capa con empuje positivo cuyo

tope supera los 600 hPa, indicando una persistencia en la inestabilización de la masa de aire que se traslada hacia el norte sobre el mar.

A las 12UTC del 10 de julio, momento en que el modelo simula la nevada, la temperatura desciende en superficie y el perfil de temperatura alcanza un gradiente adiabático saturado denotando la presencia de una zona de ascenso saturada entre 925 y 850 hPa.

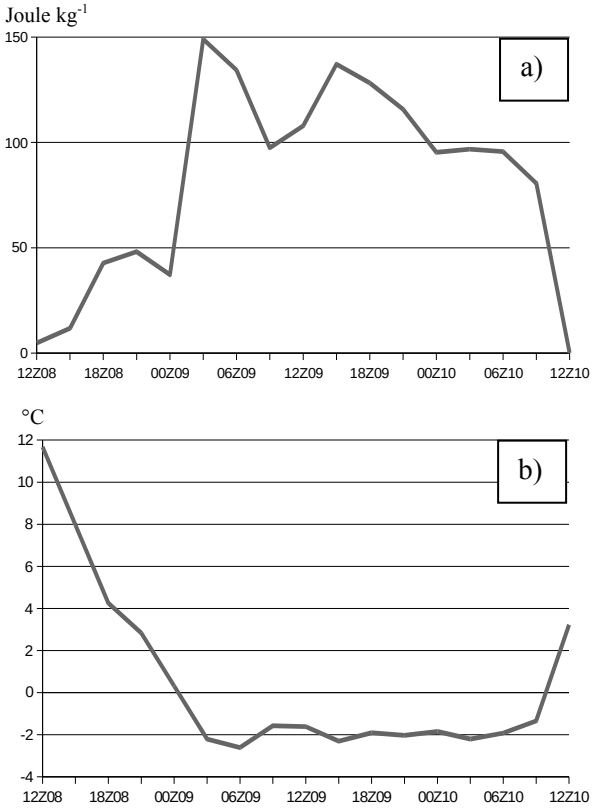


Figura 12: Evolución temporal de: (a) MUCAPE y b) Lifted Index calculado entre la parcela ascendida desde superficie y 700 hPa , siguiendo la trayectoria de la parcela de 1000 m, valores simulados en el dominio 1 del RAMS.

La figura 12 presenta la evolución del MUCAPE y el Lifted Index mencionado en la sección anterior siguiendo la trayectoria lagrangiana de la parcela de 1000 m. El MUCAPE se considera el valor del CAPE (Convective Available Potential Energy) de la parcela más inestable. Ambos esquemas muestran que a medida que la parcela se va desplazando hacia el norte, sufre una inestabilización evidente en el momento que ingresa al océano Atlántico procedente de la Patagonia (09UTC 9 Julio 2004). Esta inestabilización no está bien representada por los índices tradicionales ya que está restringida a los niveles bajos y medios de la atmósfera. No obstante, el cálculo del MUCAPE y la comparación de la temperatura de la parcela ascendida desde superficie y la del nivel de 700 hPa, permiten detectar y analizar su evolución.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se identificaron en los reportes de tiempo significativo de las estaciones de superficie pertenecientes al SMN y al INTA las nevadas ocurridas sobre el sudeste de la provincia de Buenos Aires en el período 1960-2004. Los resultados obtenidos en el período analizado (32 eventos de nevada, 7 de los cuáles corresponden a nevada generalizada definidas cuando más de una estación reportó nieve o hubo informe de nieve dos días consecutivos) confirman la baja frecuencia de este evento en la costa bonaerense.

Se han encontrado algunas características particulares de la circulación atmosférica asociada a las incursiones de aire frío que son responsables de nevadas. El análisis del campo de 1000 hPa en los casos de nieve aislada presenta el anticiclón posfrontal desplazado al sur y más intenso que en los casos de irrupciones de aire frío documentadas por Garreaud (2000). En los casos de nieve generalizada, el anticiclón posfrontal es aún más intenso e ingresa al continente en una posición más al sur respecto de los casos de nieve aislada. El eje de la vaguada presenta una orientación noroeste – sudeste, lo cual induce una circulación ciclónica sobre el sudeste bonaerense, favoreciendo la convergencia en niveles bajos. La intensidad del núcleo de anomalía negativa en las temperaturas en niveles medios, posicionado sobre la provincia de Buenos Aires, indica la inestabilidad alcanzada en la masa de aire en su trayectoria atlántica frente a las costas de la Patagonia.

La situación sinóptica correspondiente al 10 de julio de 2004 asociada a la ocurrencia de una nevada en las costas marplatenses está caracterizada por el desplazamiento de una masa de aire inestable desde el Pasaje de Drake hasta las costas bonaerenses. Esta masa de aire es conducida por un intenso flujo del sector sur generado por una zona de baja presión sobre el Atlántico Sur y un

anticiclón posfrontal que se desplaza desde el Océano Pacífico. Esta masa de aire es calentada y humedecida desde superficie en la zona del pasaje de Drake y luego atraviesa los Andes descargando parte de su humedad, aunque la precipitación generada a barlovento es escasa dada la baja altura de la cordillera. La masa de aire que se traslada hasta Mar del Plata se inestabiliza en su trayectoria hacia el norte, presentando un aumento de la energía potencial disponible para la convección, fundamentalmente una vez que atraviesa los Andes e ingresa al mar nuevamente. La inestabilización se produce principalmente debido a la inyección de humedad desde superficie y a la convergencia asociada al régimen ciclónico en niveles bajos. Por su parte las condiciones sinópticas asociadas a una vaguada en altura en la región posibilitan el ascenso y explican la formación de precipitación.

Los resultados obtenidos muestran que el modelo RAMS fue capaz de reproducir los procesos asociados a la transformación de la masa de aire en su desplazamiento hacia el noreste, en particular el incremento de la inestabilidad en niveles bajos. Sería interesante determinar en investigaciones futuras las similitudes o diferencias que pueden presentar otras situaciones conducentes a la formación de nieve sobre la costa bonaerense respecto al origen y transformación de la masa de aire. El modelo reprodujo correctamente el grado de inestabilidad de la masa de aire, pero presentó algunas deficiencias en la representación de la intensidad de los sistemas, observándose en general una estructura termodinámica más cálida que la que la mostrada por los análisis GDAS. A pesar de estos inconvenientes el desempeño del modelo RAMS como herramienta de diagnóstico en una situación invernal ha sido satisfactoria, tanto en la representación de la estructura del campo dinámico y termodinámico como en la producción del tipo de precipitación observada en forma de nieve. Es necesario diseñar y realizar experimentos numéricos futuros en los que se aumente la resolución del tercer dominio anidado, o bien se incorpore un cuarto dominio, que posibilite avanzar en la resolución de la escala nubosa y por lo tanto en la simulación de la cantidad de nieve acumulada que presentó ciertas deficiencias en la situación descripta en el presente trabajo. Algunos avances han podido desarrollarse dado que actualmente el modelo RAMS esta implementado en forma operativa en la Universidad de Buenos Aires (http://www.brams.at.fcen.uba.ar). La configuración actual del mismo ha permitido detectar algunos de los eventos de nevadas en la provincia de Buenos Aires durante el año 2007 con 24 horas de anticipación, lo cual incentiva a considerar el buen desempeño del modelo en este tipo de situaciones, aunque en todos los casos la obtención de nieve en el pronóstico fue escasa indicando la necesidad de utilizar una resolución mayor que permita resolver en forma adecuada la microfísica de las nubes y también considerar la posible implementación de un esquema de asimilación de datos de humedad que permita mejorar la representación de la atmósfera.

AGRADECIMIENTOS

Los siguientes proyectos financiaron esta investigación UBA X266, UBA TX30, UBA X264, ANPCyT PICT Nº 07 – 14420, ANPCyT PICT Nº 07 – 06671, PIP 5520 y IAI-CRN-055.

REFERENCIAS

Cotton, W.R., R.A. Pielke, Sr., R.L. Walko, G.E.Liston, C.J. Tremback, H. Jiang, R.L. McAnelly,,J.Y. Harrington, M.E. Nicholls, G.G. Carrió, J.P. McFadden, 2003: RAMS 2001: Current status and future directions. Meteor. and Atmos Physics, 82, 5-29.

Draxler, R. y G. Hess, 1999: Description of HYSPLIT_4 modeling system. NOAA Technical Memorandum. ERL-ARL-224. 28 páginas.

Escobar G. C. J. y S. Bischoff, 1999: Meteorological situations associated with significant temperatura descents in Buenos Aires: an application to the daily consumption of residential natural gas. Meteor. Applic., 6, 253-260.

Fernández Long, M. E., 2005: Las heladas que afectan a los frutales de carozo en el noreste de Buenos Aires. Tesis de Maestría en Meteorología Agrícola, Universidad de Buenos Aires. 123 páginas.

García Skabar, Y y M. Nicolini, 2006: Downscaling and assimilation of and enhanced data base in Southeastern South America. 8va

Conferencia de Meteorología y Oceanografía del Hemisferio Sur. Foz de Iguazu, Brasil, 24 al 29 de abril.

Garreaud, R., 1999: Cold air incursions over Subtropical and Tropical South America: a case study. Mon. Wea. Rev., 127, 2823-2853.

Garreaud, R., 2000: Cold air incursions over Subtropical and Tropical South America: mean structure and dynamics. Mon. Wea. Rev., 127, 2823-2853.

Grell, G. A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parametrizations. Mon. Wea. Rev., 121, 764-787.

Marengo, J., A. Cornejo, P. Satyamurty y C. Nobre, 1997: Cold surge in tropical and extratropical South America: The strong event of June 1994. Mon. Wea. Rev., 125, 2759-2786.

Müller G.V, R. H. Compagnucci, M. N. Nuñez y M. A. Salles , 2003: Spatial analysis of surface circulation associated to frost in the wet Pampas. International Journal of Climatology. 23, 943-961.

Müller G., 2005: Variabilidad interanual en la frecuencia de ocurrencia de heladas en la Pampa Húmeda y su relación con la circulación atmosférica asociada. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires. 450 páginas.

Nicolini M., M. Torres Brizuela y Y. García Skabar, 2005: Simulación de una tormenta tornádica usando un modelo de mesoescala de alta resolución. IX Congreso Argentino de Meteorología. Buenos Aires.

Pezza A. B. y T. Ambrizzi, 2005 (a): Dynamical conditions and synoptics tracks associated with different types of cold surges over tropical South America. Int. J. of Climat., 25:215-241.

Pezza A. B. y T. Ambrizzi, 2005 (b): Cold waves in South America and freezing temperatures in São Paulo: historical background (1888 – 2003) and case studies of cyclone and anticyclone tracks. Revista Brasileira de Meteorologia, vol. 20, N. 1, 141-158.

Rusticucci M. y W. Vargas, 1995: Synoptic situatios related to spells of extreme temperatures over Argentina. Meteorol. Appl. 2, 291 – 300.

Rusticucci M. y W. Vargas, 1993: La temperatura de bulbo seco y húmedo en la Argentina. Valores medios y persistencia de anomalías. Meteorologica, 18, 39 -47.

Saulo A.C., J. J. Ruiz y Y. García Skabar, 2007: Synergism between the low level jet and organized convection at its exit region. Mon. Wea. Rev. Vol. 135, 4, 1310-1326. . En prensa.

Scian, B., 1970: Situación Sinóptica asociada a las temperaturas extremas observadas en Junio 67. Meteorologica,1: 22-37.

Seluchi M. y J. Nery, 1992: Condiciones Meteorológicas asociadas a la ocurrencia de heladas en la región de Maringá. Revista Brasileira de Meteorología, 7, 523-533.

Souza, R. O., 1998 (a): Condicionantes Meteorológicas e Geográficas para a Ocorrência de Neve no Sul do Brasil. Anais. *X Congresso de Meteorologia de Brasília*, Brasília, DF, 26-30 de Octubre 1998. Disponible en CD-ROM.

Souza, R. O., 1998 (b): *A Ocorrência de Neve em Planaltos Subtropicais:* o caso do sul do Brasil. Disertación de Maestrado en Geografía - Facultad Filosofía, Letras y Ciencias Humanas, Universidad de San Pablo. 144 pp.

Souza, R. O., 2002: *Caracterização dos invernos no sul do Brasil em função dos dias de neve e da participação das massas de ar*. Tesis de Doctorado en Geografía - Facultad Filosofía, Letras y Ciencias Humanas, Universidad de San Pablo. 148 pp.

Souza Enio P., Emerson M. Silva, 2002: Impacto da Implementaçao de uma Parametrizaçao de Convecçao Rasa em um Modelo de Mesoscala. Descriçao e Testeo de Sensibilidade do Esquema. Revista Brasileira de meteorologia, v.18,n.1, 33-42.

Tremback, C. y R.L. Walko, 2004: Implementing Very-high Resolution Capabilities into a mesoscale Atmospheric model: New Capabilities for the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS).

Extended abstract in Mesoscale and CFD modeling for military applications, Jackson State University.

Vera, Carolina S., and Paula K. Vigliarolo, 2000: A Diagnostic Study of Cold – Air Outbreaks over South America. Mon. Weather Rev., 128, 3 – 24.

Vera C. S., P. Vigliarolo y H. Berbery, 2002: Cold Season waves over subtropical South America. Mon. Wea. Rev., 130, 684-699.