

Revista Brasileira de Meteorologia, v.26, n.3, 491 - 502, 2011

UN CASO DE BAJA SEGREGADA EN NIVELES ALTOS EN EL SUR DE SUDAMÉRICA: DESCRIPCIÓN DEL CICLO DE VIDA Y SU RELACIÓN CON LA PRECIPITACIÓN

ALEJANDRO ANIBAL GODOY, CLAUDIA MARCELA CAMPETELLA Y NORMA E. POSSIA

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Universidad de Buenos Aires (FCEN/UBA) y
Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET), Buenos Aires, Argentina

godoy@cima.fcen.uba.ar, claudiac@cima.fcen.uba.ar, possia@cima.fcen.uba.ar

Recibido Diciembre 2009 - Aceptado Diciembre 2010

RESUMEN

En este trabajo se analiza el ciclo de vida de una baja segregada que afectó el sur de Sudamérica entre el 26 de Marzo y el 2 de Abril del 2007 y se explora la relación existente entre las diferentes etapas de este sistema y la precipitación ocurrida sobre la franja central de Argentina. Además se evalúa si otros procesos coadyuvaron para la ocurrencia de la misma. Las características más relevantes de este sistema son su larga duración y el lento desplazamiento, ya que entre el inicio y el fin de su vida se desplaza sólo 780 km, manteniéndose estacionario, durante las etapas de segregación y madurez, por más de 56 hs frente a la costa central chilena. Esta última característica favorece la formación de un sistema de baja presión sobre el noroeste de Argentina y la persistencia de una corriente en chorro en capas bajas del norte que se extiende desde el centro de Bolivia hasta norte argentino. La masa de aire con características tropicales conducida por esta configuración y la convergencia en niveles bajos favorecieron el desarrollo convectivo. La precipitación acumulada durante estas etapas, en algunas regiones del sur del litoral argentino, superó los 300 mm, produciendo extensas inundaciones en la región. Durante la etapa de decaimiento (96 hs de duración), el sistema se debilita a medida que se desplaza hacia el este y las precipitaciones afectaron las provincias del centro-oeste de Argentina donde la lluvia en 48 horas duplicó el promedio mensual de marzo.

Palabras-clave: Baja Segregada, ciclo de vida, impacto en precipitación

ABSTRACT: A CASE OF HIGH LEVEL CUT-OFF CYCLONIC VORTEX OVER SOUTHERN SOUTH AMERICA: DESCRIPTION OF THE LIFE CYCLE AND ITS RELATION TO PRECIPITATION

This paper describes the life cycle of a high level cut-off cyclonic vortex that affected southern South America between 26 March and 2 April 2007, and explores the relationship between the evolution stages of the system and the rainfall over central Argentina. The possibility of other processes contributing to rainfall is also analyzed. The most relevant characteristics of this system were its length and slow displacement: from its development to decay it moved only 780 km. During its segregation and mature stages, it remained stationary for over 56 hours along the coast of central Chile. This latter feature favored the establishment of a low pressure system in the northwest of Argentina and the persistence of a northerly low level jet, from the center of Bolivia to the north of Argentina. The air mass with tropical characteristics driven by this system and the low-level convergence contributed to the development of convection. Accumulated rainfall during those stages, in some regions of central eastern Argentina was above 300 mm, producing significant flooding in the region. During the decay phase (96 hours duration), the system weakened as it moved eastward and precipitation affected the provinces of central-western Argentina, where the 48 h rain was twice the monthly average for March.

Keywords: cut-off, life cycle, impact on precipitation

1. INTRODUCCIÓN

Las bajas segregadas (BS) son sistemas ciclónicos cerrados en niveles altos de la troposfera que se forman a partir de la profundización de una vaguada fría en el tren de ondas de los oestes (Palmén y Newton, 1969). La circulación ciclónica y su núcleo frío asociado quedan “segregados” de su región de origen en latitudes más altas, formándose sobre el flanco ecuatorial de la corriente en chorro polar o subtropical.

El ciclo de vida de una BS puede ser separado en cuatro etapas (adaptado de Nieto et al, 2005):

1) Etapas de iniciación: El desarrollo de una BS requiere ondas potencialmente inestables en la troposfera media y alta. En esta etapa, el campo de altura geopotencial está caracterizado por un aumento de la amplitud de la onda y a veces también en un decrecimiento de la longitud de la misma. El mismo desarrollo se produce en la onda térmica.

2) Etapas de segregación: Continúa el aumento de la amplitud de la onda, la vaguada se profundiza, y comienza a separarse de la corriente zonal. El aire frío es segregado del flujo polar y confinado a latitudes más bajas mientras que el aire caliente del flujo del norte es segregado hacia latitudes más altas. La consecuencia de este proceso es el desarrollo de una baja fría en niveles altos y medios en el flanco subtropical de la vaguada.

3) Etapas de madurez: La segregación ya está finalizada, el sistema ciclónico en niveles altos se encuentra al norte de la corriente en chorro polar. La circulación cerrada de niveles altos se puede extender hasta 500 hPa y en algunos casos se propaga hasta superficie. La BS exhibe una estructura cuasi-barotrópica en la troposfera alta y media, tiene una escala horizontal de cientos de kilómetros y puede persistir por varios días.

4) Etapas de decaimiento: El sistema ciclónico en niveles altos comienza a debilitarse y usualmente se funde con una gran vaguada de altura en el flujo principal del oeste. Como en las BS el núcleo frío se encuentra en la troposfera media y/o alta, la columna de aire por debajo puede volverse estáticamente inestable, y junto con condiciones en superficie favorables (océano con aguas calientes, por ejemplo) se pueden dar las condiciones para la ocurrencia de convección profunda y tiempo severo (Garreaud y Fuenzalida, 2007). Más aun, fuertes movimientos verticales alrededor de la BS conducen a un mayor intercambio de gases entre la troposfera y la estratosfera, debido a la convección profunda y la mezcla turbulenta (Hoskins et al, 1985). Por ejemplo, episodios de alta concentración de ozono troposférico en áreas subtropicales de ambos hemisferios han sido vinculadas con bajas segregadas (Kentarchos et al, 2000 y Rondanelli et al, 2002). También pueden estar asociadas a vientos intensos, fuerte caída de nieve y condiciones frías inusuales en regiones altas.

Bell y Bossart (1993) analizan los factores intervinientes en la formación de una BS ocurrida sobre el este de Estados Unidos. Los autores encuentran que las 48 hs previas al inicio de la BS estuvieron caracterizadas por dos circulaciones: 1) la amplificación de una cuña por advección cálida en niveles bajos a medios, aumentando la intensidad de la corriente en chorro en su parte delantera y 2) una vaguada de onda corta (con un máximo de viento, “jet streak”, asociado) propagándose a través de la cuña. Este estudio muestra que la advección de vorticidad potencial, por encima del nivel de 500 hPa, es el término que explica la amplificación de la vaguada antes de su segregación.

En la región Sudamericana se han registrado varios casos importantes de bajas segregadas y los estudios se concentran en la región de mayor frecuencia de ocurrencia de dichos eventos. Campetella y Possia (2007) estudiaron un caso ocurrido en Septiembre de 1986 en el que su rápida formación estuvo asociada a una fuerte advección fría en niveles bajos en el lado este del anticiclón del Pacífico que contribuyó a la profundización de la vaguada. El núcleo de vorticidad ciclónica se expandió a niveles altos a medida que aumentaba la advección fría en la vertical. Garreaud y Fuenzalida (2007) analizaron la influencia de los Andes sobre el ciclo de vida de una BS ocurrida en Marzo del 2005 realizando diferentes simulaciones numéricas. Los autores concluyen que una cuña cuasiestacionaria en el sur del Pacífico es la precursora del desarrollo del sistema, concordando con Bell y Bosart (1993). Sus resultados, obtenidos en los experimentos de sensibilidad con el modelo WRF (Weather Research and Forecasting), indican que la BS se debilita más rápidamente en un entorno húmedo, mostrando que el calor diabático debido a la condensación del vapor de agua juega un rol importante en la disipación de las BS. Por otro lado, la cordillera de los Andes retrasa el debilitamiento del sistema, impidiendo el ingreso de aire cálido y húmedo del continente. Estos autores postulan que este efecto de los Andes puede ser la explicación de la máxima frecuencia de casos de BS en el oeste de Sudamérica.

Entre el 26 de marzo y 2 de abril de 2007 una BS se desarrolló frente a la costa central de Chile, donde se registra la mayor frecuencia de ocurrencia de estos sistemas en Sudamérica (Fuenzalida et al, 2005 y Campetella y Possia, 2007). Durante ese período ocurrieron diversos fenómenos de tiempo significativo a sotavento de los Andes, siendo los más importantes las abundantes precipitaciones (superando los 300 mm en 48 hs en algunas localidades) que produjeron inundaciones en el centro de Argentina, en especial en el sur de las provincias de Santa Fe y Entre Ríos.

Por lo expresado en el párrafo precedente, los objetivos de este trabajo son: a) caracterizar las etapas del ciclo de vida de esta BS cuasi-estacionaria, ubicada al oeste de los Andes y b) relacionar cada una de las etapas del su ciclo de vida con la

precipitación registrada a sotavento de los Andes y evaluar si otros procesos coadyuvaron para la ocurrencia de la misma.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

Para realizar la descripción del entorno sinóptico asociado al desarrollo de la BS se utilizaron los análisis cuatridiurnos GDAS-FNL (Global Data Assimilation System-Final Analysis, disponibles en http://nomad1.ncep.noaa.gov/ncep_data/index.html) provistos por el NCEP (National Center of Environmental Prediction). Los mismos cuentan con una resolución horizontal de $1^\circ \times 1^\circ$ y 26 niveles de presión en la vertical. Las variables utilizadas en el presente trabajo fueron: componente zonal y meridional del viento, temperatura, humedad relativa y altura geopotencial, en el período que comprende desde 24 de Marzo al 2 de Abril del 2007. Los datos de precipitación acumulada diaria de las estaciones sinópticas de Argentina, listadas en la Tabla 1, fueron provistos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Para aumentar la resolución de los datos de precipitación de la red sinóptica, se utilizaron los datos de precipitación estimada por satélite con la técnica CMORPH (NOAA CPC Morphing Technique; Joyce et al, 2004), la cual genera análisis de precipitación acumulada cada 3 horas con una resolución de 0.25×0.25 grados, utilizando observaciones de satélites de microondas (disponibles en http://www.cpc.noaa.gov/products/janowiak/cmorph_description.html).

Para definir al sistema como BS se utilizaron los siguientes criterios: a) que el campo de altura geopotencial de 300 hPa presente un mínimo, con al menos una isohipsa cerrada (trazadas cada 20 mgp) y una región baroclínica (identificada por un mayor gradiente horizontal de temperatura en ese nivel) en ambos flancos de la BS, b) un núcleo frío en la columna 850/300 hPa, c) que el sistema esté aislado del flujo del oeste. Estos criterios fueron utilizados por Campetella y Possia (2007) pero en ese caso los autores utilizaron el nivel de 250 hPa para la detección de los casos. El ciclo de vida de la BS se separó en cuatro etapas: iniciación, segregación, madurez y decaimiento, siguiendo el criterio descrito en la Introducción.

Si bien Campetella y Possia (2007) utilizaron el nivel de 250 hPa para la identificación de BS, en este trabajo se optó

utilizar el nivel de 300 hPa, ya que en este nivel es posible identificar mayor cantidad de eventos en niveles troposféricos (Gan, 2006). Reboita et al (2010) realizaron un estudio climatológico de BS en 200 hPa, 300 hPa y 500 hPa para el Hemisferio Sur, encontrando mayor frecuencia de BS en el nivel de 300 hPa, en concordancia con Gan (2006)

La intensidad de la BS, se evaluó a través del cálculo del laplaciano del geopotencial en la región de la BS para el nivel de 300 hPa. El cálculo se realizó siguiendo el centro del sistema, sobre una caja de $3^\circ \times 3^\circ$.

3. RESULTADOS

3.1 Descripción del ciclo de vida de la BS

En esta sección se describen las características más relevantes de cada una de las etapas del ciclo de vida de la BS, que tuvo una duración de 8 días entre el inicio de la etapa de segregación y el fin de la etapa de decaimiento. Esta duración corresponde al percentil 99 según los trabajos de Fuenzalida et al (2005) y Campetella y Possia (2007), es decir sólo el 1% de los casos de BS tuvo una duración mayor o igual a 8 días. Otra característica distintiva de este sistema fue su lento desplazamiento, de solamente 780 km entre las etapas mencionadas anteriormente.

i) Etapa Inicial

En la Figura 1, correspondiente a las 1800 UTC del 24 de marzo, se observa la vaguada de pequeña amplitud precursora de la BS posicionada en 105° O inmersa en una cuña de onda larga. Corriente abajo de esta última se observa una vaguada con eje extendido meridionalmente al oeste de la costa sur de Chile, que se extiende hacia niveles bajos mostrando una estructura barotrópica equivalente (Figuras 2a y 3a). Entre las 1800 UTC del 24 y las 1800 UTC del 25 de marzo, el flanco polar de esta vaguada se desplaza rápidamente al este (A en las Figura 3a y 3b), ubicándose sobre el extremo sur de Sudamérica, mientras que el flanco subtropical se mantiene al oeste de los Andes. La vaguada precursora de la BS también

Tabla 1 - Numeración y ubicación de las estaciones seleccionadas.

	ESTACION	LAT ($^\circ$ S)	LON ($^\circ$ W)
1	SAN RAFAEL	34.58	68.40
2	MENDOZA	32.83	68.78
3	GUALEGUAYCHU	33.00	58.62
4	ROSARIO	32.92	60.78
5	PARANA	31.78	60.48
6	JUNIN	34.55	60.92

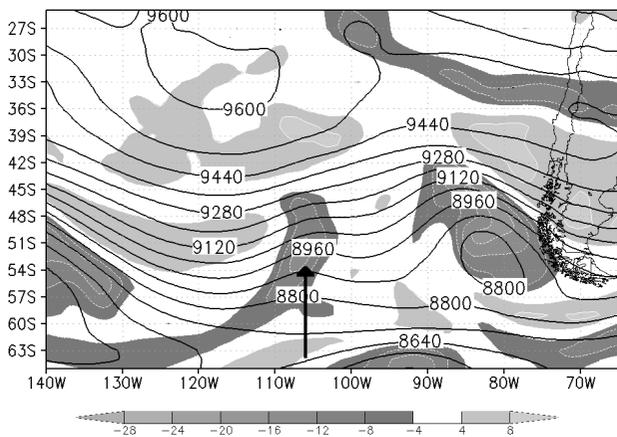


Figura 1 - Altura geopotencial (línea llena, c/80 mgp) y vorticidad relativa (sombreado, $\times 10^{-5} s^{-1}$) en 300 hPa, para las 1800 UTC del 24 de marzo 2007. La flecha indica la posición de la vaguada precursora (ver texto).

tiene un rápido desplazamiento en dirección ENE, desde 105° O hasta 85° O, amplificándose y acoplándose con la vaguada anteriormente mencionada (indicada con B en la Figura 3a y 3b). En superficie (Figura 2b), el Océano Pacífico Sur está dominado por una circulación anticiclónica centrada en 100° O y 40° S que se extiende hasta las costas de Chile. Los vientos del SO en el flanco sudeste del anticiclón en niveles bajos (que coincide con la posición del eje de vaguada en altura), producen advección fría en la troposfera baja disminuyendo el espesor

de la capa 500/1000 hPa entre 30° y 45° S. El sistema de baja presión se encuentra ahora sobre el Océano Atlántico, al sur de las Islas Malvinas, y el sistema frontal asociado está ocluido, con la rama fría extendiéndose hacia el norte de la Patagonia.

Hacia las 1800 UTC del 26 de Marzo, la región anticiclónica ubicada en el Pacífico central se ha amplificado adquiriendo una importante extensión meridional con eje NO – SE, observándose además una intensificación de la corriente en chorro entre 50° S y 60° S (Figura 3c). La vaguada al oeste de las costas de Chile también se profundiza y amplifica disminuyendo su longitud de onda. La evolución de este máximo de vorticidad ciclónica es similar al caso de estudio descrito por Bell y Bosart (1993).

ii) Etapa de segregación

A partir de las 1800 UTC del 26 de Marzo comienza el inicio de la etapa de segregación, con un centro cerrado de altura geopotencial en 300 hPa posicionado en 38° S - 75° O y la rama polar de la corriente en chorro que no se ha separado del sistema, tal como se observa en la Figura 3c. Este máximo de viento se corresponde con la zona baroclínica asociada al frente frío, como se describió anteriormente.

Desde las 0000 UTC del 27 de Marzo y por el lapso de 60 hs el ciclón de niveles medios y altos se mantiene estacionario en 75° O, entre 35° y 30° S, ubicado entre la cuña al oeste y la cordillera de los Andes al este. Se separa totalmente de la rama polar de la corriente en chorro (Figura 3c a 3e) y se intensifica

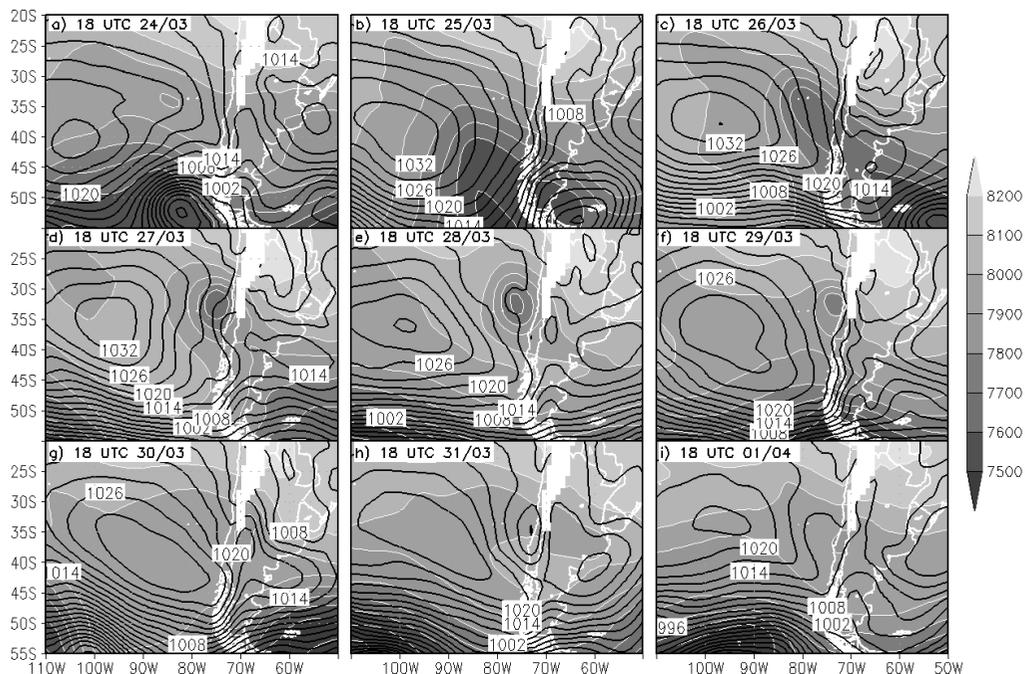


Figura 2 - Presión a nivel medio de mar (líneas negras, c/3 hPa) y espesor 850/300 hPa (sombreado, c/100 mgp).

manteniendo su núcleo frío (Figura 2c a 2e). El eje de cuña en altura se ha desplazado desde 110° O hasta 85° O y se ha extendido meridionalmente con una orientación NO – SE hacia el sur de la BS (Figura 3d). Con el avance de esta región anticiclónica la BS modifica su forma elipsoidal asociada a la vaguada hacia una estructura más simétrica. Durante la etapa de segregación se observa una gran intensificación del sistema con valores de vorticidad relativa ciclónica que alcanzan el orden de $10^{-4} s^{-1}$ (Figura 4a), superando en un orden de magnitud los valores sinópticos típicos de la vorticidad relativa, sin embargo la BS no se profundiza (Figuras 3c a 3e).

La extensión vertical del núcleo frío se puede observar en la Figura 4d, siendo máximo entre 600 y 300 hPa, mientras que por encima se invierte el gradiente térmico a ambos lados del centro de la BS indicando la presencia de aire estratosférico. La mayor baroclinicidad se observa sobre el flanco oeste de la BS, asociado al calentamiento consecuencia de la subsidencia relacionada al profundo anticiclón sobre el Océano Pacífico (Figuras 3d y 4d). Los movimientos verticales que se registran en 80° O y 70° O (Figura 4d) coinciden con la presencia de convergencias y divergencias en 300 hPa debido a las componentes ageostróficas del viento (Figura 4b). En particular, las convergencias al oeste de la BS son explicadas parcialmente por la convergencia del viento ageostrófico tangencial (V_{at}). Por otro lado, el viento ageostrófico normal (V_{an}) explica las convergencias más al oeste, extendiendo el área de movimientos

de descenso. La convergencia y consecuentemente la subsidencia asociada al anticiclón de altura favorecen el aumento del espesor 600/400 hPa al oeste de la BS, del gradiente horizontal de temperatura en esta región y de la intensidad de la BS. En niveles bajos (Figura 2d) el anticiclón del Pacífico adquiere una curvatura ciclónica en la región de la BS. A partir de las 0600 UTC del 27 de marzo comienza a identificarse un centro cerrado a partir del nivel de 850 hPa, indicando la extensión de la BS hasta niveles bajos de la troposfera (Figura 4c).

iii) Etapa de madurez

A partir de las 1800 UTC del 28 de Marzo (Figuras 2e y 3e) la BS se ha separado totalmente de la corriente en chorro polar, alcanzando el estado maduro y adquiriendo una estructura similar a la representada en los modelos conceptuales. La intensa cuña que 24 hs antes se encontraba sobre el Océano Pacífico, ahora ha aumentado su longitud de onda y se ha desplazado hacia el este, debilitándose. A las 0000 UTC del 29 de Marzo en 300 hPa (Figura 5a) la vorticidad ciclónica se encuentra más aislada aún que en la etapa de segregación (Figura 4a), debido al desplazamiento hacia el este de la porción polar de la vaguada, y se ubica en el centro del sistema. La BS mantiene una estructura cuasi-barotrópica observándose un centro de baja presión prácticamente en toda la troposfera y aún por encima de ésta, conservando una organización bastante simétrica (Figura 5a, 5c

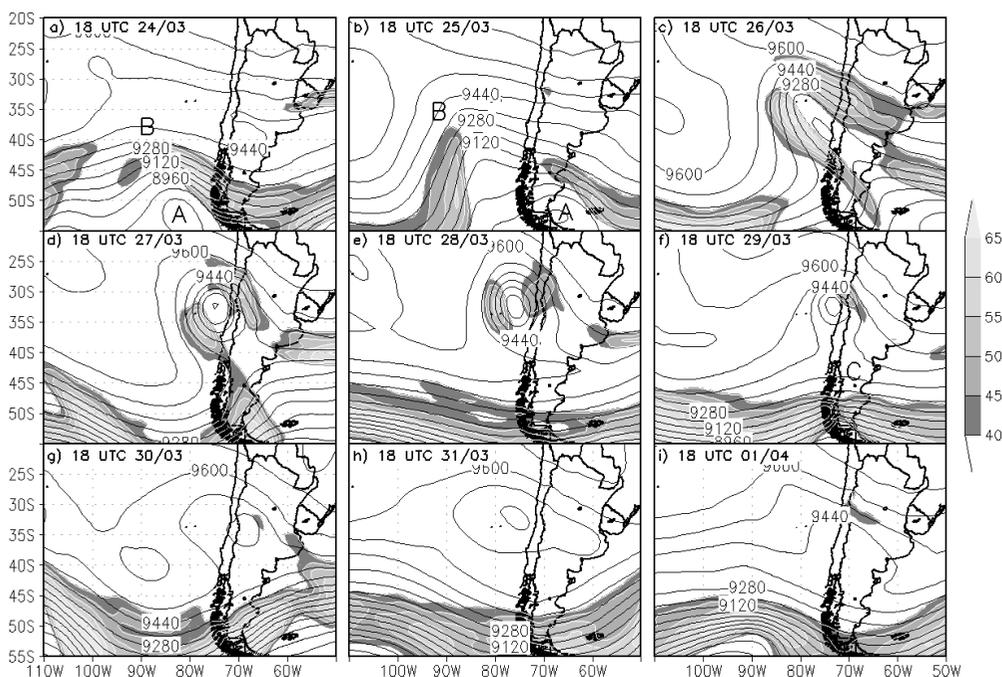


Figura 3 - Altura geopotencial en 300 hPa (líneas, c/80 mgp) e isotacas mayores a 40 $m s^{-1}$ (sombreado, c/ 5 $m s^{-1}$). Las letras A, B y C en a, b y f indican la posición de sistemas que se detallan en el texto.

y 5d). El núcleo frío se extiende en esta etapa desde superficie hasta 300 hPa (Figura 5d), mientras que por encima de este nivel se mantiene el núcleo cálido. Las convergencias y divergencias debido a las componentes ageostróficas (Figura 5b) tienen una estructura y ubicación similar a la etapa de segregación. El V_{at} y V_{an} indican que tanto la curvatura como la confluencia de las líneas de corriente colaboran en mantener este patrón de ascensos (corriente abajo) y descensos (corriente arriba) en niveles medios a altos.

iv) Etapa de decaimiento

La etapa de decaimiento comienza cuando la BS se desplaza hacia el continente a partir de las 0000 UTC del 29 de Marzo. Embebida en el flujo máximo del oeste al sur de 45° S, una vaguada de altura se desplaza rápidamente hacia el este poniéndose en fase con la BS hacia las 1800 UTC del mismo día (Figura 3.f), mientras que la cuña corriente arriba comienza a intensificarse nuevamente. En niveles bajos (Figura 2.f),

un frente frío débil se desplaza hacia el centro de Argentina, asociado en 300 hPa a la perturbación ciclónica que se desplaza en latitudes altas (C en Figura 3.f). Luego, a partir de las 0000 UTC del 30 de Marzo la BS comienza a cruzar la cordillera de los Andes en dirección sudeste. En el campo de espesores 850/300 se observa como el sistema comienza a debilitarse, tanto en intensidad como en su núcleo frío asociado (Figura 2f a 2i y Figura 3f a 3i). La BS continúa su debilitamiento, la vaguada asociada al sistema se extiende hacia el oeste y el anticiclón caliente (ver espesor 850/300 Figura 2.g y 3.g), que se observa en todos los niveles de la troposfera, se desplaza desde el Pacífico hacia el continente, al sur de la BS. A partir de las 1800 UTC del 30 de Marzo, la vaguada se extiende zonalmente (Figura 3.g y 3.h) a ambos lados de la cordillera. La BS continúa su desplazamiento hacia el sudeste pero su decaimiento continúa con un núcleo frío mucho más debilitado, mientras al oeste de las costas de Chile aumenta la vorticidad ciclónica (no se muestra). A las 0600 UTC del 31 de Marzo el sistema se divide en dos centros ciclónicos, separados por la cordillera de los Andes.

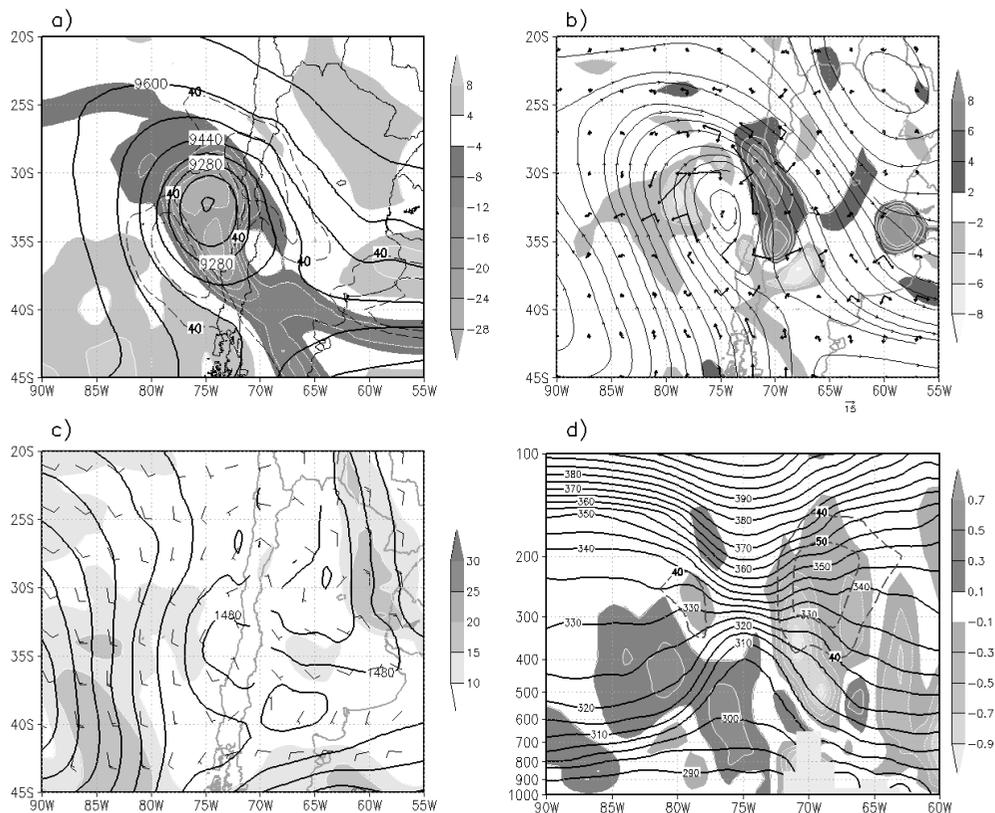


Figura 4 - 1800 UTC del 27 del Marzo 2007: a) 300 hPa: Altura geopotencial (líneas llenas, c/80 m), isotacas (trazos, c/ 5 m s⁻¹) y vorticidad relativa (sombreado, x10⁻⁵ s⁻¹); b) 300 hPa: Líneas de corriente, divergencia del Vag (sombreado, x10⁻⁵ s⁻¹) y viento tangencial y normal ageostrófico (vectores); c) 850 hPa: Altura geopotencial (líneas, c/20 m), isotacas (sombreado) y viento (barbas) y d) Corte vertical de temperatura potencial en 32° S (líneas, c/5K), omega (somb, Pa s⁻¹) e isotacas mayores a 40 m s⁻¹ (trazos).

A partir de las 0000 UTC del 1 de abril, el sistema se mantiene en las costas de Chile (no se muestra). El viento en altura en la región de la BS es de menor intensidad, indicando el debilitamiento del gradiente de geopotencial asociado al sistema. El sistema de alta presión en niveles medios, que se encontraba en la región patagónica, se debilita y se desplaza hacia el este, volviendo a dominar el flujo principal del oeste en esta región. Finalmente, una nueva vaguada ingresa desde el Océano Pacífico, al sur del sistema (Figura 2i y 3i), y la BS se disipa a partir de las 0000 UTC del 2 de abril.

Para analizar la intensidad y profundidad de la BS en 300 hPa durante su ciclo de vida, en la Figura 6 se presentan la evolución del laplaciano del geopotencial en la región de la BS y del mínimo de geopotencial en el centro de la BS, en el mismo nivel. El análisis de las figuras muestra que la BS se intensifica rápidamente en las primeras horas de la etapa de segregación, sin embargo la profundidad de la BS no muestra grandes cambios durante la misma (Figura 6a y 6b). A partir de las 0000 UTC del 29/03 la BS comienza a debilitarse rápidamente, mientras que el valor central de geopotencial aumenta. A partir de las 0600 UTC del 31 de marzo el sistema de baja presión en niveles altos presenta dos máximos de vorticidad, la línea con cuadrados (BS02) en el gráfico representa la intensidad del sistema que

se intensifica al oeste de los Andes, mientras que la línea con rombos (BS01) es el que evoluciona al este.

3.2. Eventos de tiempo significativo ocurridos durante el ciclo de vida de la BS

Durante las diferentes etapas del ciclo de vida de la BS se registran valores altos de precipitación acumulada, principalmente en dos regiones (Figura 7): en el centro y sur de la región de Cuyo (A) y en el centro-este de Argentina (B). La Figura 7a muestra la precipitación acumulada entre el inicio de la etapa de segregación y el fin de la etapa madura mientras que la Figura 7b muestra la precipitación acumulada en la etapa de decaimiento. Si bien se registraron precipitaciones en ambas regiones durante todo el ciclo de vida de la BS, en la región B la mayor cantidad de precipitación acumulada ocurrió durante las etapas de segregación y madurez (Figura 8a), mientras que en la región A se registró durante la etapa de decaimiento.

Tal como se describiera en el punto anterior, la BS se mantuvo estacionaria al oeste de los Andes durante casi toda la etapa de segregación y etapa madura. Este efecto, combinado con la presencia de una cuña en latitudes altas corriente arriba de la BS, favorece el bloqueo del flujo del oeste en latitudes

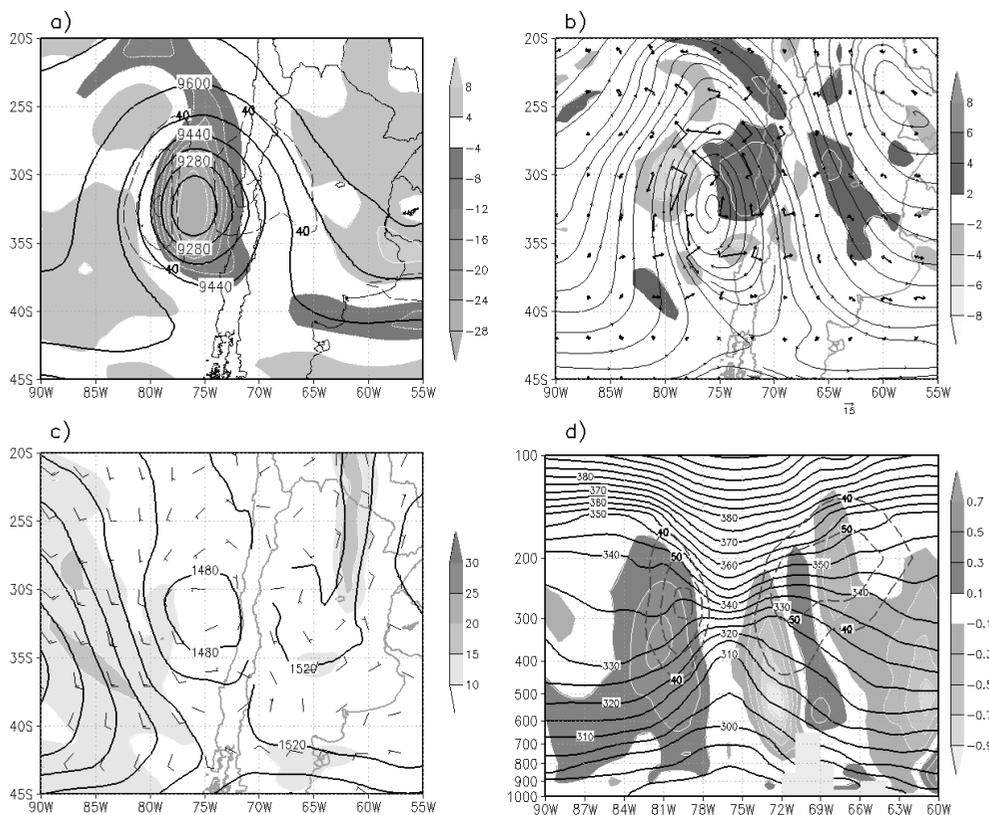


Figura 5 - Ídem Figura 4, para las 0000 UTC del 29 del Marzo 2007.

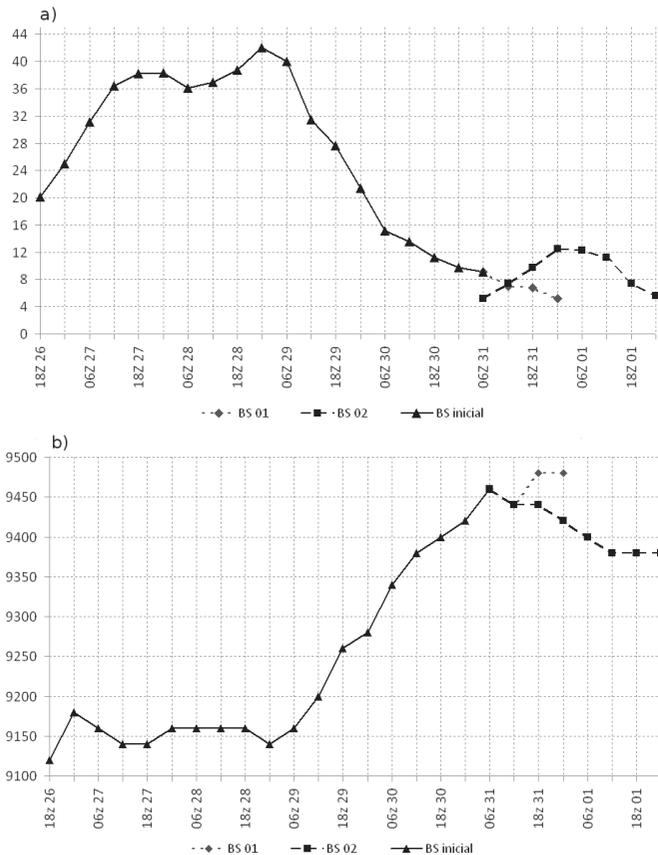


Figura 6 - a) Marcha del laplaciano de geopotencial en 300 hPa (mgpm^{-2}), desde las 1800 UTC del 26/03/07 hasta 0000Z del 02/04/07. b) Marcha del mínimo de geopotencial en 300 hPa, en el centro de la BS, para el mismo período. Rombo: BS01, cuadrado: BS02 y triangulo: BS inicial.

medias (Trenberth y Mo 1985). La persistencia de la parte delantera de una vaguada difluente en niveles altos en el norte argentino (Figura 2c-2f), contribuyó a la formación de la depresión en las capas bajas a sotavento de los Andes, que en los días 25 y 26 de Marzo se puede asociar a la depresión del

norroeste argentino (Ferreira et al 2004). La presencia de este sistema de baja presión, conjuntamente con el anticiclón en el Océano Atlántico, aumentan el gradiente zonal de presión lo que intensifica el flujo del norte proveniente del Amazonas (Figura 8b). La intensidad del viento en niveles bajos, con marcada componente del norte, es máxima alrededor de 22°S , en el límite entre Argentina y Bolivia, como se observa en las isotacas de 850 hPa en la Figura 4c. Este máximo de viento presenta un perfil vertical de corriente en chorro (Bonner, 1968). Además, esta corriente en chorro en capas bajas (CCCB) corresponde al tipo Chaco definido por Saulo et al (2000), ya que la isotaca de $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se extiende al sur de 25°S , aunque posicionada más al sur respecto de la posición climatológica para el verano (Salio et al, 2002). El perfil de CCCB se verifica para las 0600 UTC de los días 27 a 30 de marzo, favoreciendo la incursión hacia el sur de una masa de aire tropical con valores de temperatura potencial equivalente (θ_e) superiores a 350 K en 850 hPa (Figura 8b). El ciclo diario de la CCCB fue documentado por Bonner y Paegle, 1970; Douglas et al, 1998; entre otros.

En el centro y norte de Argentina, la masa de aire en niveles bajos es convectivamente inestable durante la mayor

Tabla 2 - Precipitación media (mm) y el extremo para Marzo para el período 1981-1990, para las estaciones de la Tabla 1. La tercera columna indica la precipitación acumulada (mm) del 25 de Marzo al 01 de Abril. La última columna representa el porcentaje de precipitación acumulada durante el evento respecto de la precipitación total de Marzo 2007.

	Media	Extremo	PP acum.	% de la PP
SAN RAFAEL	30,4	86,7	128,7	57,1
MENDOZA	34,7	148,4	61,6	73,0
GUALEGUAYCHU	102,9	213,2	418,5	76,9
ROSARIO	120,2	256,2	379,4	74,4
PARANA	131,4	200,9	303,2	56,2
JUNIN	141,9	329,1	164,1	67,5

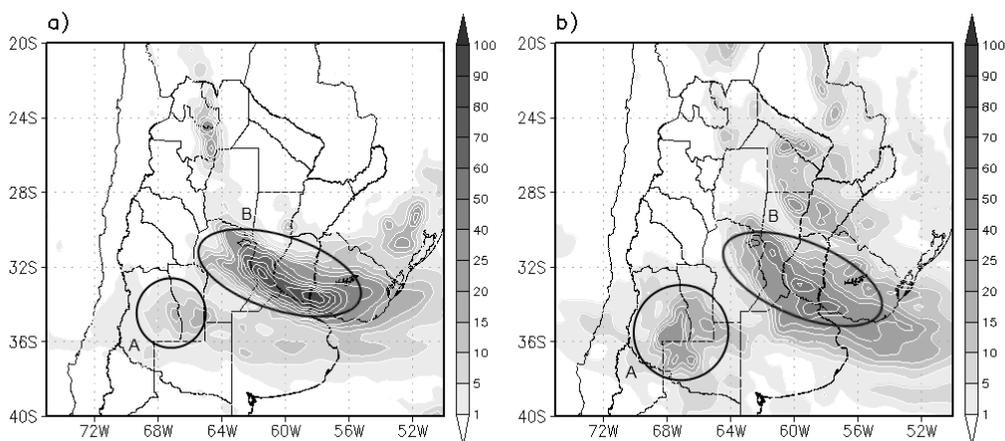


Figura 7 - Precipitación acumulada estimada por satélite con la técnica CMORPH (sombreado): a) desde 1800 UTC del 26 de marzo hasta 0000 UTC del 29 de marzo y b) desde 0000 UTC del 29 hasta 0000 UTC 2 de abril. Las zonas A y B son las que se describen en el texto.

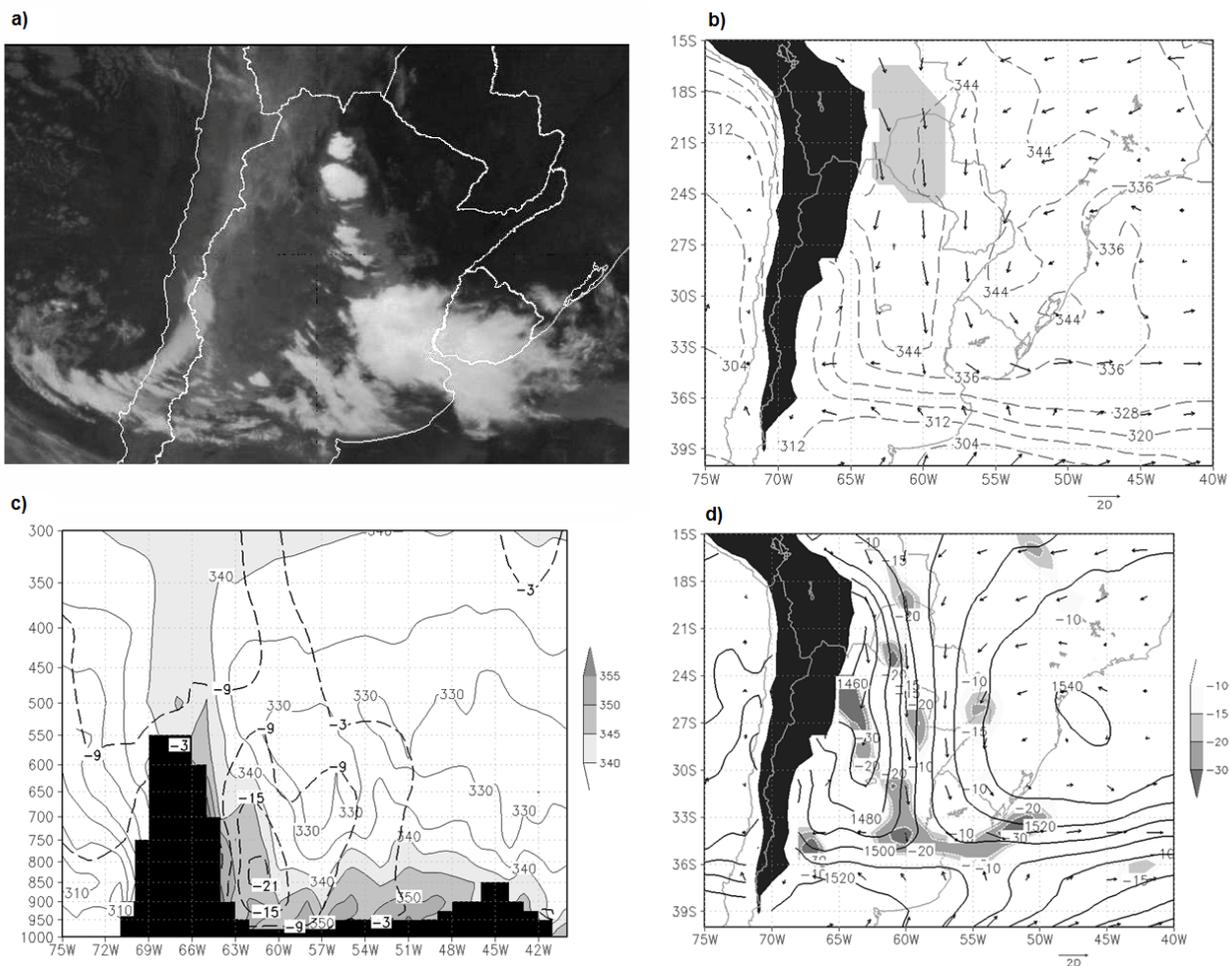


Figura 8 - 28/03/07 0600 UTC: a) Imagen de satélite GOES-12 en el canal infrarrojo para las 0545 UTC, b) Convergencia de flujo de humedad (sombreado, $g\ Kg^{-1} día^{-1}$), altura geopotencial (líneas, $c/10\ mgp$) y viento en 850 hPa c) Corte vertical en $22°\ S$ de temperatura potencial equivalente (sombreado $>340\ K$, líneas $c/5\ K$) y viento meridional menor a $-3\ m\ s^{-1}$ (líneas a trazos, $c/6\ m\ s^{-1}$) y d) Criterio de Bonner (somb), Temperatura potencial equivalente (líneas a trazos, K) y viento en 850 hPa.

parte del ciclo de vida de la BS como puede observarse en la Figura 8c que corresponde a las 0600 UTC del 28 de marzo. En esta figura se observa un máximo de θ_e superior a 350 K cerca de superficie y la componente meridional del viento muestra su máximo valor en el nivel de 850 hPa. La presencia de aire convectivamente inestable, conjuntamente con el forzante dinámico de ascenso asociado por la convergencia de humedad en la región de salida de la CCCB (Figura 8d), producen gran cantidad de tormentas y tiempo severo, particularmente sobre las provincias de Entre Ríos y Santa Fe (región B en la Figura 7 y Figura 8a). En la región B se registraron las precipitaciones más intensas que superaron los 300 mm durante el período de análisis (Figura 9, Estaciones 3, 4, y 5 de la Tabla 1), superando ampliamente la precipitación media para el mes de marzo (período 1981-1990) y en algunos casos el record histórico (Tabla 2) indicando la severidad del fenómeno en estudio. La precipitación acumulada durante el ciclo de vida de la BS

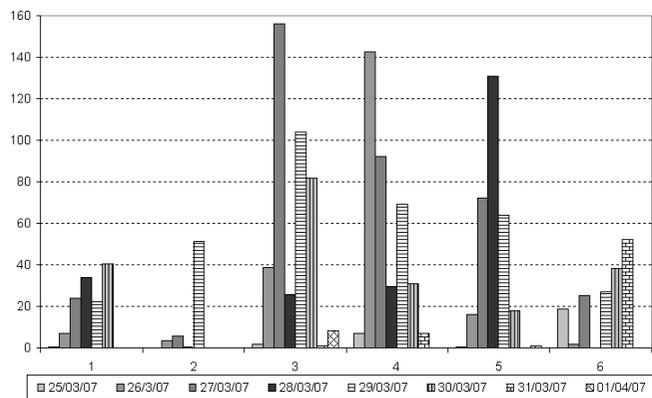


Figura 9 - Precipitación diaria (mm) del 25/03/07 al 01/04/07 para cada una de las estaciones numeradas en la Tabla 1.

representa más del 50 % del total registrado en Marzo 2007 y en particular, en algunas de las estaciones analizadas, llega a superar el 70 % (Tabla 2).

En la zona de alta montaña de Mendoza las lluvias superaron los 160 mm en 48 hs (fuente Diario Los Andes), la acción del agua produjo desprendimiento de piedras que interrumpieron el paso internacional a Chile a la altura de Uspallata. En las estaciones de San Rafael y Malargüe (Provincia de Mendoza, Argentina), la precipitación acumulada durante este evento duplicó el promedio mensual de Marzo. La Figura 9 muestra la precipitación diaria acumulada para diferentes estaciones sinópticas del centro de Argentina. En la misma se identifican dos distribuciones de precipitación diaria, que se pueden asociar a distintas etapas del ciclo de vida de la BS. La precipitación acumulada en la región de Cuyo y Oeste de la región Pampeana (Estaciones 1, 2 y 6 de Tablas 1 y 2 y región A en Figura 7) muestra que los mayores valores de precipitación se registraron a partir de la etapa de madurez. Las mayores precipitaciones ocurrieron cuando el sistema de altura ingresa a esta zona (29 y 30 de Marzo). Por otro lado, en la región del Sur de Santa Fe y Entre Ríos (Estaciones 3, 4 y 5 de Tablas 1 y 2 y región B en Figura 7) la precipitación fue mayor durante la etapa de segregación del sistema asociada a la persistencia de la CCCB con su aporte de aire húmedo y cálido que impulsaron la convección como se discutió precedentemente.

4. CONCLUSIONES

El evento de BS analizado en el presente trabajo estuvo caracterizado por mantenerse cuasi-estacionario, desde el fin de la etapa de iniciación y hasta el inicio de la etapa de decaimiento, al oeste de la costa central del Chile. Particularmente, dicha región presenta la máxima frecuencia de ocurrencia de BS en la región Sudamericana (Fuenzalida et al, 2005; Campetella y Possia, 2007). La Tabla 3 sintetiza las características principales de cada una de las etapas del ciclo de vida de la BS.

La etapa de iniciación abarca un período de 48 horas (desde las 1800 UTC del 24 de marzo a las 1800 UTC del 26 de marzo) previo a que se formara un centro cerrado de geopotencial en 300 hPa (con isohipsas trazadas cada 20 mgp). Durante este período, una vaguada de niveles altos de pequeña amplitud que se encontraba en el Pacífico Sur (aproximadamente en 105° O) se amplifica y se acopla a una vaguada de mayor amplitud. La misma se profundiza mientras se desplaza al este hasta alcanzar la costa central de Chile. Durante la etapa de segregación (desde 1800 UTC del 26 de marzo al 1800 UTC del 28 de marzo), la vaguada de niveles altos comienza a segregarse del flujo del oeste, observándose un estrangulamiento

Tabla 3: Resumen del ciclo de vida de la BS identificando cada una de las etapas de su desarrollo.

Etapa Inicial	18Z24	En niveles altos, una perturbación de onda corta inmersa en un flujo anticiclónico se amplifica y se ubica al oeste de las costas Chile
	00Z25	
	06Z25	
	12Z25	
	18Z25	
	00Z26	
	06Z26	
Etapa de segregación	18Z26	Profundización e intensificación del centro ciclónico
	00Z27	Estrangulación de la vaguada asociada y separación del sistema de su fuente polar
	06Z27	
	12Z27	
	18Z27	Continúa la segregación y se intensifica
	00Z28	
	06Z28	
Etapa madura	18Z28	El sistema alcanza su mayor intensidad y se encuentra separado totalmente del flujo de los oestes y se mantiene estacionario
	00Z29	
Etapa de decaimiento	06Z29	El sistema se desplaza hacia el este a medida que pierde intensidad y profundidad en su centro
	12Z29	
	18Z29	
	00Z30	
	06Z30	
	12Z30	
	18Z30	
	00Z31	La vaguada asociada se amplifica hacia el oeste. Coexisten dos centros ciclónicos a ambos lados de los Andes
	06Z31	
	12Z31	
	18Z31	El sistema se reorganiza al oeste de los Andes y se desplaza hacia el sudeste hasta su disipación definitiva
	00Z01	
	06Z01	
12Z01		
18Z01		

de la misma al sur del sistema por el avance de una cuña de niveles altos corriente arriba de la vaguada, que se amplifica y profundiza, similar a lo encontrado en el estudio de caso de Garreaud y Fuenzalida (2007). Lo mismo sucede con la onda de temperatura formándose un núcleo frío en niveles medios a altos. El aumento en la intensidad de la BS no se debe a la profundización de la misma sino a la intensidad y crecimiento del anticiclón corriente arriba de la misma.

En la etapa madura (1800 UTC del 28 de marzo a las 0000 UTC del 29 de marzo) el sistema ya está totalmente separado del flujo del oeste, se observa un ciclón aislado con un núcleo frío en niveles medios a altos y un núcleo caliente

más arriba asociado a la caída de la tropopausa. La circulación ciclónica se propaga a niveles bajos aunque muy debilitada, mostrando una estructura barotrópica equivalente. Durante la etapa de decaimiento (0000 UTC del 29 de marzo a 0000 UTC del 02 de abril) el sistema disminuye su intensidad y su valor central de geopotencial a medida que se desplaza hacia el este. Hacia el final de este período, la vaguada se amplifica nuevamente formando dos centros ciclónicos, uno a sotavento y otro a barlovento de los Andes. Finalmente el sistema ciclónico sobre Argentina se debilita y desaparece mientras el centro ciclónico en las costas del centro de Chile se intensifica y profundiza con una magnitud menor a la etapa de segregación definida anteriormente. Finalmente, este último centro ciclónico se debilita y se convierte en una pequeña vaguada asociada a una nueva perturbación que avanza desde el Pacífico.

Las 56 hs, aproximadamente, en que la BS se mantuvo estacionaria frente a la costa central de Chile, condujo a la persistencia de una parte delantera de vaguada difluente sobre el norte argentino, favoreciendo la formación de una depresión en niveles bajos a sotavento de los Andes. Este sistema de baja presión, conjuntamente con un anticiclón en el Océano Atlántico canalizaron el viento en niveles bajos, con características de corriente en chorro, desde la zona amazónica hasta el centro de Argentina. La persistencia de este patrón favoreció el avance hacia el sur de una masa de aire inestable con características tropicales. La precipitación acumulada durante el evento en el sur del litoral argentino (zona B en Figura 7) superaron los 300 mm, produciendo extensas inundaciones en zonas urbanas. La mayor cantidad de precipitación cayó sobre esta región durante las etapas de segregación y madurez, debido a la acción conjunta del sistema de baja presión sobre el noroeste de Argentina y la persistencia de la corriente en chorro de capas bajas. Sin embargo, sobre la zona de Cuyo (región A en la Figura 7), la mayor cantidad de precipitación ocurrió durante la etapa decaimiento.

La relación entre la BS estudiada en este trabajo y la precipitación constituye un aporte más al conocimiento de esta relación en el Sur de Sudamérica. Comprender los procesos físicos que dominan su ciclo de vida de las BS permitirá mejorar el pronóstico de los mismos y por consiguiente avanzar sobre una mejora en las tareas de prevención.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Servicio Meteorológico Nacional de Argentina por proveer los datos de precipitación de las estaciones sinópticas y a los dos revisores anónimos por los aportes realizados para enriquecer el manuscrito. Este trabajo fue parcialmente subvencionado por los proyectos CNPq-Prosul 490401/2006 y UBACyT X478.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BELL, G.; BOSSART, L. A case study diagnoses of the formation of an upper-level cutoff cyclonic circulation over eastern United States. **Monthly Weather Review**, v. 121, p. 1635-1655, 1993.
- BONNER, W. D. Climatology of the low level jet. **Monthly Weather Review**, v. 96, p. 833 – 850, 1968.
- BONNER W. D.; PAEGLE, J. Diurnal variations in Boundary layer winds over the south-central United States in summer. **Monthly Weather Review**, v. 98, p. 735-744, 1970.
- CAMPETELLA C. M.; POSSIA, N. E. Upper-level cut-off lows in southern South America. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 96, p. 181- 191, 2007.
- DOUGLAS, M.; NICOLINI, M.; A. C. SAULO. Observational evidences of a low level jet East of the Andes during January-March 1998. **Meteorologica**, v. 32, p. 63-72, 1998.
- FERREIRA, L.; SELUCHI, M.; A. C. SAULO. Climatología Sinóptica de la Baja del Noroeste Argentino: Campos medios de Enero y Julio. In: XIII CONGRESO BRASILEIRO DE METEOROLOGÍA, 2004, Fortaleza. Actas (CD).
- FUENZALIDA, H. A.; SANCHEZ R.; GARREAUD, R. D. A climatology of cutoff lows in the Southern Hemisphere. **Journal Geophysical Research**, v. 110, D18101, doi:10.1029/2005JD005934, 2005.
- HOSKINS, A. J.; MCINTYRE M. E.; ROBERTSON A. W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v. 111, p. 877 – 946, 1985.
- GAN. M. Bajas Segregadas. (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Cachoeira Paulista, 2006). Comunicación Personal.
- GARREAUD, R. D.; FUENZALIDA, H. A. The influence of the Andes on Cutoff Lows: a modeling study. **Monthly Weather Review**, v. 135, p. 1596-1613, 2007.
- JOYCE, R. J.; JANOWIAK J. E.; ARKIN, P. A.; XIE, P. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwaves and infrared data at high spatial and temporal resolution. **Journal of Hydrometeorology**. v. 5, p. 487-503, 2004.
- KENTARCHOS, A.; ROELOFS G.; LELIEVED J.; CUEVAS E. On the origin of elevated ozone concentrations at Izana observatory during the last days of March 1996: A model study. **Geophysical Research Letters**, v. 27, p. 3699 – 3702, 2000.
- NIETO, R.; GIMENO, L.; DE LA TORRE, L.; RIBERA, P.; GALLEGO, D.; GARCÍA-HERRERA, R.; GARCÍA, J.; NUÑEZ M.; REDAÑO A.; LORENTE J. Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere. **Journal of Climate**, v. 108, p. 3085-3103, 2005.

- PALMEN, E.; NEWTON, C. W. **Atmospheric circulation systems: their structure and physical interpretation**. New York: Academic Press. 1969. 602 p.
- REBOITA, M. S.; NIETO R.; GIMENO L.; DA ROCHA R. P.; AMBRIZZI T.; GARREAUD R.; KRIGER L. F. Climatological Features of Cutoff Low Systems in the Southern Hemisphere, **Journal Geophysical Research**, v. 115, D17104, doi:10.1029/2009JD013251. 2010.
- RONDANELLI, R.; GALLARDO, L.; GARREAUD, R. 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. **Journal Geophysical Research**, v. 107(D23), 4677, doi:10.1029/2001d001334. 2002.
- SAULO, A.C, NICOLINI, M.; SIN CHAN Chou. Model characterization of the South American low-level flow during the 1997-1998 spring-summer season. **Climate Dynamics**, v. 16, p. 867-881. 2000.
- SALIO, P., NICOLINI M.; SAULO, A. C. Chaco Low-level jet events characterization during the Austral Summer Season by ERA Reanalysis. **Journal Geophysical Research**, v. 107(D24), 4816, doi:10.1029/2001JD001315. 2002.
- TRENBERTH, K. E. y MO K. C. Blocking in the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 113, p.3-21. 1985.