

# Meteoro logica

**PUBLICACIÓN ESPECIALIZADA  
EN TEMAS METEOROLÓGICOS**

**Versión en línea ISSN 1850-468X**

**Volumen 36      Número 1      Año 2011**

## **CONTENIDO:**

- Marcela Torres Brizuela, Ricardo Vidal, Yanina García Skabar, Matilde Nicolini y Luciano Vidal:*  
**ANÁLISIS DEL ENTORNO SINÓPTICO ASOCIADO CON EVENTOS DE BOW-ECHO EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES** 3
- Roberto De Ruyver, Juan de Souza, Susana A. Bischoff y Norma Formento:*  
**CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA ASOCIADA A LOS CASOS DE APARICIÓN DE ESPORAS DE ROYA DE LA SOJA EN PARANÁ, ARGENTINA** 19
- Diego C. Araneo, Silvia C. Simonelli, Federico A. Norte, Maximiliano Viale y Jorge R. Santos:*  
**CARACTERIZACIÓN DE SONDEOS ESTIVALES DEL NORTE DE MENDOZA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES Y OBTENCIÓN DE UN ÍNDICE DE CONVECCIÓN** 31
- Notas y Correspondencia**
- Elisa C. Nure y Estela A. Collini:*  
**APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA SIG PARA LA REPRESENTACIÓN DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA MARINA EN EL ATLÁNTICO SUR** 49

## **Editorial**

*Estimados lectores, tenemos el agrado de presentar un nuevo volumen de la revista Meteorologica, el cual incluye siete artículos en temáticas de particular interés para la comunidad científica sudamericana y una Nota. La mayor parte de los trabajos que conforman este volumen han sido presentados previamente, en una versión más reducida, en el XIII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología (CLIMET XIII) y X Congreso Argentino de Meteorología (CONGREGMET X) realizado en Buenos Aires, Argentina en octubre del año 2009.*

*Recordamos que el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) ha recientemente confirmado la presencia de Meteorologica dentro del Núcleo Básico de Revistas Científicas Argentinas, lo que representa un reconocimiento de la excelencia de nuestra revista. Los artículos publicados en Meteorologica son indizados o resumidos por Meteorological & Geostrophysical Abstracts desde el año 2005 y la revista está incluida en el catálogo del sistema LATINDEX. Asimismo, Meteorologica está cobrando mayor visibilidad a partir de su incorporación al portal Scielo Argentina (Scientific Electronic Library Online: [www.scielo.org.ar](http://www.scielo.org.ar)) y al trabajo que se está realizando en pos de la actualización y optimización de su página web ([www.cenamet.org.ar/cam/meteorologica](http://www.cenamet.org.ar/cam/meteorologica)).*

*Invitamos nuevamente a todos los profesionales e investigadores que se desempeñan en áreas relacionadas con las ciencias de la atmósfera, a enviar los resultados de sus trabajos para ser considerados como potenciales publicaciones en Meteorologica. Les recordamos que las normas para el envío de manuscritos han sido ampliamente simplificadas. La descripción de las mismas se encuentra al final de este volumen y en la página web de la revista.*

*El Comité Editorial agradece la contribución de los autores, quienes con sus aportes garantizan la continuidad de la revista, y la participación de numerosos científicos argentinos y extranjeros como revisores, quienes avalan la calidad científica de Meteorologica. Asimismo, agradecemos al Centro Argentino de Meteorólogos por su permanente apoyo a este Comité Editorial.*

*La Dirección*



## ANÁLISIS DEL ENTORNO SINÓPTICO ASOCIADO CON EVENTOS DE BOW-ECHO EN LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Marcela Torres Brizuela<sup>1</sup>, Ricardo Vidal<sup>1,2</sup>, Yanina García Skabar<sup>2,3</sup>  
Matilde Nicolini<sup>1,4</sup> y Luciano Vidal<sup>5,1,2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN -UBA)

<sup>2</sup> Servicio Meteorológico Nacional

<sup>3</sup> Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas (Facultad de Agronomía – UBA)

<sup>4</sup> Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (UBA/CONICET)

<sup>5</sup> CONICET

(Manuscrito recibido el 22 de abril de 2010, en su versión final el 1 de noviembre de 2010)

### RESUMEN

Durante la madrugada del día 21 de Octubre de 2008 se desarrollaron tres líneas convectivas en la provincia de Buenos Aires, captadas por los radares meteorológicos de las localidades de Ezeiza y Pergamino. La estructura espacial y evolución temporal del campo de reflectividad de estos sistemas, configuración de línea en arco, responde al modo convectivo conocido con el nombre de “bow-echo”. La imagen doppler del radar de Ezeiza registró un fenómeno típico en la parte posterior de estas líneas en arco: los vientos intensos mayores a  $20 \text{ m.s}^{-1}$ .

El objetivo principal de este estudio es comprender las condiciones sinópticas que acompañaron la ocurrencia de estos sistemas para poder contribuir al pronóstico de su ocurrencia. En este evento las condiciones de humedad específica en la zona del norte de la provincia de Buenos Aires ( $q \geq 12-14 \text{ g.kg}^{-1}$ ), así como la de cortante vertical del viento por debajo del nivel de 700 hPa ( $U_s > 15 \text{ m.s}^{-1}$ ) coinciden en indicar al entorno como favorable al desarrollo del mismo, aunque no así los valores disponibles de CAPE evaluados para parcelas que se elevan desde superficie.

*Palabras clave:* Evento bow-echo, radar meteorológico, condiciones sinópticas del entorno.

### SYNOPTIC ENVIRONMENT ANALYSIS ASSOCIATED WITH BOW - ECHO EVENTS IN THE PROVINCE OF BUENOS AIRES

### ABSTRACT

During the morning hours on October 21 2008, three convective lines developed over the Buenos Aires province, and were captured by the meteorological radars located at Ezeiza and Pergamino. The spatial structure and temporal evolution of the reflectivity field of these convective systems present the attributes of the particular convective system referred to as a “bow-echo”. Ezeiza doppler radar images, captured winds stronger than  $20 \text{ m.s}^{-1}$  behind these arc lines, a phenomenon that frequently characterizes the presence of a bow-echo.

The main objective of this study is to understand the synoptic weather conditions accompanying the occurrence of these bow echo events to enhance the weather

forecasting of these systems. On this particular case the specific humidity field over the northern part of the Buenos Aires province ( $q \geq 12-14 \text{ g.kg}^{-1}$ ) and also the environmental vertical wind shear values below 700 hPa meet the required conditions to develop a bow-echo event, although the available surface level CAPE values do not promote this event.

*Keywords:* Bow-echo event, weather radar, environmental synoptic conditions.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes en el estudio de Bow-Echo

Dentro de los estudios observacionales realizados a fines de la década del 80, se destacan los orientados a describir y explicar una estructura del campo de reflectividad de radar caracterizada por su forma particular de arco, por lo que se la conoce como “bow-echo”. Anteriormente, esta conformación había sido identificada por Fujita (1979) no sólo por su peculiar estructura sino también por su larga duración (mayor a 3-4 horas) y su dimensión de 60 a 150 km. Przybylinski (1995), Weisman y Trapp (2003), entre otros investigadores, coinciden en que estas estructuras convectivas en forma de arco o “bow-echo” se desarrollan preferentemente en presencia de una cortante vertical del viento intensa en magnitud ( $U_s > 15 \text{ m.s}^{-1}$ ) en los primeros 2,5 km de altura, en asociación con alta humedad específica en niveles cercanos a superficie ( $q \approx 12-14 \text{ g.kg}^{-1}$ ) y valores de CAPE moderados a intensos ( $\text{CAPE} > 2200 \text{ J.kg}^{-1}$ ). Aunque también hay que destacar que Przybylinski en 1995 documenta casos con valores de CAPE levemente moderados ( $1200-1500 \text{ J.kg}^{-1}$ ) así como posteriormente Chen y otros (2007) obtienen el mismo resultado. Estas estructuras convectivas del tipo bow-echo están caracterizadas por un flujo posterior intenso (RIJ, de aquí en más por sus siglas en inglés “Rear Inflow Jet”) en la parte posterior del sistema (esquemático en la Figura 1). El RIJ se encuentra limitado por un par de vórtices inmersos en la zona de precipitación e interacciona con la ascendente principal, posibilitando la persistencia temporal de los eventos bow-echo.

Esta organización convectiva de escala menor a la de un Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) se evidencia, en su manifestación más severa, en los llamados “derechos” que producen múltiples ráfagas de vientos muy intensos (Johns y Hirt 1987). Burgess y Snull (1990), Schmidt y Cotton (1989) presentan trabajos observacionales de estos “derechos”. Weisman en 1993 simula

numéricamente y de manera simplificada, la evolución temporal de un bow-echo, desarrollado en un entorno típico. Esta evolución permite comprender mejor la interacción entre la dinámica de los vórtices horizontales (en inglés “bookend vortices”) generados dentro de la piscina de aire frío (en inglés “cold pool”) -que se desarrolla por detrás de la línea convectiva-, la RIJ y la vorticidad de eje horizontal asociada a la cortante vertical del entorno. Esta investigación también logra una mejor interpretación física del modelo conceptual de Fujita (1979; Figura 1). Este último trabajo ha sido pionero en sintetizar la evolución de un bow-echo y en las 2 décadas subsiguientes, dio lugar a numerosos estudios observacionales y de modelado numérico, muy bien sintetizados cronológicamente en la investigación realizada por Weisman (2001). Dada la evidencia de los estudios anteriormente mencionados, existe una probabilidad importante de que este tipo de organización convectiva conduzca a fenómenos de tiempo severo (vientos intensos cerca de superficie, granizo, precipitaciones intensas y en algunos casos tornados) con sus consecuentes daños infligidos en personas y/o propiedades. Esto determinó que en la región del Medio-Oeste de los Estados Unidos, durante la primavera-verano del 2003 se llevara a cabo un experimento de campaña multi-observacional (aviones, radares, sondeos, sondas lanzadas desde aviones y una extensa red de mesoescala) denominada “The Bow-Echo and Meso-convective Vortex Experiment” (BAMEX) para observar y documentar este tipo de fenómenos (Davis y otros, 2004). Dicho experimento dio como resultado numerosos estudios observacionales, entre ellos Atkins y otros (2005), Wheatley y otros (2006) y Wakimoto y otros (2006), como así también experimentos de modelado numérico entre los cuales se encuentran Atkins (2006) y Parker (2007a, 2007b). Estos trabajos permitieron conocer las condiciones del entorno que favorecen el desarrollo de estos fenómenos, como así también una mejor comprensión de las características dinámicas en la evolución de este tipo de eventos.

En lo que respecta específicamente al estudio observacional de líneas convectivas o más comúnmente denominadas líneas de inestabilidad (LI) en la Argentina, resulta pionero el trabajo elaborado por Lichtenstein y Altinger (1970) en el que estudiaron parámetros e índices meteorológicos asociados con LI extensas ocurridas dentro de un área comprendida entre los meridianos 65°O y 55°O y las latitudes de 40°S y 30°S para la estación cálida del decenio 1958-1967. En esta línea de investigación se destaca el estudio realizado por Gordillo (1996) donde además introduce algunas imágenes del radar analógico M-33 de Ezeiza, ya en desuso, aunque en dichas imágenes se observa claramente una LI en forma arco (posible bow-echo). Debido a que la instalación de los primeros 2 radares meteorológicos de nueva generación (radares Doppler de Ezeiza y Pergamino), data de comienzos del año 2000 y 2006 respectivamente, aún no existen estudios de tipo climatológicos de LI elaborados con los datos de los radares anteriormente mencionados dentro de su zona de influencia.

De lo expuesto anteriormente, surge claramente la necesidad de avanzar más en el conocimiento de los mecanismos dinámicos, termodinámicos y condiciones asociadas a la formación de LI del tipo bow-echo, con el fin de contribuir a proveer elementos útiles que puedan ser utilizados en el pronóstico o alerta de los mismos.

## 1.2. Evento 21 de Octubre de 2008

Durante la madrugada del día 21 de Octubre de 2008 se desarrollaron en la provincia de Buenos Aires tres líneas convectivas cuya estructura espacial y evolución temporal, responde a la clasificación de bow-echo. Las estructuras de reflectividad pudieron ser identificadas mediante los radares meteorológicos de Ezeiza y Pergamino que evidenciaron tres “bow-echoes” diferentes con tiempos de duración de aproximadamente 4, 6 y 3 horas respectivamente y que denominaremos B1, B2 y B3 de acuerdo al orden de visualización. De las imágenes Doppler del radar de Ezeiza se pudieron captar vientos intensos mayores a  $20 \text{ m.s}^{-1}$  por detrás de los bow-echoes. El principal objetivo de este estudio es comprender las condiciones sinópticas y de mesoescala que acompañaron la ocurrencia de estos fenómenos así como reconocer si los mismos ocurren en un entorno similar a los encontrados por los investigadores ya mencionados en la sección 1 y así poder contribuir al pronóstico de estos eventos

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

El entorno sinóptico y de mesoescala se analizó a través de los datos observacionales suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), radares meteorológicos doppler ubicados en las localidades de Ezeiza y Pergamino, estaciones

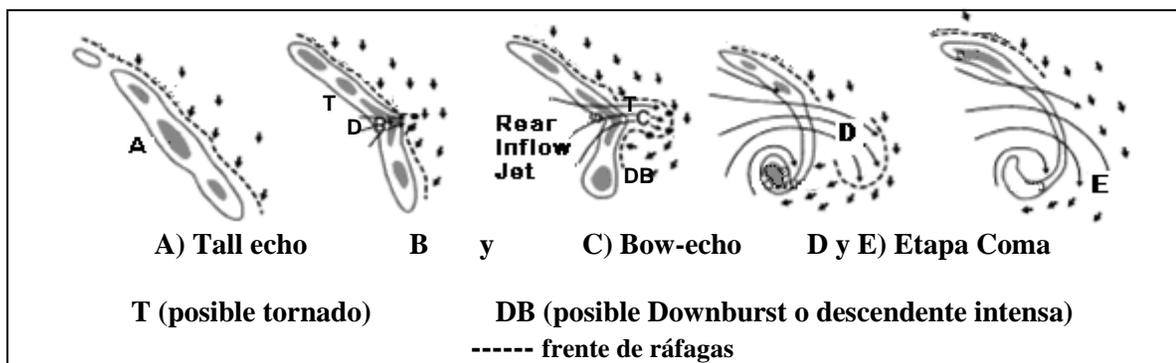


Figura 1: Diagrama esquemático (adaptado al Hemisferio Sur del original de Fujita, 1979) que muestra la evolución de un bow-echo. Las flechas indican el flujo relativo a la tormenta y el sombreado gris, los núcleos más intensos de reflectividad de radar.

meteorológicas automáticas de la red Guía Estratégica para el Agro (GEA), de la red de la Bolsa de Comercio de Rosario, del Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (GCBA), de la Policía de la Provincia de La Pampa y particulares; análisis operativos del National Center for Environmental Prediction (NCEP) e imágenes satelitales GOES 12.

En cuanto a las imágenes Doppler de velocidad radial sólo se contó con las imágenes del radar de Ezeiza. Además, resulta menester aclarar que la metodología de trabajo de dicho radar sólo contempla el escaneo para un solo ángulo de elevación de antena ( $\theta = 0,5^\circ$ ), lo que resulta en una seria limitación para poder obtener cortes verticales de velocidad doppler para un determinado azimut. Para obtener la configuración del entorno sinóptico y de mesoescala también se utilizaron los análisis del modelo BRAMS, en su versión 3.2, que está implementado en tiempo real en el Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos de la UBA (BRAMS-UBA). Los productos generados por el modelo y las características principales de su configuración se describen en la página web [www.brams.at.fcen.uba.ar](http://www.brams.at.fcen.uba.ar). Los análisis utilizados cuentan con dos dominios con anidado interactivo cuya resolución espacial es de 80 y 20Km y se generan dos veces al día a las 00 y 12 UTC. El dominio de menor resolución abarca la zona continental y los océanos adyacentes entre  $5^\circ\text{N}$  y  $45^\circ\text{S}$ , mientras que el de mayor resolución abarca el centro y norte de Argentina y Chile, sur de Brasil y Bolivia y Uruguay y Paraguay. El modelo BRAMS-UBA utiliza como condición inicial los análisis operativos Global Data Assimilation System (GDAS) del National Centers for Environmental Prediction (NCEP), con una resolución horizontal de  $1^\circ$  y vertical de 26 niveles. Mediante el modelo se realiza una reducción de escala incorporando datos de humedad de suelo diarios, de temperatura de la superficie del mar, de topografía y de uso de suelo de 1 km de resolución, y de tipo de suelo de 5km de resolución.

### 3. ANÁLISIS DEL ENTORNO SINÓPTICO

El análisis de espesores y presión de superficie a las 12Z del día previo a la tormenta (Fig. 2a) muestra un frente frío avanzando sobre el Océano Atlántico, cuyo eje se extiende abarcando el sur de la provincia de Buenos Aires hacia una zona de

baja presión en la región de Cuyo. Los espesores y el flujo cerca de superficie indican una intensa advección cálida prefrontal generada a partir de un flujo intenso oriundo del anticiclón del Océano Atlántico. Los campos de 500hPa (Fig. 2b) muestran un eje de cuña retirándose hacia el Océano Atlántico, e insinúan un eje de vaguada de onda media a larga sobre el Pacífico. La zona central del país, se encuentra en la parte delantera de vaguada y dentro de ésta, se observa inmersa una onda corta sobre la zona cordillerana del norte del país. Se observa también vorticidad ciclónica asociada a la zona frontal de niveles bajos, al Sur de Buenos Aires.

Tanto el nivel de 925hPa (Fig. 2c) como así también el de 850 hPa (no mostrado) evidencian un intenso flujo del sector Norte desde los  $10^\circ\text{S}$  hasta los  $35^\circ\text{S}$ , con velocidades de entre 20 y 35Kt, que confluye hacia una zona de baja presión relativa a sotavento de la Cordillera de los Andes, donde tiene lugar una notable convergencia de humedad (no se muestra), extendiéndose hacia el sur de Córdoba y el noroeste de Buenos Aires.

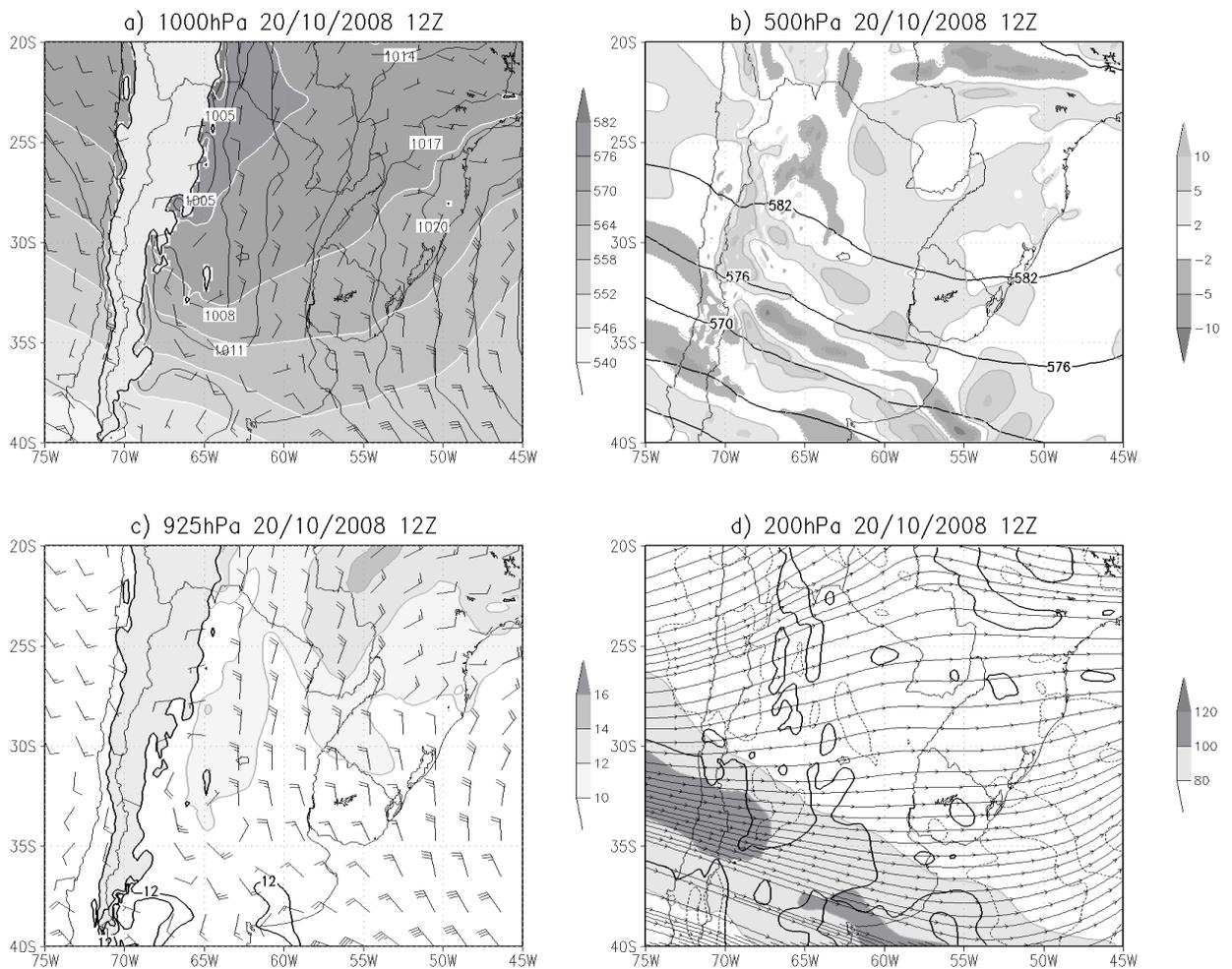
El nivel de 200hPa exhibe una intensa corriente en chorro con un máximo de 100Kt (Fig. 2d), asociada a la zona baroclónica que se extiende desde la zona de Cuyo hacia el Sur de Buenos Aires, con patrón difluente y áreas de divergencia leves en la región central del país y sobre el frente frío en el Océano Atlántico.

Doce horas más tarde se observa un aumento de espesores al Norte de  $35^\circ\text{S}$  persistiendo la advección cálida, así como también se aprecia curvatura ciclónica en las isohipsas evidenciando una zona frontal estacionaria sobre el norte de Buenos Aires. Un frente frío avanza sobre la región patagónica con orientación meridional, con importante advección de aire frío posterior y espesores inferiores a 5400mgp (ingresando al dominio en esta hora, Fig. 3a). El campo de 500hPa (Fig. 3b) muestra un eje de vorticidad ciclónica sobre la zona central del país posiblemente asociado con la zona frontal estacionaria. También se insinúa una vaguada más pronunciada e intensa, con eje de mínimas presiones sobre la costa de Chile, proyectando su parte delantera sobre la zona central del país. Esta vaguada está vinculada con el frente frío que avanza por el norte de la Patagonia. Tanto el nivel de 925hPa (Fig. 3c) como así también el de 850hPa, muestran en esta hora una persistencia del flujo intenso del sector Norte de

hasta 35Kt, con convergencia intensa en el centro y oeste de Buenos Aires que se corresponde con el máximo de generación de actividad convectiva que se visualiza tanto en las imágenes de radar como así también en las imágenes satelitales en horas cercanas (Figura 8, 11 a, b y c). También en el nivel de 925hPa, la figura 3c evidencia una zona elongada centrada en (35°S, 61°O), donde tanto los valores de humedad específica, como los valores de cortante vertical  $U_s$  (en el espesor 1000-700 hPa) se ubican dentro del rango de valores favorables

para el desarrollo de eventos bow-echo. En lo que respecta a los valores de CAPE evaluados desde superficie (no se muestran), los mismos son cercanos a cero, muy posiblemente por el horario nocturno y porque pueden existir parcelas que asciendan desde distintos niveles.

En el nivel de 200hPa (Fig. 3d) persiste la corriente en chorro con máximo de 100kt, con divergencia sobre la zona centro-oeste de Buenos Aires, extendiéndose hacia el Océano Atlántico.



**Figura 2:** Análisis BRAMS-UBA, dominio con 20 km de resolución. Campos correspondientes al 20/10/2008 12Z. a) Presión al nivel del mar (hPa, contornos), espesores 1000/500 hPa (dmgp, sombreado), viento en 1000 hPa (nudos, barbas). b) Geopotencial (dmgp, contornos) y vorticidad ( $10^{-5} s^{-1}$ , sombreado) en 500hPa. c) Relación de Mezcla (g/kg, sombreado), cortante entre 700 y 1000 hPa ( $m/s$ , contornos a partir de 12  $m/s$  a intervalos de 3  $m/s$ ) y viento (nudos, barbas) en 925 hPa. d) Isotacas (nudos, sombreado), líneas de corriente, divergencia ( $10^{-6} s^{-1}$ , contornos: línea llena divergencia y línea punteada convergencia, se indican solo los valores de 1 y  $5 \cdot 10^{-6} s^{-1}$ ) en 200 hPa.

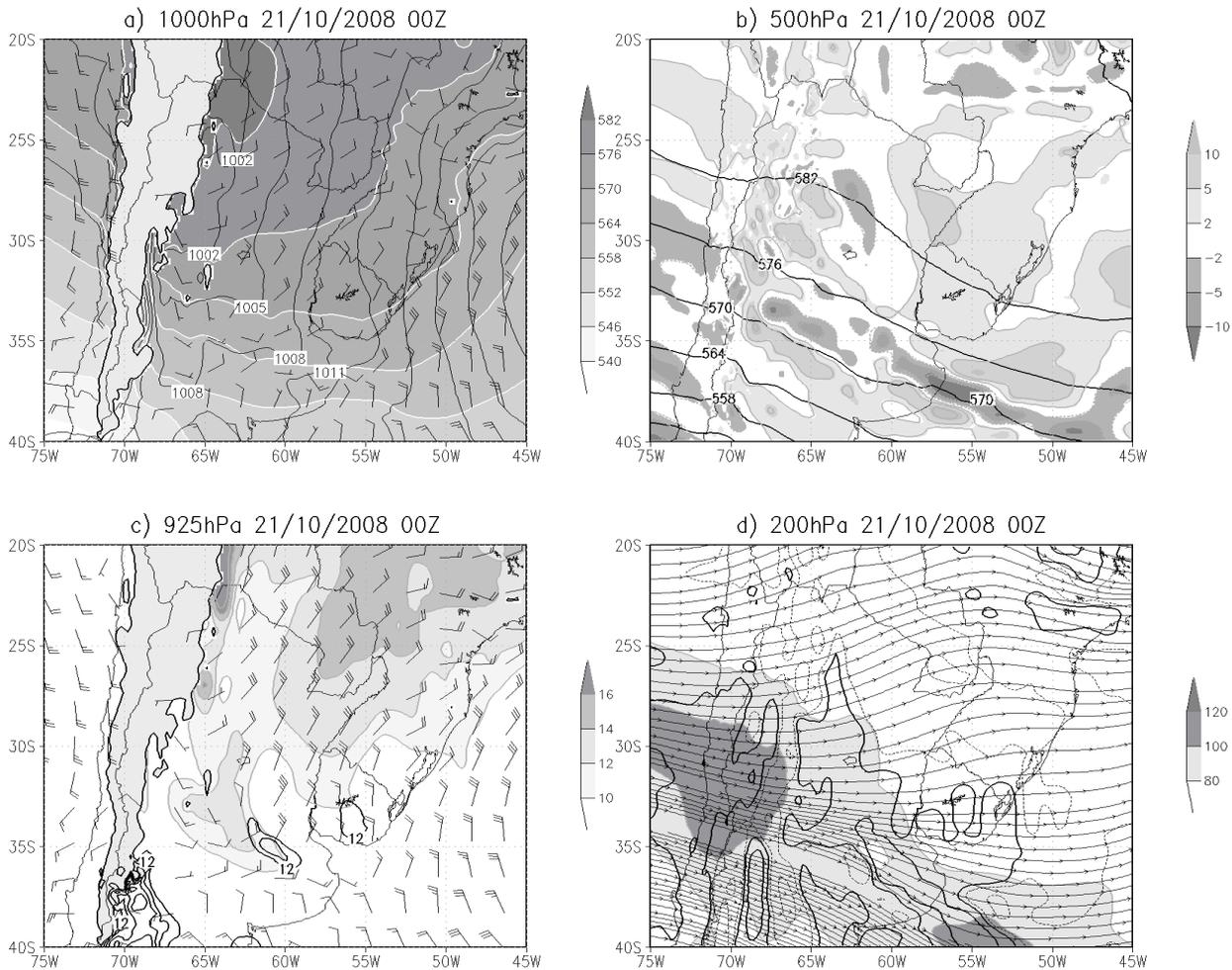


Figura 3: Ídem figura 2 correspondiente al 21/10/2008 00Z.

Los análisis de superficie y espesores de las 12Z del 21/10/08 (Fig. 4a) evidencian un desvanecimiento de la configuración de frente estacionario. Se observa que la zona baroclínica asociada avanza sobre Uruguay. Un frente frío que anteriormente se encontraba sobre el norte de la Patagonia ha avanzado sobre la provincia de Buenos Aires. El campo de 500hPa (Fig. 4b) en la región al norte de 35°S, evidencia la parte delantera de vaguada dentro de la cual se aprecian, inmersas, ondas cortas, posiblemente generadas por el flujo intenso en niveles medios y altos de la troposfera interactuando con la topografía de la Cordillera de los Andes. También se observan perturbaciones de onda corta en respuesta a la convección generada

durante la madrugada, asociada con la formación de varios bow-echoes.

En el nivel de 925hPa (Fig. 4c) así como en 850hPa, continúa el intenso flujo del norte, que se desacelera y converge hacia el norte de Buenos Aires, incrementando la convergencia de humedad en capas bajas de la troposfera. En esta misma figura se observa que la zona que satisface las condiciones de entornos preferenciales para eventos bow-echo, se encuentra desplazada sobre el Río de la Plata y el Uruguay, coincidente con el desplazamiento del sistema convectivo. También se insinúa en la circulación la formación de una zona de baja presión formándose al este de Buenos Aires (ver Fig. 4a). Sobre el centro y sur de esta provincia el flujo ya es del sector Sudoeste. El

campo de isotacas en 200hPa presenta dos zonas de máximos relacionados, uno con la zona baroclínica desplazada hacia Uruguay, y el otro, el más intenso ubicado al sur, con el frente frío ya claramente definido sobre la provincia de Buenos Aires (Fig. 4d). En lo que se refiere a los perfiles

termodinámicos representativos del entorno del bow-echo (fenómeno de mesoescala), es de destacar que el radiosondeo de Ezeiza del 21/10/2008 a las 12 UTC, es posterior al pasaje del sistema B1, por lo cual el mismo sólo resulta representativo de un entorno modificado por la

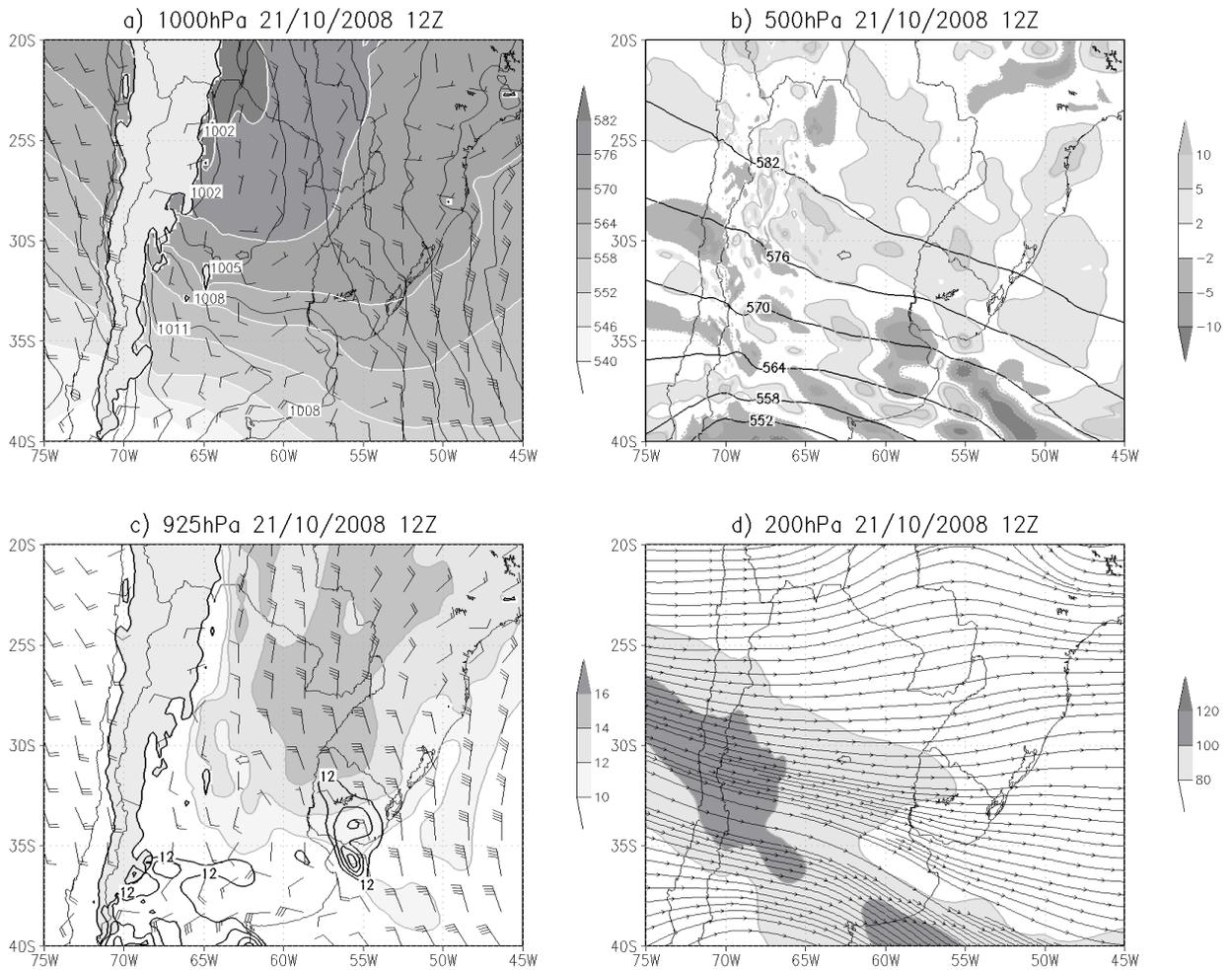


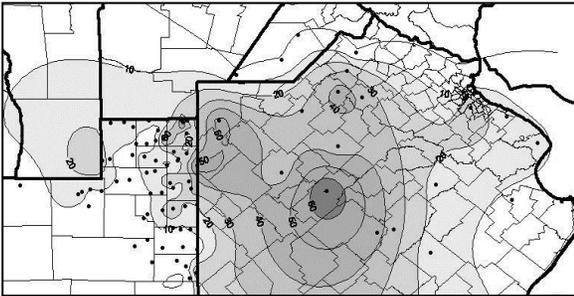
Figura 4: Ídem figura 2 correspondiente al 21/10/2008 12Z.

convección, evidenciando un ajuste de las variables termodinámicas a la saturación. Por este motivo y dado que no se realizan radiosondeos nocturnos no se incluyen los perfiles termodinámicos de las 00 y 12 UTC del día 21/10/2008. El perfil cinemático en los alrededores de Ezeiza previo al pasaje del primer sistema convectivo se describe en la sección 4.

Se ha obtenido, a partir de todas las fuentes mencionadas en el punto 2, el campo de

precipitación acumulada para la zona en cuestión del día pluviométrico 21 (ver Figura 5). Este campo muestra valores importantes en el noroeste de la Provincia de Buenos Aires, con máximos puntuales mayores a 55mm para las localidades de Junín y Gral. Villegas respectivamente. También el extremo noroeste de la provincia de La Pampa presenta acumulados de precipitación significativos llegando a superar en algún puesto de medición valores mayores a 60mm. En el área metropolitana

de Buenos Aires los valores acumulados fueron bastante dispares: Palomar totalizó 55mm, Ezeiza 33mm mientras que el Observatorio Central Buenos Aires y Aeroparque acumularon 13mm.



*Figura 5: Acumulados de 24hs para la precipitación para el día 21/10/2008. Intervalos de isótopos c/10mm. Los límites del mapa trazados son: 38°S- 33°S y 67°O-57°O.*

La estación Ezeiza y la estación meteorológica automática de la red del GCBA ubicada en la ciudad de Buenos Aires en el barrio de Boedo detectaron ráfagas de viento entre 14 y 25 m.s<sup>-1</sup> que serán analizadas en la sección siguiente en relación con la información de radar. Asimismo, de acuerdo con información periodística (TN, www.tnylagente.com.ar), en diversas localidades del Noroeste y Oeste del Gran Buenos Aires (San Martín, Villa Ballester, Haedo y Morón) se reportó la caída de granizo de tamaño pequeño y mediano, en horas de la mañana, asociado con el pasaje de estos sistemas.

#### **4. ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES DE RADAR METEOROLÓGICO**

Se analizaron los datos de reflectividad de los radares ubicados en las localidades de Ezeiza y Pergamino y de velocidad radial del radar de Ezeiza, teniendo en cuenta las limitaciones relativas al barrido de antena mencionadas en la sección 2. Esta metodología ha imposibilitado la realización de cortes verticales de velocidades doppler para los diferentes bow-echos analizados. Si bien se dispuso de las secuencias temporales de reflectividad para diferentes ángulos de elevación, las mismas se muestran en 0,5° y 0,3° de elevación para los radares de Pergamino y Ezeiza

respectivamente, ya que estos resultaron los mejores ángulos para el seguimiento de los sistemas. En los antecedentes mencionados en la introducción los diferentes autores utilizan un amplio rango de elevaciones para seguir a los sistemas (0,2° a 1,5°). En el análisis que sigue se hará referencia a las etapas de los eventos bow-echo de acuerdo al esquema conceptual de evolución elaborado por Fujita (1979) y adaptado al Hemisferio Sur en la Figura 1.

El radar ubicado en la localidad de Pergamino (en adelante, Pergamino) muestra desde las 2:00 UTC del 21/10/08 convección pulsante no organizada, y a las 3:50 UTC se observa el ingreso de una línea convectiva que posteriormente alcanzará la forma de arco (bow-echo) de una longitud de aproximadamente 40km, denotada B1 en la Figura 6a. Una imagen posterior (Fig. 6b a las 6:50 UTC) muestra además la evolución del sistema B1 a una etapa de bow-echo, el avance de otros dos sistemas, uno con su apéndice sur en la localidad de Roberts (38,15°S; 61,2°O) y con su eje aproximadamente hacia el sur de Rufino (34,27°S; 62,7°O) al que se denomina B2, que se encuentra en una etapa de transición entre tall-echo (eco elevado) y bow-echo y un tercer sistema que recién hace su aparición en el radar, denotado B3 que cumple con la etapa de tall-echo. Veinte minutos después, a las 7:10 UTC, el radar de Ezeiza (en adelante Ezeiza) muestra a B1 (Fig. 7a) continuando en la etapa de bow-echo. A las 9:30 UTC Pergamino (Fig. 6c) muestra el avance hacia el este de los sistemas B1, B2 y B3, que se encuentran los dos primeros en etapa coma y el tercero en etapa tall-echo. Esta figura muestra al sistema B3 notablemente más intenso que en la imagen anterior (Fig. 6b) con una extensión de más de 100km, y muy cercano a la localidad de Junín (34,6°S; 60,95°O). El sistema B1 que ya es más maduro en intensidad y extensión se encuentra próximo a la localidad de Ezeiza, donde las imágenes de dicho radar en los diez minutos posteriores (Fig. 7b) exhiben más claramente su extensión (más de 100km) y su incipiente estado de etapa coma. La imagen posterior de Pergamino (Fig. 6d) muestra nuevamente el rápido avance hacia el este de estos sistemas, al sistema B2 ya fuera del alcance del mismo y a B3 en etapa de coma, así como la aparición de otro sistema más extenso, pero aparentemente más lento que se denota S4, ya que el mismo parecería no perdurar y

por lo tanto no cumplir con las condiciones de bow-echo.

Congruentemente con las imágenes de Pergamino, el radar de Ezeiza muestra el veloz avance de estos sistemas en forma de arco (Figs. 7a, 7b, 7c y 7d) y además permite identificar claramente el pasaje de B1 sobre el mismo (Fig. 7d) así como la transición a la etapa coma de B2. A las 10:00 UTC (Fig. 7c) los sistemas B2 y B3 resultan todavía intensos. Resulta importante destacar que el sistema que denominamos S4, no se visualiza con más detalle, debido a la atenuación producida por el sistema B3 (Fig. 7d) y posteriormente no se lo puede distinguir, con lo cual se lo deja fuera de la clasificación bow-echo.

La composición multitemporal de imágenes de radar (Fig. 8a y 8b), permite inferir la duración de cada bow-echo. Los sistemas se propagaron manteniendo su identidad entre 5 y 7 horas, lo que pone en evidencia el grado de organización alcanzado por estas formaciones convectivas. Es de remarcar la elevada velocidad de desplazamiento de las tres líneas convectivas (B1, B2 y B3) que puede ser deducida teniendo en cuenta la secuencia temporal para ambos radares de la reflectividad (Fig. 8a y 8b). De ambas figuras resulta que las mismas se desplazaron una velocidad media de entre 75 y 90 km.h<sup>-1</sup>. En el análisis de las velocidades radiales doppler, resulta necesario aclarar que el rango de velocidades inambiguo (denominado Nyquist) medido por los radares de Ezeiza y Pergamino resulta entre -15 y 15 m.s<sup>-1</sup>, por lo que cuando la velocidad excede dichos umbrales se produce el fenómeno de “aliasing” o repliegue de las velocidades. En la imagen Doppler de las 9:30 UTC (Fig. 9) se observa un intenso influjo por detrás de la línea B1, con magnitudes del viento mayores a 30 m.s<sup>-1</sup> que se identifica con la componente radial del *RIJ*, en donde resulta evidente el fenómeno de “aliasing” mencionado anteriormente. Estas velocidades radiales y las velocidades de desplazamiento estimadas resultan similares a las encontradas por Businger y otros (1998) en un bow-echo ocurrido en Hawai en donde se midieron velocidades radiales de 24-26 m.s<sup>-1</sup>. Esta similitud de valores también se encuentra en los resultados de Atkins y otros (2005) en un evento ocurrido durante el experimento BAMEX. Este flujo estuvo asociado con la ocurrencia de intensas ráfagas de viento en superficie. La estación Ezeiza del SMN a las 9:20

UTC reportó ráfagas de 49Kt (25 m.s<sup>-1</sup>) del sector SSO. En cuanto a la estación Boedo del GCBA registró ráfagas del sector Oeste de 34Kt (17 m.s<sup>-1</sup>) a las 9:30 UTC (asociada con el pasaje del sistema B1, ver Fig. 6c, 7b y 8b), y de 28Kt (14 m.s<sup>-1</sup>) a las 11:30hs (asociada a B2, ver Fig. 7d y 8b).

La figura 10 muestra la hodógrafa del viento en el entorno de Ezeiza, desde superficie hasta 5Km, obtenida mediante el perfil vertical del viento estimado por el radar a las 9:00 UTC, es decir aproximadamente 30 minutos antes del pasaje del sistema B1. Este perfil fue obtenido mediante la metodología VAD (proveniente de las siglas en inglés Vertical Azimuth Display), la cual arrojó un error cuadrático medio para la velocidad menor al 5% por debajo de los 5km. Se puede observar que previo al pasaje del sistema, el perfil presentaba características de low-level jet del sector SE, con un máximo de 40Kt (20 m.s<sup>-1</sup>) a 500m de altura sobre el terreno. Este flujo intenso del SE en superficie se asocia con un perfil de viento que cruza en capas bajas la pendiente del frente estacionario ubicado al norte de Ezeiza. La hodógrafa muestra un giro antihorario del viento con la altura desde el SE en superficie hasta el NO por encima de los 2 km, coherente con la zona delantera de la vaguada presente en niveles medios de la troposfera y la advección caliente en niveles bajos. A su vez la cortante vertical del viento presenta un giro antihorario con la altura y es más intensa en los primeros 1,5 km. La orientación claramente meridional de las líneas podría corresponder, de acuerdo a la teoría de Rotunno y otros (1988), a la perpendicular a la dirección media de la cortante vertical del viento del oeste por encima de 1,5 km de altura, ya inmersa en el aire cálido por delante de los bow echoes.

## 5. ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE

Congruentemente con el análisis sinóptico y de mesoescala realizados en las secciones 3 y 4, las imágenes satelitales GOES 12 infrarrojas que se exhiben en las figuras 11a, b, c, d, e y f indican el avance del frente frío en la región centro-sur del país, junto con la formación de un intenso sistema convectivo asociado a la zona frontal en el que se desarrollaron los bow-echos.

El sistema convectivo cobró vigor durante la madrugada sobre la pendiente del sistema frontal

estacionario que se ubicaba en la región, favorecido por la fuerte cortante vertical del viento y posiblemente por la inestabilidad termodinámica de esos niveles que no es reflejada por el CAPE tradicional que evalúa la inestabilidad de las

parcelas superficiales. Este sistema convectivo, ya evidente en los topes fríos de la imagen de las 23:45 UTC (Fig. 11a), se extiende en las 2 horas posteriores (Fig. 11b y c).

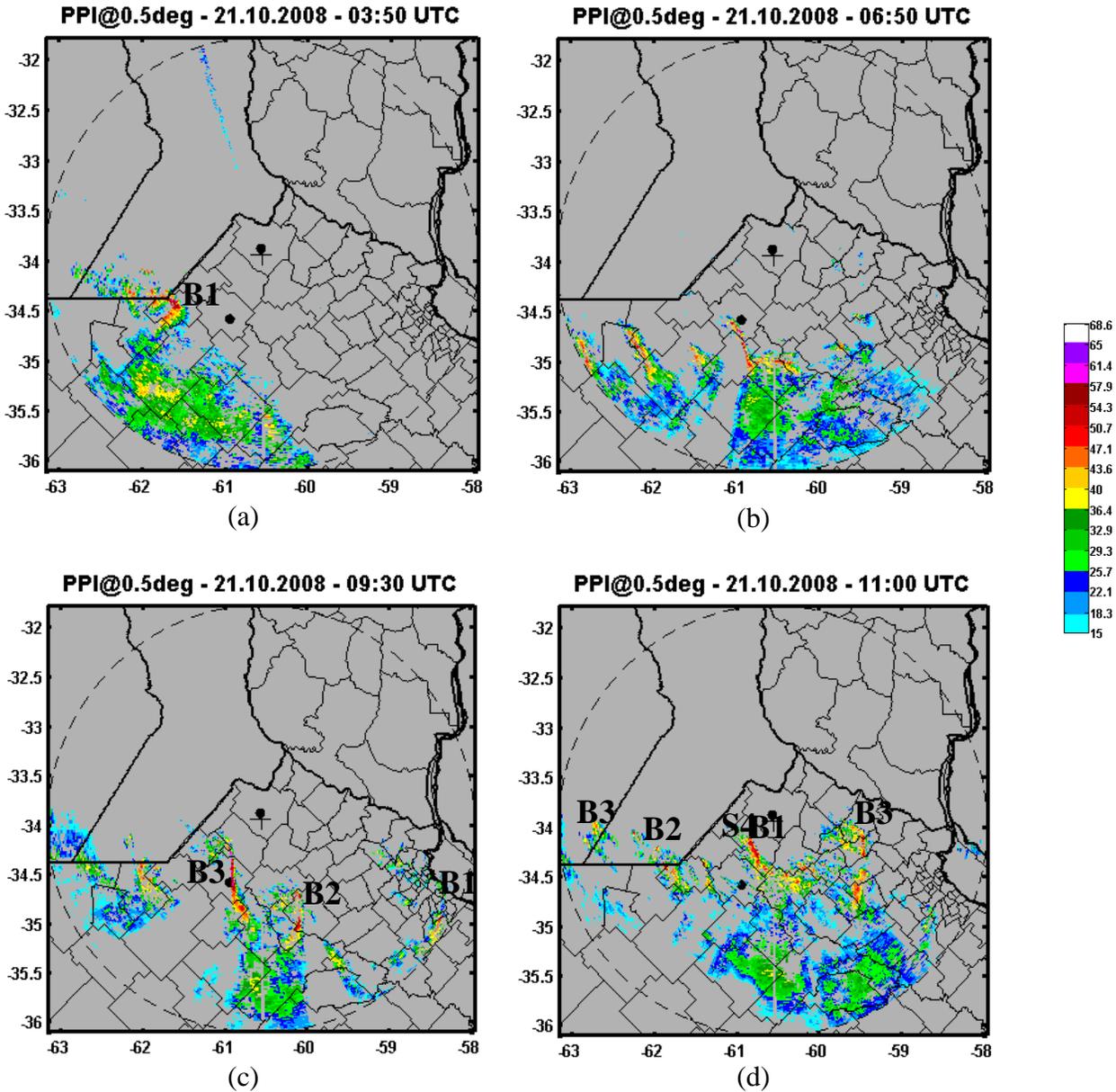


Figura 6: Secuencia temporal de reflectividad (presentación PPI) en niveles bajos del radar de Pergamino. (a) 3:50 UTC, (b) 6:50 UTC, (c) 9:30 UTC y (d) 11:00 UTC.

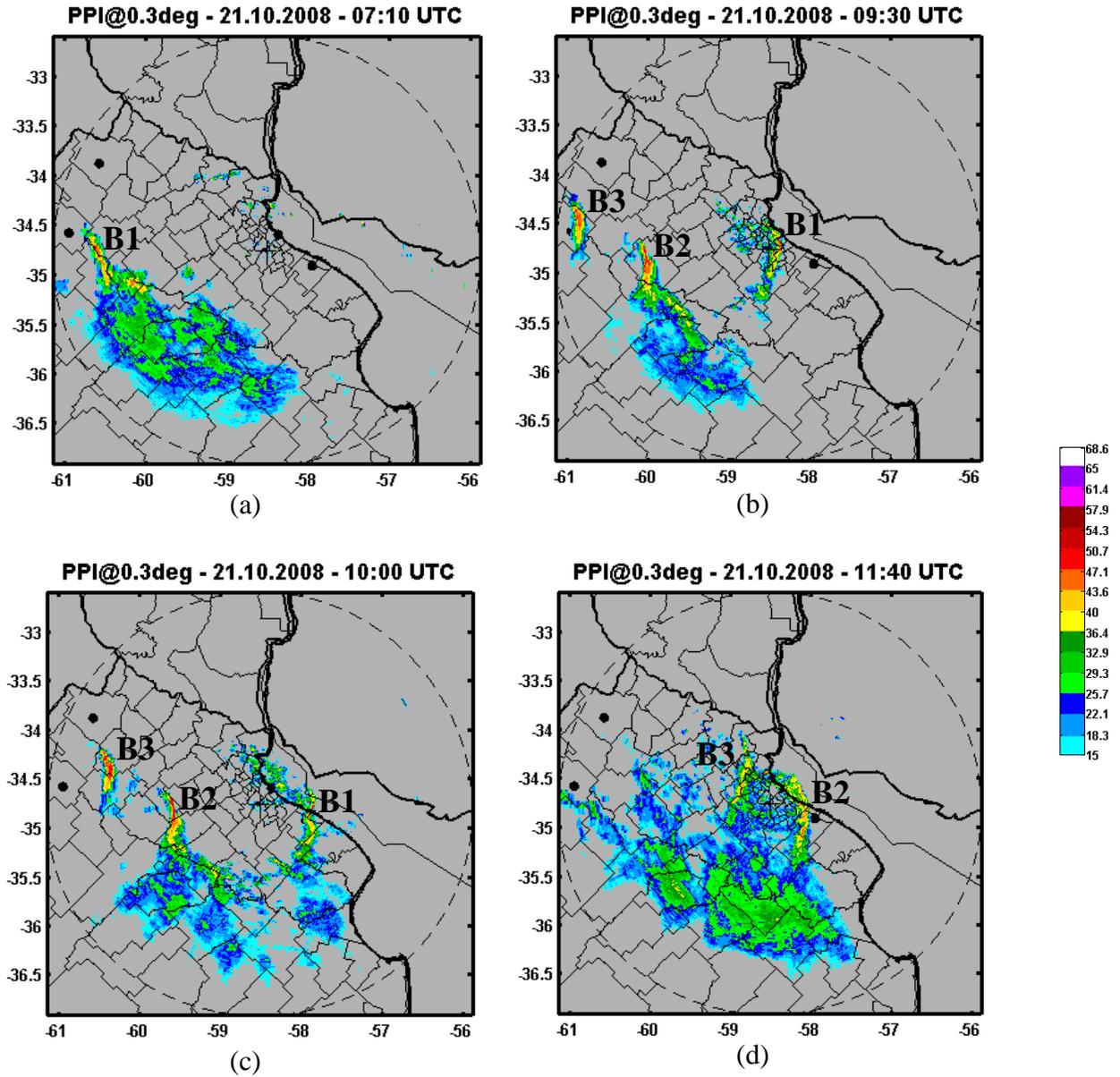


Figura 7: Secuencia temporal de reflectividad (presentación PPI) en niveles bajos del radar de Ezeiza. (a) 7:10 UTC, (b) 9:30 UTC, (c) 10:00 UTC y (d) 11:40 UTC.

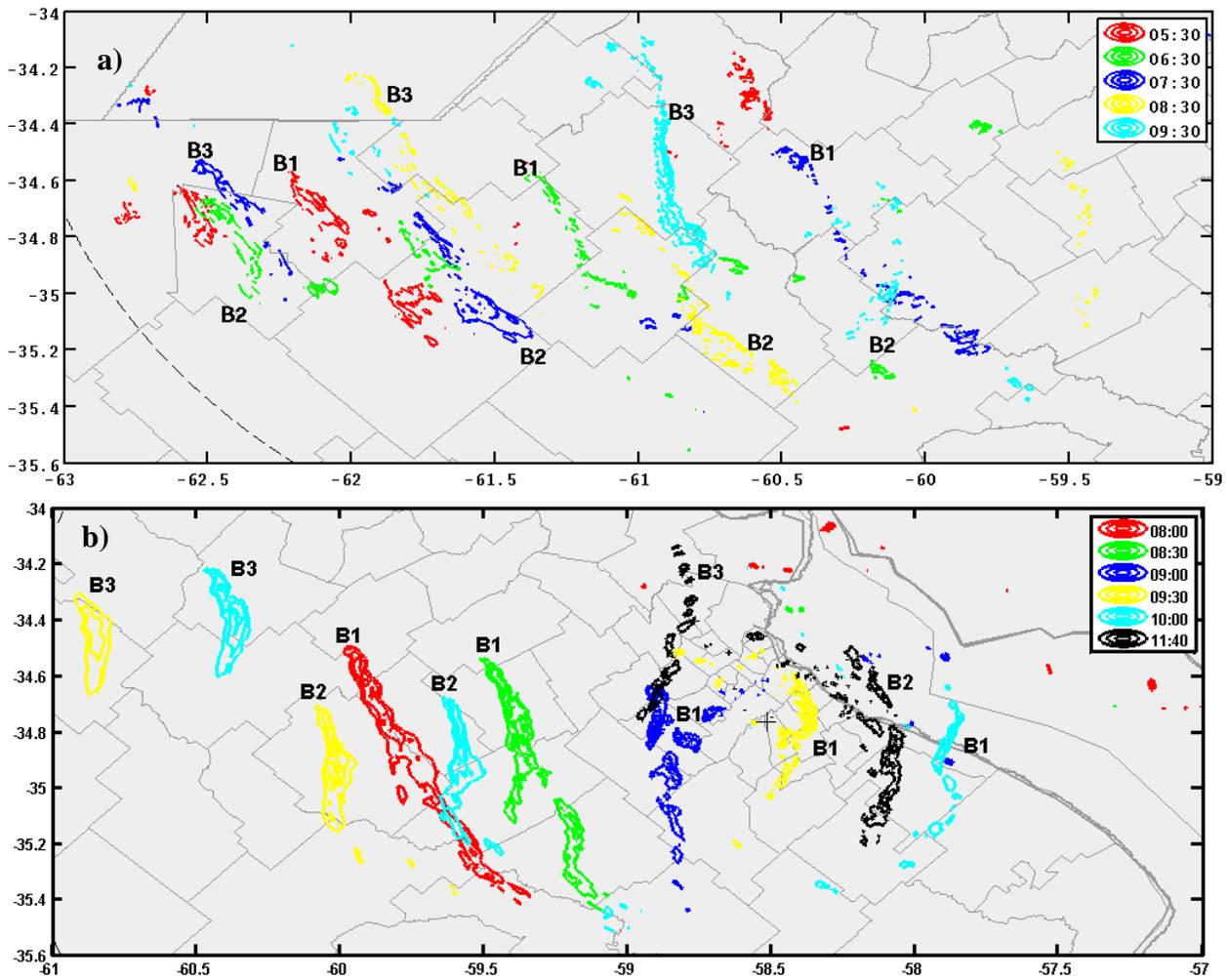


Figura 8: Composición de imágenes de reflectividad de los radares de Pergamino (a) y Ezeiza (b) en donde se observa la evolución temporal de los sistema B1, B2 y B3.

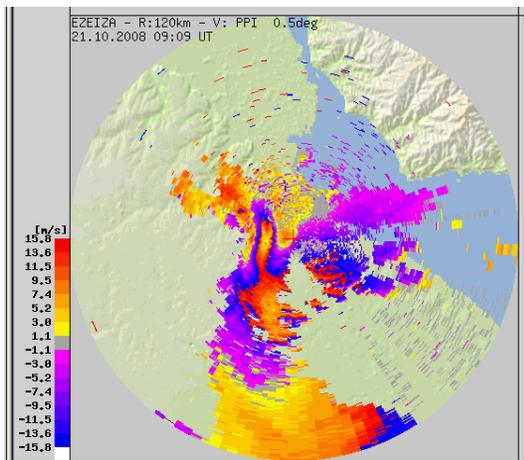


Figura 9: Campo de velocidad radial obtenido por el radar de Ezeiza a las 9:09 UTC del 21/10/08.

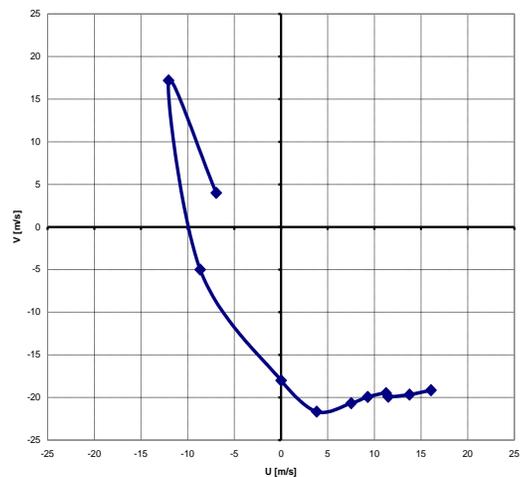


Figura 10: Hodógrafa del viento hasta 5km obtenida a partir del perfil cinemático estimado con el radar de Ezeiza (9:00 UTC). Los puntos corresponden a valores cada 0,5 km.

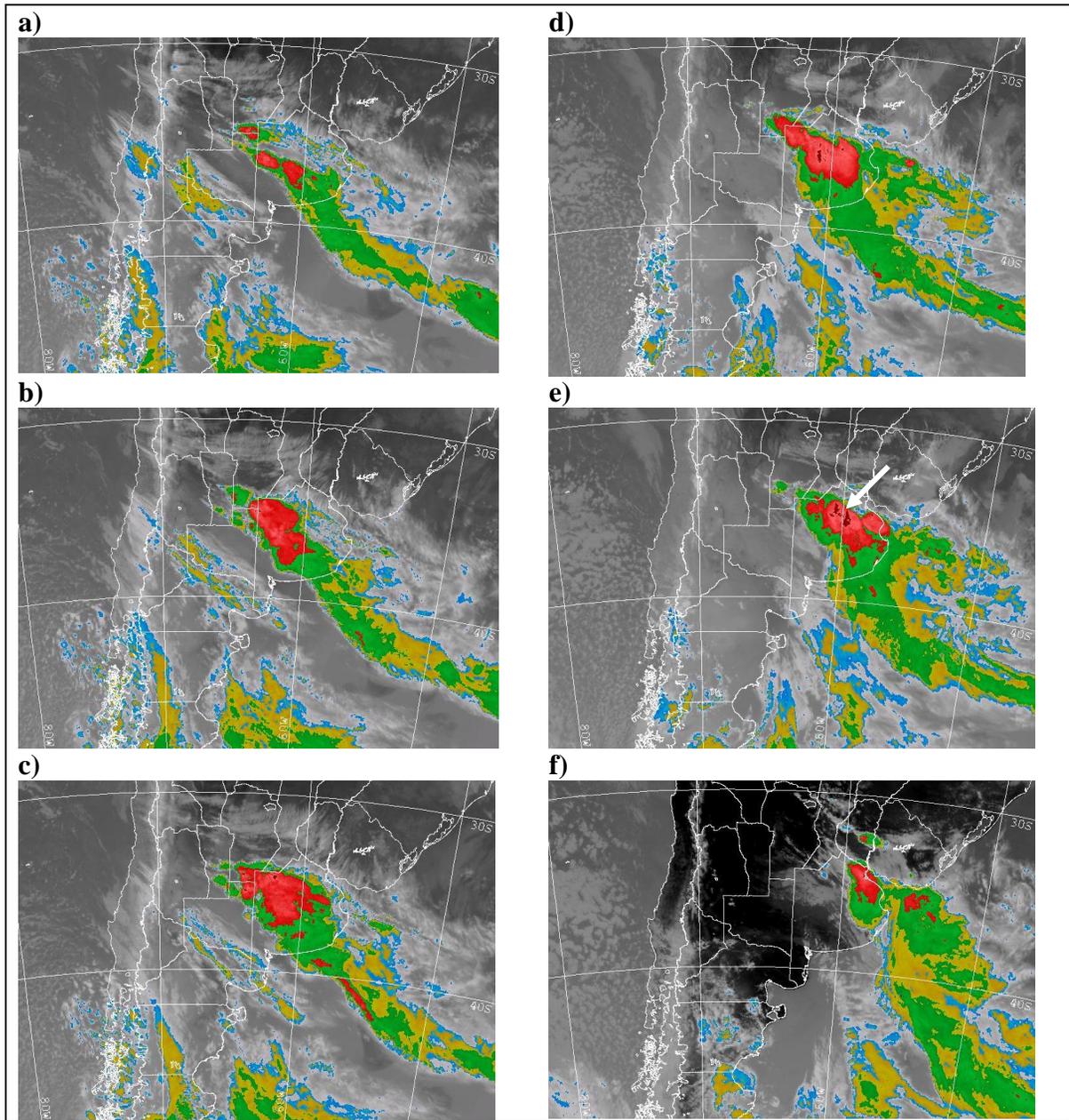


Figura 11: Imágenes satelitales IR GOES-12. a) Día 20/10/2008 a las 2345UTC; b, c, d, e, f) Día 21/10/2008 a las 01:39, 02:45, 08:09, 09:39 y 14:09 UTC respectivamente. La flecha en (e) señala las áreas con temperatura de tope más baja, correspondientes a los sistemas B2 y B3. Código de colores de los umbrales de temperatura en C: — -32, — -40, — -52, — -60 y — -70

La imagen infrarroja de las 8:09 UTC (Fig. 11d) si bien no muestra una notoria extensión areal del sistema, indica una extensión hacia el O del mismo así como 2 pequeñas áreas con tope muy fríos

sobre el centro-norte de la provincia de Buenos Aires. Estas 2 áreas de mínimas temperaturas de brillo que se acentúan y extienden a las 9:39 UTC (Fig. 11e) resultan coherentes con las imágenes de

ambos radares de la misma hora donde los sistemas, B2 y B3 se encuentran en su etapa de bow-echo y tall-echo respectivamente. La imagen satelital posterior muestra el debilitamiento de este sistema, así como su desplazamiento sobre la costa del Río de la Plata.

## 6. CONCLUSIONES

Durante la madrugada del 21/10/2008 en la zona norte de la provincia de Buenos Aires la situación sinóptica estaba caracterizada por la presencia de una zona frontal estacionaria y el avance de un frente frío desde el Sur. En cuanto a las condiciones favorables para el desarrollo de bow-echoes, las mismas se verifican en lo que respecta a valores de humedad específica y cortante del viento observados en una hora cercana al inicio de la actividad convectiva. Sin embargo, no se pudo verificar la existencia de valores moderados de CAPE, debido al hecho de que los análisis corresponden a horas nocturnas y el CAPE calculado se obtiene elevando parcelas desde superficie. En niveles bajos, una sostenida corriente de viento del sector Norte producía intensa convergencia de humedad en capas bajas. Simultáneamente, en altura una intensa corriente en chorro asociada con dos máximos de viento ( $V > 100$  Kts) se proyectaba sobre la región, con flujo difluente y divergencia, favoreciendo los movimientos ascendentes sobre la región. Todos estos factores condujeron a la formación de 3 bow-echoes, de muy rápido desplazamiento (velocidad media estimada entre 75 y 90  $\text{km.h}^{-1}$ ) con una duración promedio estimada de entre 5 y 7 horas. Estos sistemas dieron como resultado importantes acumulados de precipitación, ráfagas de viento que alcanzaron los 49 Kts en Ezeiza y caída de granizo en algunas localidades del Conurbano Bonaerense. El entorno sinóptico descrito es similar al encontrado para los bow-echoes ocurridos en la temporada cálida del Hemisferio Norte. Un ejemplo de ello, es el encontrado por Atkins y otros 2005 en la tormenta de St. Louis, así como también el que describe Johns y Hirt (1987) para los casos de “derecho”. Los estudios previos de Lichtstein y Altinger, 1970, señalan a esta zona de la provincia de Buenos Aires como una zona con alta incidencia de ocurrencia de LI, potencialmente clasificables como eventos bow-echo.

A los fines de caracterizar la estructura vertical termodinámica y cinemática del aire en el cual se forman los mesosistemas al oeste de Buenos Aires y que ingresan a esta provincia, resulta necesario que las localidades de Santa Rosa y Ezeiza realicen los sondeos nocturnos. Estos datos podrían ser asimilados en un futuro a los modelos de pronóstico. La operación reciente de un radar meteorológico en la Estación Experimental Agropecuaria del INTA en la localidad de Anguil (cercana a Santa Rosa, La Pampa), juntamente con el radar instalado en Ezeiza, posibilitarán en el futuro la detección temprana y el avance en el estudio de estos sistemas convectivos.

Asimismo y como recomendación dirigida a posibilitar la identificación de estos sistemas, se considera especialmente necesario efectuar un cambio en la actual estrategia de barrido establecida para los radares Ezeiza y Pergamino. Actualmente, el escaneo del radar en modo doppler, se realiza haciendo un barrido completo para un solo ángulo de elevación de la antena de radar ( $0,5^\circ$ ). Este volumen de datos resulta insuficiente para poder obtener un campo de velocidades radiales completo que permita realizar cortes verticales de estos sistemas. El análisis de los cortes verticales permitiría a su vez caracterizar con mayor detalle su estructura cinemática vertical e identificar patrones significativos tal como la convergencia en niveles medios de la velocidad radial (MARC, por sus siglas en inglés Mid Altitud Radial Convergence). Este parámetro ha sido utilizado por Schmoker y, otros, 1996, para el pronóstico a muy corto plazo de estos sistemas.

Agradecimientos: Al Servicio Meteorológico Nacional, al Centro de Análisis de Riesgos Mitigación y Reconstrucción de la Dirección General de Defensa Civil del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, a la Red GEA dependiente de la Bolsa de Comercio de Rosario y a la Policía de la Provincia de La Pampa por la provisión de los datos meteorológicos. A los alumnos Paula Staszkiw y Sergio Jalfin por su contribución en la recopilación de la información meteorológica. Los siguientes proyectos contribuyeron a la realización de este trabajo: Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica ANPCyT PICT-2007-00355, Universidad de Buenos Aires UBACYT X159 y PIDDEF 47. Los autores Y. García Skabar y L.

Vidal son financiados mediante becas de CONICET.

## REFERENCIAS

- Atkins N., Bouchard C.S., Przybylinski R., Trapp R. y Schmocker G., 2005. Damaging surface wind mechanisms within the 10 June 2003 Saint Louis bow-echo during BAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 2275-2296.
- Atkins N., 2006. On the genesis and strength of mesovortices formed within bow echoes. Preprints, 23<sup>rd</sup> Conf. on Severe and Local Storms, St Louis, MO, Amer. Met. Soc., disponible en CD-ROM.
- Burgess D.W. y Smull B.F., 1990. Doppler radar observations of a bow-echo associated with a long-track severe windstorm. Preprints, 16<sup>th</sup> Conf. on Severe Local Storms., Kananaskis Park, Alberta, Canada, Amer. Met. Soc., 203-208.
- Businger, S., Birchard T., Kodama K., Jendrowski P. y Wang J-J., 1998. A bow-echo and severe weather associated with a Kona low in Hawaii. *Wea. Forecasting*, 13, 576-591.
- Chen, G.T-J., Wang Ch.-Ch. y Chou H.-C., 2007. Case Study of a bow-echo near Taiwan during winter time. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 85, 233-253.
- Davis C., Atkins N., Bartels D., Bosart L., Coniglio M., Bryan G., Cotton W., Dowell D., Jewett B., Johns R., Jorgensen D., Knievel J., Knupp K., Lee W-C., Mc Farquhar G., Moore J., Przybylinski R., Rauber R., Smull B., Trapp R., Trier S., Wakimoto R., Weisman M. y Ziegler C., 2004. The Bow-Echo and MCV Experiment (BAMEX). Observations and Opportunities. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 85, 1075-1093.
- Fujita T.T., 1979. Objectives, operation and results of project NIMROD. Preprints, 11<sup>th</sup> Conf. on Local and Severe Storms, Kansas City, MO, Amer. Met. Soc., 259-266.
- Gordillo S.B., 1996. Línea de Inestabilidad en Argentina tomada por un radar M33. *Anales IX Congreso Brasileiro de Meteorología*, 945-948.
- Johns R.H., y Hirt W.D., 1987. Derechos: widespread convectively induced windstorms. *Wea. Forecasting*, 2, 32-49.
- Lichtenstein E. y Altinger M.L., 1970. Condiciones Meteorológicas asociadas a la ocurrencia de Líneas de Inestabilidad. *Meteorologica*, 1, 79-89.
- Parker M.D., 2007a. Simulated convective lines with parallel stratiform precipitation. Part I. An archetype for convection in along-line shear. *J. Atmos. Sci.*, 64, 267-288.
- Parker M.D., 2007b. Simulated convective lines with parallel stratiform precipitation. Part II: Governing dynamics and associated sensitivities. *J. Atmos. Sci.*, 64, 289-313.
- Przybylinski, R.W., 1995. The bow-echo: observations, numerical simulations, and severe weather detection methods. *Wea. Forecasting.*, 10, 203-218.
- Rotunno, R., Klemp J.B. y Weisman M.L., 1988. A theory for strong, long-lived squall lines. *J. Atmos. Sci.*, 45, 463-485.
- Schmocker, G.K., R.W. Przybylinski y Lin Y.-J., 1996. Forecasting the initial onset of damaging downburst winds associated with a mesoscale convective system (MCS) using the mid-altitude radial convergence (MARC) signature. Preprints, 15<sup>th</sup> Conference Weather Analysis and Forecasting, Norfolk, VA, USA. Amer. Meteor. Soc., 306-311.
- Schmidt J.M. y W.R. Cotton, 1989. A high plains squall line associated with severe surface winds. *J. Atmos. Sci.*, 46, 281-302.
- Wakimoto R. W., H.V. Murphey, A. Nester, D.P. Jorgensen y Atkins N.T., 2006. High winds generated by Bow Echoes. Part I: Overview of the Omaha Bow Echo 5 July 2003 Storm during BAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2793-2812.
- Weisman M. L., 1993. The genesis of severe, long lived bow-echoes. *J. Atmos. Sci.*, 50, 645-670.
- Weisman M.L., 2001.: Bow- Echoes: A Tribute to T. T Fujita. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 82, 97-116.
- Weisman M.L. y Trapp R.J., 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow-echoes. Part I: Overview and sensitivity to environmental vertical wind shear. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 2779-2803.
- Wheatley D., Trapp R. y Atkins N., 2006. Radar and damage analysis of severe bow echoes observed during BAMEX. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 791-806.



## CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA ASOCIADA A LOS CASOS DE APARICIÓN DE ESPORAS DE ROYA DE LA SOJA EN PARANÁ, ARGENTINA

Roberto De Ruyver<sup>1</sup>, Juan de Souza<sup>2</sup>, Susana A. Bischoff<sup>3</sup> y Norma Formento<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) - Instituto de Clima y Agua  
Las Cabañas y Los Reseros s/n – 1686 Hurlingham - Buenos Aires - Argentina

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) - Estación Experimental Agropecuaria Paraná  
Ruta 11, Km 12,5. Oro Verde (3100). Paraná - Entre Ríos - Argentina.

<sup>3</sup>Servicio Meteorológico Nacional - 25 de Mayo 658 - Buenos Aires – Argentina

(Manuscrito recibido el 16 de abril de 2010, en su versión final el 3 de noviembre de 2010)

### RESUMEN

La roya asiática es la enfermedad de mayor relevancia en el cultivo de soja por las pérdidas que ocasiona en algunas regiones productoras del mundo. En Argentina se detectó en el año 2002. En la actualidad la superficie sembrada alcanza las 18 millones de hectáreas. Conocer las características de la circulación de la atmósfera que conducen a la llegada de inóculo (urediniosporas del hongo *Phakopsora pachyrhizi*) en Argentina es el primer paso para la implementación de un sistema de alerta temprana de la enfermedad. Con este objetivo, se utilizaron datos de la trampa cazaesporas de la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Paraná (60°31'O; 31°50'S) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Se estudiaron los campos de circulación media diaria en 1000 hPa para el día 0 y los tres días previos a la captura de urediniosporas. Se determinaron los días mejor correlacionados y se establecieron con ellos los campos medios que mejor describen la circulación observada en el día cero y en los días previos. Los resultados muestran una circulación predominante del noreste e indicarían un ingreso de urediniosporas desde el sur de Brasil.

*Palabras Clave:* Roya asiática de la soja, Circulación atmosférica, Esporas.

## ATMOSPHERIC CIRCULATION ASSOCIATED TO APPEARANCE CASES OF SOYBEAN RUST SPORES AT PARANA, ARGENTINA

### ABSTRACT

Soybean rust is the most relevant disease that causes significant soybean yield losses in some regions of the world. Soybean rust was detected for the first time in Argentina in 2002. Nowadays, 18 million ha are cultivated with soybean in Argentina. The first step to provide an early warning of the disease is to know the atmospheric circulation associated to the appearance of *Phakopsora pachyrhizi* urediniospores. Data from spore samplers trap at INTA Parana station (60°31'W; 31°50'S) was used. The day in which spores were captured from the trap were considered as day zero. Daily mean circulation maps at 1000 hPa were studied to find the best correlated days for zero days and the three previous ones. Mean maps were obtained between the best correlated days. The results showed an

atmospheric circulation pattern from the northeast. This result strongly suggests that spores arrived from southern Brazil.

*Keys Words:* Soybean rust, Atmospheric Circulation, Spores

## 1. INTRODUCCIÓN

La roya asiática de la soja (RAS; enfermedad causada por el hongo *Phakopsora pachyrhizi*) es conocida desde comienzos del siglo pasado en Asia donde se registran importantes pérdidas de rendimiento en el cultivo (Bromfield, 1984). De manera similar a otras royas, la RAS se caracteriza por ocasionar epifitias policíclicas y producir una gran cantidad de inóculo que es transportado por el viento (Bergamin Filho y Amorim, 1996; Bromfield y Hartwig, 1980). Las urediniosporas constituyen el inóculo primario (Agrios, 1997) y pueden ser trasladadas por el viento a grandes distancias e iniciar los procesos epidémicos en presencia de condiciones ambientales conductivas y en sitios muy alejados de su origen.

Actualmente la enfermedad se distribuye por diversos países de África, Asia, Australia y América (Pivonia y Yang, 2004). En Sudamérica se detectó durante el año 2001 en Paraguay y Brasil y en el 2002 en Argentina (Rossi, 2003). En Entre Ríos la RAS se registró por primera vez el 26 de abril de 2004 en lotes de producción de soja de siembra tardía (Formento, 2004).

En el cultivo de soja se reconocen distintas etapas fenológicas que describen los estadios vegetativo y reproductivo de acuerdo a la clasificación realizada por Fehr y otros (1971). Dentro de la etapa reproductiva se describieron distintos estadios de R1 a R8. En general, la magnitud de las pérdidas de producción ocurridas se definen en función del tipo de enfermedad, el estado del cultivo en el que se produce la infección y la severidad. En particular, la RAS disminuye el área fotosintética, produce defoliación anticipada, menor número y peso de granos y baja calidad de las semillas (Melching y otros, 1989; Dupleich y otros, 2005). En Australia y Asia se citan pérdidas superiores al 80% y en Brasil se registraron pérdidas mayores al 75% (Yorinori y otros, 2005). En Entre Ríos, Dupleich y otros (2005) hallaron que las pérdidas ocasionadas por una epifitia moderada al estado de R4 (vainas completamente desarrolladas) fueron

superiores al 28% y el peso de mil granos se redujo un 20%. Posteriormente, durante una epifitia severa en el ciclo 2007-08, de Souza y otros (2009) hallaron que por cada unidad de severidad de RAS (1%) el rendimiento se reduciría en un 0,6% y el peso de mil granos, un 0,28%.

Isard y otros (2005) destacan las tareas de prevención desarrolladas por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos para contrarrestar los efectos del desarrollo de posibles epifitias severas de RAS a comienzos del presente milenio. En base a estos pronósticos, se desarrolló un plan para ser implementado y evaluado durante las epifitias de RAS detectadas en 2004 en la región continental de América del Norte. La urgencia en la elaboración de una propuesta se basó en la gran rapidez de dispersión de las urediniosporas del hongo *P. pachyrhizi* y en sus potenciales efectos perjudiciales sobre el rendimiento.

La atmósfera juega un rol trascendente en el transporte de especies que resultan invasoras en regiones remotas. Algunos procesos de la atmósfera resultan especialmente favorables para la dispersión de organismos que se transportan en ella. Esto puede ocurrir tanto a escalas pequeñas espaciales y temporales para un traslado entre plantas vecinas, como a escalas mayores, permitiendo traslados que pueden durar días y alcanzar distancias de cientos de kilómetros o más. El transporte exitoso de un patógeno a grandes distancias depende de la tasa reproductiva de los patógenos, de la fuente de inóculo local, de la turbulencia atmosférica, de la estabilidad y velocidad del viento y de la supervivencia de las esporas a la exposición a temperaturas extremas, humedad y radiación (Aylor, 2003).

En la actualidad poco se sabe acerca de los factores ambientales que facilitan el paso de las urediniosporas de *P. pachyrhizi* desde el canopeo a la atmósfera (Isard y otros, 2005). Se ha descrito que el momento en que las mismas son liberadas al aire está relacionado con factores ambientales como la luz solar, la temperatura y la humedad; factores del desarrollo de los cultivos como su

etapa de crecimiento y la densidad del canopeo y, por último, factores que llevan a las esporas a ser elevadas por encima del canopeo y ser arrastradas por el viento y la turbulencia, cruciales en la dispersión de las urediniosporas.

Mediante estudios de modelización, Pivonia y Yang (2004) observaron que la RAS puede sobrevivir hasta un nuevo ciclo de cultivo en un hospedador adecuado. Esto se observa especialmente en zonas como el sudeste de China, el este de Australia e Indonesia, el centro y sudeste de África, y en varias localidades del sur de Brasil y Paraguay. En cambio en otras regiones subtropicales que se encuentran alejadas de fuentes de inóculo conocidas, las epidemias pueden ser más leves y tardías. Este es el caso de Argentina, donde no se han detectado reservorios importantes de inóculo (de Souza, 2008), si bien algunas zonas del área sojera del centro-norte del país podrían verse afectadas por RAS que sobreviva en plantas voluntarias de soja, kudzu u otros hospedantes en inviernos poco severos (Formento y de Souza, 2006).

La llegada de una nueva enfermedad como RAS plantea desafíos para un país como Argentina esencialmente agrícola y con aproximadamente 18 millones de hectáreas implantadas de soja (MINAGRI, 2010). El impacto que puede tener esta enfermedad sobre una producción que alcanza las 31 millones de toneladas (campana agrícola 2008/2009) obliga a analizar el riesgo y encontrar estrategias adecuadas de prevención y control. El Programa Nacional de Roya de la Soja llevado a cabo por la red del Sistema Nacional Argentino de Vigilancia y Monitoreo de Plagas (SINAVIMO) que vincula el trabajo integrado entre el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA) y distintas Universidades, permite disponer de información oficial y actualizada sobre las detecciones de RAS en el campo a partir de las denuncias efectuadas al organismo. Este registro resulta de suma utilidad para la confirmación de casos positivos y el conocimiento de su distribución areal.

El presente trabajo tiene por objetivo estudiar y analizar las situaciones sinópticas de la atmósfera que puedan facilitar el transporte de esporas de RAS desde las regiones de origen, tales como Paraguay o Brasil, hacia la región centro y norte de

Argentina. El conocimiento y predicción de la ocurrencia de estas situaciones favorables permitiría mejorar las acciones de prevención de la enfermedad con una mayor anticipación a la actual. La hipótesis que se plantea afirma que la circulación de la atmósfera desde los sectores norte y noreste, prevaleciente entre la primavera y el otoño sobre el territorio de Argentina, está asociada a la llegada de esporas de *P. pachyrhizi*.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Datos

Se dispuso de la información de una trampa cazaesporas instalada en la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Paraná del INTA (60°31' O; 31°50' S) durante el período comprendido entre noviembre de 2003 y julio de 2008 (equivalente a cinco ciclos agrícolas). La captura de esporas se realiza utilizando la metodología descrita por de Souza y Formento (2005). La frecuencia de lectura de la trampa fue de una a tres veces por semana.

Se utilizaron los campos medios diarios de altura geopotencial en 1000 hPa para la región del Hemisferio Sur comprendida entre 20°O y 140°O y entre 10°S y 87,5°S. Los mismos, fueron obtenidos de las cartas de reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay y otros, 1996). La amplia región considerada, tanto al este como al oeste del continente Sudamericano, permite tener una clara visión acerca del comportamiento de los sistemas de alta presión localizados sobre los océanos Atlántico y Pacífico Sur para una correcta visualización de la circulación media diaria de la atmósfera a escala regional en el sur de Sudamérica.

### 2.2. Metodología

La lectura del portaobjetos de la trampa cazaesporas se realizó con una frecuencia variable de 1 a 3 veces por semana en los períodos más sensibles de aparición de la enfermedad (octubre a mayo). Para los 5 ciclos agrícolas considerados se obtuvo un total de 307 lecturas. De ese total, 49 resultaron lecturas positivas (con presencia de urediniosporas). Debido a que muchos de esos días eran muy próximos entre sí (separados por menos de una semana) se obtuvo una sub-muestra de las lecturas positivas para asegurar independencia de

situaciones sinópticas entre lecturas positivas en el cazaesporas. La sub-muestra quedó constituida por 17 días. Para cada uno de los 17 días con lectura positiva se obtuvo el campo medio diario de altura geopotencial en 1000 hPa (o mapa de altura geopotencial) para la región del Hemisferio Sur mencionada previamente. Cada uno de los 17 mapas constituyó el día 0 asociados a una lectura positiva. Los días previos y consecutivos a cada día 0 fueron denominados día -1 (el anterior), día -2 (dos días antes) y día -3 (tres días antes). De igual modo que lo realizado para el día 0, se obtuvieron los campos medios diarios de altura geopotencial en 1000 hPa para los días previos. De este modo, para las 17 lecturas positivas de la sub-muestra se dispuso de los campos medios de altura geopotencial en 1000 hPa para 4 días consecutivos. La metodología establecida por Lund (1963) fue aplicada para los 17 mapas de cada día (0 a -3). A partir de la misma, se pudo determinar una clasificación que determinó el día que mejor se correlacionó con los demás (16 mapas), identificando a ese día de lectura positiva como el mapa Tipo A. Con todos los mapas que mejor se correlacionaron con el mapa Tipo A, se obtuvo el campo medio de las alturas medias diarias geopotenciales en 1000 hPa que mejor describe la circulación observada en el día 0 (lectura positiva en la trampa cazaesporas) en referencia a la EEA Paraná del INTA. De igual modo se obtuvo el mapa Tipo A y el campo medio para cada uno de los días previos (-1 a -3).

En la amplia región de estudio seleccionada en el presente trabajo, tienen gran influencia los anticiclones semi-permanentes y los sistemas de baja presión en la región subpolar. Así, en una región extensa donde entran en consideración simultánea todos ellos, se consideró necesario emplear un coeficiente de correlación más alto que el valor  $r \geq 0,7$  utilizado por Lund (1963) ya que su trabajo abarcó un área mucho menor a la considerada en nuestro estudio. Por esta razón, un valor de coeficiente de correlación  $r \geq 0,85$  fue exigido para la determinación del mapa Tipo A.

La gran cantidad de tiempo que demanda el proceso completo de lectura del cazaesporas impidió que el procedimiento se hiciera rutinariamente de modo diario. Por tal razón, el cambio del portaobjeto, donde se depositaban las esporas, era retirado para su lectura, en promedio,

a intervalos de 2 a 4 días. Además, con el portaobjetos utilizado no fue posible discriminar por día la captura de esporas adheridas a él impidiendo esto conocer con exactitud el día de llegada de urediniosporas. Por este motivo se consideró necesario introducir alguna corrección que permitiera acercarse al día 0 real de llegada de las esporas al portaobjetos del cazaesporas. Tomando como hipótesis lo descrito por Isard y otros (2005) en relación a que la región de origen de las urediniosporas que llegan a Argentina estaría localizada en Paraguay y el sur de Brasil, se corrigió el día 0 de lectura positiva de urediniosporas en función del análisis de las situaciones sinópticas medias diarias y la circulación de la atmósfera. Una circulación de aire desde el sector norte o noreste en el centro de Argentina establecida el día de la última lectura negativa en la trampa cazaesporas, y un cambio de circulación a algún cuadrante del sector sur sobre la región próxima a la provincia de Entre Ríos en algún día intermedio previo al día de cambio del portaobjetos que dio lectura positiva, permitió adelantar el día 0 al día del cambio de circulación.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Lecturas positivas

Para los cinco ciclos agrícolas considerados hubo un total de 307 días de lectura de la trampa cazaesporas, de los cuales 49 días resultaron con detecciones positivas de esporas de *P. pachyrhizi* (Tabla I). Se seleccionó agosto como el primer mes de cada ciclo agrícola.

El registro mensual de la frecuencia de las lecturas negativas y positivas de *P. pachyrhizi* entre agosto y mayo (Tabla II), muestra que la mayor frecuencia coincide con el período que se considera más probable para la aparición de la enfermedad (noviembre a mayo) de acuerdo a Moschini y otros (2005) y Saluso y otros (2005).

Los meses de diciembre, marzo y abril presentan una alta frecuencia de lecturas positivas tanto de manera absoluta como relativa.

No se incluyen en la tabla las 23 lecturas con resultado negativo realizadas en los meses de junio y julio a lo largo de los cinco ciclos agrícolas por tratarse de los meses en los cuales ya no hay cultivos de soja en los campos de producción.

Al analizar los días con lecturas positivas de urediniosporas (49) para los cinco ciclos agrícolas, muchos de ellos se observaron, tal como ya se mencionó anteriormente, o bien en lecturas realizadas en días consecutivos, o bien en lecturas que estuvieron espaciadas cada dos o tres días pero que fueron lecturas consecutivas entre sí.

Debido a que el objetivo del trabajo se basó en detectar las situaciones sinópticas propicias para el traslado de urediniosporas desde las regiones de origen del inóculo hacia Argentina, las lecturas consecutivas positivas en la trampa cazaesporas (aún las espaciadas por algunos días) no aportaban información nueva o independiente en relación a la circulación de la atmósfera.

Campaña agrícola	Días observados	Días con observación de <i>P. pachyrhizi</i>	
		n	%
2003-2004	32	12	24,5
2004-2005	78	10	20,4
2005-2006	67	13	26,5
2006-2007	73	12	24,5
2007-2008	57	2	4,1
Total	307	49	100,0

Tabla I: Lecturas en la trampa cazaesporas en la EEA Paraná del INTA por ciclos agrícolas.

Año	2003/4		2004/5		2005/6		2006/7		2007/8		Total	
	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P
agosto	-	-	1	0	-	-	4	1	4	0	9	1
septiembre	-	-	3	0	4	4	4	0	4	0	15	4
octubre	-	-	3	0	6	2	3	0	5	0	17	2
noviembre	4	1	6	0	8	0	6	0	4	0	28	1
diciembre	0	7	12	1	5	3	3	0	4	0	24	11
enero	4	4	20	2	9	0	6	1	7	0	46	7
febrero	6	0	19	1	6	2	4	1	6	1	41	5
marzo	2	0	5	6	8	1	3	2	6	0	24	9
abril	4	0	-	-	5	1	0	3	8	1	17	5
mayo	-	-	-	-	5	0	1	4	8	0	14	4
Total	20	12	69	10	56	13	34	12	56	2	235	49

Tabla II: Frecuencia mensual de lecturas negativas (N) y positivas (P) de urediniosporas *P. pachyrhizi* en la EEA Paraná del INTA. El signo (-) indica ausencia de medición.

Así, buscando independencia entre situaciones sinópticas que pudieran ser favorables a la llegada de urediniosporas, se establecieron dos condiciones: a) para tomar como independiente una lectura positiva, debía existir al menos una lectura negativa inmediata anterior y b) aun en los casos en los que se cumpliera la condición a), se exigió que dos lecturas positivas estuvieran espaciadas por un intervalo mayor a 10 días. La primera condición se estableció porque una lectura negativa posterior a una lectura positiva indica que hubo deposición de esporas asociadas a un cambio

de circulación en la atmósfera. La segunda condición asegura absoluta independencia entre situaciones sinópticas que producen lecturas positivas. Cuanto mayor sea la distancia en días hasta la próxima lectura positiva en la trampa cazaesporas, más probable resultará la ocurrencia de un cambio de circulación por pasaje de algún sistema frontal frío y, por lo tanto, la instalación de un campo de circulación diferente entre ambas lecturas positivas. Como resultado de estas condiciones, la muestra de días con lecturas positivas de urediniosporas se redujo a 17.

Para el día 0 de lectura positiva y los días previos a él (en forma independiente para el día -1, día -2 y día -3), se obtuvieron los mapas Tipo A (Tabla III) en base a la metodología propuesta por Lund (1963) utilizando un coeficiente de correlación  $r \geq 0,85$ . La determinación del mapa Tipo A para cada día sigue el procedimiento ya descrito previamente. El mapa Tipo A, y aquellos que mejor se correlacionaron con él, determinaron el campo medio de los días 0 a -3 (Fig. 1). Entre los días -3 a -1, se observaron los anticiclones semi-permanentes del Pacífico y del Atlántico Sur en sus posiciones normales y claramente definidos. Especialmente en los días -2 y -1, la circulación fue del sector noreste, con vientos provenientes del anticiclón del Atlántico Sur, y el sistema de baja presión instalado en el norte de Argentina reforzó esa circulación. Para el día 0 se profundizó el sistema baja presión y la circulación en todo el noreste del país cambió al sector norte. Al mismo tiempo, para el día 0, se observó un desplazamiento del anticiclón del Pacífico Sur hacia el sudeste, hacia donde la altura de la Cordillera de los Andes disminuye su altura, iniciando de ese modo sobre el continente el cambio de masa de aire que ocurre asociado al pasaje de sistemas frontales fríos.

Día	Día del Mapa Tipo A	Cantidad de mapas ( $r \geq 0,85$ )
0	27/03/06	4
-1	26/03/06	5
-2	20/02/08	5
-3	19/02/08	7

*Tabla III: Mapa Tipo A para el día 0 y los días previos a la lectura positiva de urediniosporas en la EEA Paraná del INTA. Por cada día se muestran la cantidad de mapas que se correlacionaron con el mapa Tipo A.*

La corrección introducida al día 0 de lecturas positivas en la trampa cazaesporas mediante el análisis de las situaciones sinópticas, permitió ajustar el día 0 en 7 de los 17 días de lecturas positivas. En los 10 días restantes, el análisis de la

situación sinóptica no permitió despejar la incertidumbre acerca del verdadero día en que las urediniosporas alcanzaron la trampa cazaesporas. La nueva sub-muestra resultante quedó constituida por 7 días de lecturas positivas en los cuales 2 días no necesitaron modificación del día 0 y 5 días de lecturas positivas fueron desplazados (adelantados) entre 1 y 3 días. Al aplicar la metodología de Lund a la nueva sub-muestra, se utilizó un coeficiente de correlación  $r \geq 0,80$ . Se determinó el mapa Tipo A para el día 0 de cada lectura positiva (idéntico procedimiento al explicado anteriormente). La cantidad de días que mejor se correlacionaron con él (Tabla IV) constituyeron el mapa medio de alturas medias diarias geopotenciales para el día 0 de lecturas positivas. De manera análoga se realizó el procedimiento para determinar los mapas Tipo A y los mapas medios de los días -1 a -3. Se utilizó un  $r \geq 0,80$ , y no el valor previamente utilizado de  $r \geq 0,85$ , debido a que por la poca cantidad de días de esta sub-muestra no hubo correlaciones tan altas. Esto concuerda con lo esperado, ya que al tomar pocos días y en fechas diferentes el campo medio normal puede no manifestarse de manera clara.

Los campos medios de altura geopotencial media diaria en 1000 hPa obtenidos para el caso en que se aplicó la corrección al día 0 (y por lo tanto a sus respectivos predecesores), muestran los sistemas anticiclónicos semi-permanentes de ambos océanos bien definidos y en sus posiciones normales (Fig 2). Para el día -3 la circulación fue del noreste sobre el norte de Argentina.

En dicha región, entre los días -2 y 0, la dirección de los vientos cambió al sector norte a partir de la formación de un sistema de baja presión, que se profundizó con el correr de los días y reforzó la circulación de vientos provenientes del anticiclón del Atlántico Sur. En la comparación de estos campos, con los mostrados en el caso sin corregir (Fig 1), se observa aquí un sistema de baja presión más intenso en el norte de Argentina y, como consecuencia, una circulación más claramente definida del sector noreste y norte.

El sistema de baja presión alcanzó a tener una isolínea cerrada de 60 mgp el día -1 (visible para isolíneas trazadas a espaciamientos de 20 mgp).

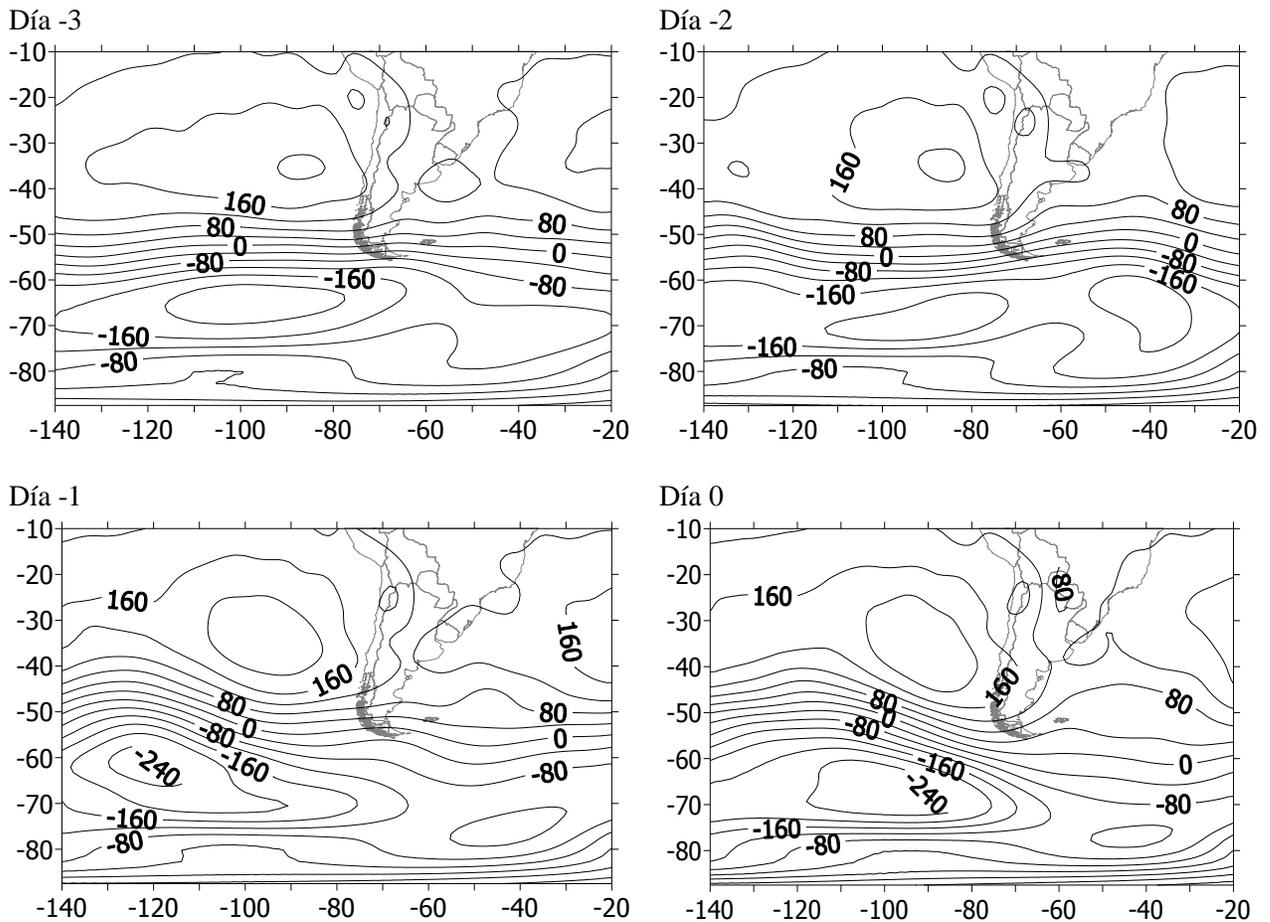


Figura 1: Mapas medios de altura geopotencial media diaria (mgs) en 1000 hPa para la clasificación hecha con la metodología de Lund modificada ( $r \geq 0,85$ ). El día 0 corresponde al día de lectura en la trampa cazaesporas de la EEA Paraná del INTA y los días -1 a -3 son los días previos consecutivos.

Día	Día del Mapa Tipo A	Cantidad de días ( $r \geq 0,80$ )
0	27/03/06	4
-1	30/01/07	4
-2	25/03/06	4
-3	28/01/07	6

Tabla IV: Mapa Tipo A para el día 0, corregido por análisis de la situación sinóptica, y los días previos a la lectura positiva en la trampa cazaesporas en la EEA Paraná del INTA. Por cada día se muestran la cantidad de mapas que se correlacionaron con el mapa Tipo A.

### 3.2. Lecturas negativas

Se realizó también un análisis de los días con lecturas negativas en el cazaesporas. Se confeccionaron dos muestras diferentes. En la primera se tomaron aquellas lecturas negativas que seguían a una lectura positiva con la condición de que la separación entre ambas no fuera mayor a 2 días. La muestra se compuso de 7 días para el total de 5 años. A partir de ésta, se buscó comprobar que la deposición de esporas (y su ausencia en el aire) está asociada a un cambio de circulación. La segunda muestra de lecturas negativas se seleccionó tomando días de lecturas negativas que

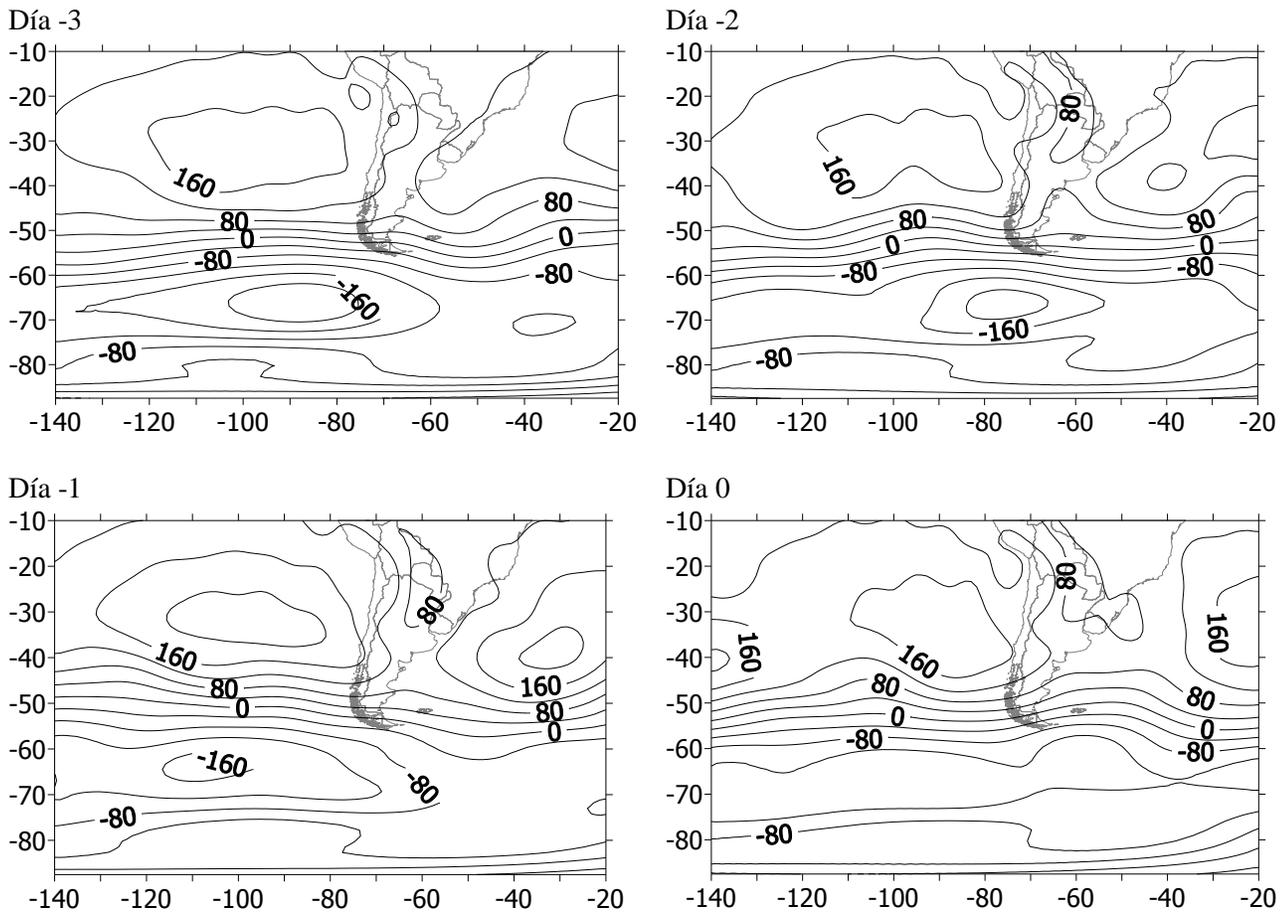
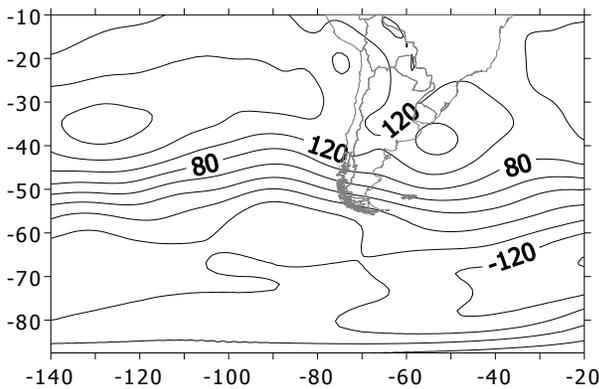


Figura 2: Mapa medio de altura geopotencial media diaria (mgs) en 1000 hPa para la clasificación hecha con la metodología de Lund modificada ( $r \geq 0,80$ ). El día 0 corresponde al día de arribo de urediniosporas a la EEA Paraná del INTA, corregido por situación sinóptica.

tuvieran un espaciamiento entre ellas no inferior a 10 días. Se siguió de este modo el mismo criterio de selección empleado para la obtención de la muestra de lecturas positivas en cuanto a garantizar independencia entre situaciones a escala sinóptica. Esta muestra estuvo integrada por 86 días en los 5 años. Se estudió la circulación de la atmósfera en aquellos días de lecturas negativas. En las dos muestras se analizaron los campos medios diarios de altura geopotencial en 1000 hPa y se prosiguió aplicando la metodología propuesta por Lund (1963) para determinar el mapa Tipo A, mapa que es el que mejor se correlacionó con los demás (6 y 85 mapas respectivamente). Con todos los mapas que mejor se correlacionaron con el mapa Tipo A, se obtuvo

el campo medio de altura geopotencial media diaria en 1000 hPa que mejor describe la circulación observada en el día de lectura negativa en el cazaesporas bajo los criterios de la selección de la muestra. Los valores de correlación fueron fijados en  $r \geq 0,80$  (0,85) para la muestra pequeña (grande). En la muestra pequeña debió emplearse un valor menor pues, por la baja cantidad de mapas de la muestra, con un  $r \geq 0,85$  ningún mapa quedaba correlacionado.

El análisis del campo medio de altura geopotencial media diaria en 1000 hPa para la primera muestra (la de días de lecturas negativas inmediatamente posteriores a una lectura positiva)

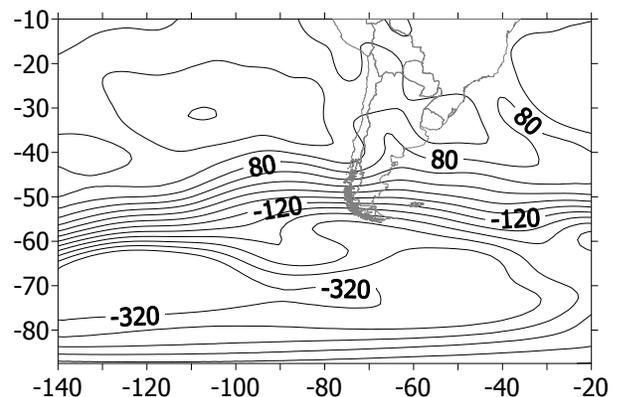


*Figura 3: Mapa medio de altura geopotencial media diaria (m.g.p) en 1000 hPa para las lecturas negativas inmediatamente posteriores a una lectura positiva en la EEA Paraná del INTA.*

indica la presencia de un sistema de alta presión con su centro instalado sobre el Océano Atlántico en las costas de Argentina y Uruguay (Fig. 3). Este mapa es el promedio de 4 de los 7 días integrantes de la muestra. La influencia del anticiclón sobre la estación EEA Paraná del INTA determinó vientos predominantes del sector este. Esta situación es característica de anticiclones que, tras el pasaje de un frente frío por la zona central del país, ingresan desde el sudoeste. Por otra parte, al estudiar la circulación media ocurrida el 21 de diciembre de 2004, día identificado como el mapa de Tipo A para esta muestra, se observó un anticiclón en las costas de Uruguay y Argentina, cuyo centro tuvo un valor superior a 1020 hPa (no mostrado). De ese mapa se deduce el ingreso de aire desde el este sobre Paraná, en concordancia con el campo medio de los días mejor correlacionados (Fig. 3).

El análisis de la segunda muestra identificó al día 12 de diciembre de 2007 como el mapa Tipo A. Los mapas mejor correlacionados con él ( $r \geq 0,85$ ) fueron 45. El mapa Tipo A (Fig. 4) indica la presencia de un anticiclón con centro sobre Uruguay que originó vientos del este sobre Paraná. Sin embargo, el campo medio de altura geopotencial media diaria en 1000 hPa, resultante de los 46 mapas mejor correlacionados, mostró una notoria influencia del campo medio normal de los sistemas de alta y baja presión en todas las latitudes. Como consecuencia, se observó una circulación débil del sector noreste sobre Paraná.

Aunque la configuración de los sistemas en el mapa Tipo A sugiere el pasaje de un frente frío ocurrido en un tiempo cercano, el campo medio de altura geopotencial media diaria no permite hacer ninguna inferencia con respecto a una posible asociación entre esta variable meteorológica y las lecturas negativas de esta muestra. Factores tales como la turbulencia atmosférica, la estabilidad y velocidad del viento y la supervivencia de las esporas a la exposición a temperaturas extremas, humedad y radiación, deberían ser analizados para buscar una asociación entre la circulación y los casos de lecturas negativas.



*Figura 4: Altura geopotencial media diaria en 1000 hPa para el día 12/12/07, identificado como mapa Tipo A para los días de lecturas negativas separados entre sí por no menos de 10 días en la EEA Paraná del INTA.*

## 4. CONCLUSIONES

Las 18 millones de hectáreas implantadas con soja y una producción de 31 millones de toneladas constituyen el soporte fundamental para desarrollar herramientas eficientes que permitan prevenir enfermedades como la roya asiática que pueden provocar pérdidas importantes del rendimiento del cultivo y serias consecuencias en el desarrollo económico de Argentina.

En este trabajo se analizó la posibilidad de detectar situaciones meteorológicas a escala sinóptica que puedan conducir al transporte de esporas de roya asiática de la soja en nuestro país. A partir de la información obtenida en el cazaesporas de la estación EEA Paraná del INTA

y de campos medios diarios de circulación, se aplicó una metodología basada en la aplicada por Lund (1963) para establecer una clasificación. Se observó un campo débil de circulación del sector noreste sobre el norte y centro de Argentina para los días de lecturas positivas de urediniosporas y los días previos. Cuando se introdujo una corrección al día 0, teniendo en cuenta la evolución de la situación sinóptica y logrando con ello una mejora en la determinación del día real de llegada de las urediniosporas, se encontró un sistema de baja presión más intenso localizado en el norte del país favoreciendo el mismo una circulación más intensa de los sectores noreste y norte. Esto se observó más claramente en el caso con corrección del día 0 que en el caso en el que no se aplicó corrección. Este sistema de baja presión fue hallado especialmente entre los días 0 y -2. Si bien estos resultados tienen cierto grado de incertidumbre relacionado con la llegada de las urediniosporas debido a la frecuencia de observación de la trampa cazaesporas, los mismos resultan válidos ya que presentan coherencia espacial y temporal entre lecturas y los campos de circulación.

El campo medio de altura geopotencial media diaria en 1000 hPa no permite hacer ninguna inferencia con respecto a una posible asociación entre esta variable meteorológica y las lecturas negativas de las muestras estudiadas en el presente trabajo. Factores tales como la turbulencia atmosférica, la estabilidad y velocidad del viento y la supervivencia de las esporas a la exposición a temperaturas extremas, humedad y radiación, deberían ser analizados para buscar una asociación entre la circulación y los casos de lecturas negativas.

Aspectos de la circulación asociados a otras variables meteorológicas a escala sinóptica deben ser estudiados para mejorar el conocimiento relacionado a las circulaciones de la atmósfera que favorecen la generación de procesos infectivos de distintos fitopatógenos.

Este es el primer trabajo que analiza las situaciones meteorológicas a escala sinóptica asociadas a la llegada de esporas de roya asiática de la soja en Argentina. Los resultados aquí presentados confirman la hipótesis de que las urediniosporas observadas en el país provienen de Paraguay y Brasil, donde el cultivo de soja está

ampliamente distribuido y existen reservorios invernales del hongo *Phakopsora pachyrhizi*. La determinación del tipo de circulación en la atmósfera a escala sinóptica permitirá alertar en forma temprana la disponibilidad de inóculo (urediniosporas) a nivel local, las cuales podrían producir focos de infección si las condiciones meteorológicas son favorables para ello. Un pronóstico del tiempo que anticipe la ocurrencia de este tipo de situaciones favorables, con flujo del norte y noreste persistente durante al menos 3 días, conducirá a una adecuada planificación, tanto a nivel estatal como privado, tendiente a ejecutar medidas de seguimiento y prevención en el control de la enfermedad que minimicen los impactos negativos sobre el cultivo.

Agradecimientos. Este manuscrito está dedicado a la memoria de la Dra. Susana A. Bischoff.

## REFERENCIAS

- Agrios, G.N., 1997. Plant Pathology. Fourth Edition. Academic Press. 635 págs.
- Aylor, D.E., 2003. Spread of plant disease on a continental scale: role of aerial dispersal of pathogens. *Ecology*, 84, 1989-1997.
- Bergamin Filho, A. y Amorim, L., 1996. Doenças de plantas tropicais: epidemiologia e controle econômico. Ed. Agrônomico Ceres. São Pablo. 289 págs.
- Bromfield, K.R. y Hartwing, E.E., 1980. Resistance to Soybean Rust and Mode of Inheritance. *Crop Science*, 20, 254-255.
- Bromfield, K.R., 1984. Soybean rust. Monograph N° 11. The American Phytopathological Society, St. Paul Minn. USA. 65 págs.
- de Souza, J., 2008. Supervivencia invernal de *Phakopsora pachyrhizi* en Entre Ríos. Libro de resúmenes del 1° Congreso Argentino de Fitopatología. 28-30 de mayo de 2008. Córdoba, Argentina. Pág 81.
- de Souza, J. y Formento, A.N., 2005. Uso de trampa cazaesporas para detección de roya de la soja en la EEA Paraná. Actualización técnica soja. Serie Extensión N° 34-35. Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA. Págs 63-64
- de Souza, J., Formento, A.N. y Schutt, L., 2009. Correlación entre severidad máxima de la roya

- asiática y el rendimiento de la soja en Paraná, Entre Ríos (Argentina). Libro de resúmenes del V Congresso brasileiro de soja y Mercosoja 2009. Goiânia, Brasil. Pág. 162.
- Dupleich, J., Formento, A.N., Wouterlood, N., Rolón, V., Pons, C., Barolín, G., Velásquez, J.C. y Vicentin, I.G., 2005. Efecto de la Roya asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) sobre el rendimiento del cultivo de soja (*Glycine max*). Actualización Técnica-SOJA. Serie Extensión N° 34. Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA. Págs. 54-55.
- Fehr, W., Caviness, C., Burmood, D. y Pennington, J., 1971. Stage of development descriptions for soybeans, *glycine max* (L.) Merrill. Crop Science, 11, 929-931.
- Formento, A.N., 2004. Roya de la soja en Entre Ríos. (20 de Septiembre de 2010; [http://www.inta.gov.ar/parana/info/documentos/produccion\\_vegetal/soja/roya/articulos/20419\\_040503\\_roya.htm](http://www.inta.gov.ar/parana/info/documentos/produccion_vegetal/soja/roya/articulos/20419_040503_roya.htm))
- Formento, A.N. y de Souza, J., 2006. Overwinter and survival of asian soybean rust caused by *Phakopsora pachyrhizi* in volunteer soybean plants in Entre Ríos province, Argentina. Plant Disease, 90, 826.
- Isard, S.A., Gage, S.H., Comtois, P. y Russo, J., 2005. Principles of the Atmospheric Pathway for Invasive Species Applied to Soybean Rust. BioScience, 55, 10.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R. y Joseph, D., 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bulletin of the American Meteorological Society, 77, N° 3, 437-471.
- Lund, I.A., 1963. Map-Pattern Classification by Statistical Methods. Journal of Applied Meteorology, 2, 56-66.
- Melching, J.S., Dowler, W.M., Koogler, D.L. y Royer, M.H., 1989. Effect of Duration, Frequency and Temperature of Leaf Wetness Periods on Soybean Rust. Plant Disease, 73, 117-122.
- MINAGRI, 2010. Estimaciones Agrícolas 2009. Series y estadísticas. Agricultura (20 de Septiembre de 2010; <http://www.sii.gov.ar>)
- Moschini, R.C., Conti, H.A., Cazenave, G. y Saluso, J., 2005. Evaluación de Riesgo Climático de las Áreas Sojeras Argentinas, en Relación a la Incidencia de la Roya de la Soja. (6 de Agosto de 2009; [http://www.sinavimo.gov.ar/fito/incs/programasnacionales/roya\\_soja2005/MOSCHINI\\_EVALUACION.pdf](http://www.sinavimo.gov.ar/fito/incs/programasnacionales/roya_soja2005/MOSCHINI_EVALUACION.pdf).)
- Pivonia, S. y Yang, X.B., 2004. Assessment of the Potential Year-Round Establishment of Soybean Rust throughout the World. Plant Disease, 88, 523-529.
- Rossi, R.L., 2003. First report of *Phakopsora pachyrhizi*, the causal organism of soybean rust in the province of Misiones, Argentina. Plant Disease, 87, 102.
- Saluso, J., Formento, A.N. y de Souza, J., 2005. Ocurrencia de Condiciones Climáticas Favorables para la Roya Asiática de la Soja. Serie Extensión N° 34. Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA. Págs. 5-7.
- Yorinori, J.T., Paiva, W.M., Frederick, R.D., Costamilan, L.M., Bertagnolli, P.F., Hartman, G.E., Godoy, C.V. y Nunes, J.Jr., 2005. Epidemics of soybean rust (*Phakopsora Pachyrhizi*) in Brazil and Paraguay from 2001 to 2003. Plant Disease, 89, 675-677.



## CARACTERIZACIÓN DE SONDEOS ESTIVALES DEL NORTE DE MENDOZA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES Y OBTENCIÓN DE UN ÍNDICE DE CONVECCIÓN

Diego C. Araneo<sup>1</sup>, Silvia C. Simonelli<sup>1</sup>, Federico A. Norte<sup>1</sup>, Maximiliano Viale<sup>1</sup> y Jorge R. Santos<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Programa Regional de Meteorología, CONICET, CCT-Mendoza, Mendoza, Argentina

<sup>2</sup> Instituto Universitario para las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones / Instituto de Ciencias Básicas, UNCuyo, Mendoza, Argentina

(Manuscrito recibido el 4 de agosto de 2010, en su versión final el 17 de diciembre de 2010)

### RESUMEN

Se utilizó el análisis de componentes principales para caracterizar radiosondeos estivales del norte de Mendoza, evaluando su capacidad para identificar patrones asociados a la ocurrencia de convección y definiendo un índice de inestabilidad.

Se tomaron 326 casos, construyendo una matriz de anomalías de temperatura (T) y temperatura de punto de rocío (Td) de los niveles estándar entre 850 y 300 hPa.

El análisis arrojó 6 componentes significativas que explican más del 91% de varianza. Así se obtuvieron 12 patrones que representan condiciones atmosféricas diferenciadas.

Las mayores correlaciones entre patrones y casos de convección (C) y no convección (NC), se obtuvieron para las componentes 6, 2, 4 y 3. La convección se favorecería en entornos relativamente húmedos con un marcado gradiente de T en niveles medios y altos, mientras se inhibiría con capas secas en niveles medios y altos, y débiles gradientes de T en capas bajas.

El indicador de C/NC puede estimarse por regresión múltiple logística dependiente de las componentes de carga, con una correlación conjunta de 0,5, determinando un índice de estabilidad/inestabilidad calculable a partir de los perfiles de T y Td y dependiente de las características climatológicas de la región. El índice mostró una efectividad del 72%.

*Palabras clave:* Norte de Mendoza, radiosondeos, convección, índice de inestabilidad.

## CHARACTERIZATION OF SUMMER SOUNDINGS FROM NORTHERN MENDOZA BY PRINCIPAL COMPONENTS ANALYSIS AND THE OBTAINING OF A CONVECTION INDEX

### ABSTRACT

The Principal Components Analysis was used to characterize the summery North Mendoza rawinsondes, evaluating their capacity to identify patterns associated to the convection occurrence and defining an instability index.

It was selected 326 cases, building an entry matrix with the temperature and dew point temperature anomalies for the standard levels between 850 and 300 hPa.

The analysis showed 6 significant components that explain more than 91% of variance. Therefore, 12 patterns were obtained, which represent different atmospheric conditions.

The main correlations between the patterns and convection (C) and non convection (NC) cases were obtained for the components 6, 2, 4 and 3. The relatively wet environments

with a strong gradient of T at mean and high levels would favour the convection, while it is inhibited with dry layers in mean and high levels, and weak gradients of T in low layers.

The C/NC index can be estimated by a logistic multiple regression dependent to the component loadings, with a correlation of 0,5, determining a stability/instability index calculable from the T and Td profiles and it depends on the climatological features of the region. The index showed an efficiency of 72%.

*Keywords:* North of Mendoza, rawinsondes, convection, instability index.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Provincia de Mendoza se encuentra en el centro-oeste de la República Argentina, situada al pie de la Cordillera de los Andes, extendiéndose de 32° a 37° 35' S, y de 66° 30' a 70° 35' O. Su superficie es de 148.827 km<sup>2</sup> y cuenta con una población estimada de 1.700.000 habitantes. En ella se distinguen tres regiones morfológicas naturales bien contrastadas: las montañas andinas al oeste, con las cimas más elevadas del continente Americano; las planicies, en el centro y el este, conformadas por los pedemontes y llanuras; y las mesetas y volcanes de la Payunia, en el sur o Patagonia extra-andina (Informe Ambiental, 2009; de aquí en más IA). Mendoza se presenta como una provincia mediterránea y continental, de clima árido a semiárido, con temperaturas medias de 9°C en invierno y 25°C en verano, y una amplitud térmica media de 13,5°C para ambas estaciones. La precipitación anual total es de alrededor de 220 mm, de la cual casi el 50% se acumula en los meses de verano; mayormente producida por tormentas convectivas, con frecuente caída de granizo (Servicio Meteorológico Nacional, 2009). La circulación local en la zona norte, por su ubicación a sotavento de la Cordillera de los Andes, está condicionada tanto por el forzante mecánico representado por la orografía, como por el calentamiento diferencial que genera brisas valle-montaña. El período de mayor frecuencia de ocurrencia de tormentas se encuentra entre los meses de octubre y marzo, pudiendo registrarse algunos eventos en setiembre y abril (Saluzzi y otros, 1979). La convección es generalmente vespertina, presentando el máximo en las primeras horas de la noche y un segundo período de actividad en horas de la madrugada, observándose excepcionalmente ocurrencia de convección en horas de la mañana (Saluzzi, 1983).

Existen investigaciones en las cuales no sólo se estudió el origen y desarrollo de la actividad convectiva severa en Argentina, sino también su relación con el riesgo que implica y los daños que ocasiona (Nicolini y Brizuela, 1997). Particularmente en Mendoza, la combinación de rasgos geomorfológicos, climáticos, edáficos y bióticos diferencia unidades homogéneas con distintas posibilidades desde el punto de vista de los asentamientos humanos y las actividades productivas. En este marco, el aprovechamiento del agua de los ríos y del agua subterránea, ha generado importantes oasis de riego que concentran más del 90% de la población y representan sólo el 3% de la superficie mendocina, con 273.000 ha cultivadas distribuidas en tres zonas: norte, centro-oeste y sur. Del total de áreas cultivadas, el 60% corresponde al oasis norte. La existencia de fenómenos tales como las sequías, el granizo, las heladas y el viento zonda, así como las frecuentes tormentas de nieve en la montaña, constituyen fuertes condicionantes climáticos para el desarrollo productivo, obstaculizando los asentamientos humanos en la Provincia (Martínez Carretero y Dalmaso, 1995). Particularmente en el oasis norte, el porcentaje anual de daños por granizo supera el 30%; mientras que en ciertos lugares de la zona sur llega hasta el 40% (IA, 2009).

El mejoramiento de las técnicas de pronóstico de convección profunda, con predicciones espacial y temporalmente más precisas, ayudaría a desarrollar sistemas de alerta temprana de eventos severos, que permitan tomar medidas tendientes a mitigar eventuales daños socioeconómicos. El conocimiento de la convección profunda requiere, en su fase inicial, integrar los efectos atmosféricos de escalas mayores a la convectiva capaces de forzar el ascenso y la convergencia en capas bajas, o de inestabilizar la atmósfera dando lugar a movimientos de ascenso en niveles medios.

Asimismo, los efectos locales relacionados con la orografía, pueden influir en la ubicación espacial y en la iniciación de la convección en la región. La intensidad y la forma en que se desarrolla y organiza la convección, están directamente relacionados con la estructura termodinámica del entorno y la cortante vertical del viento. Nicolini y Norte (1978) y Norte (1980) encontraron que la ocurrencia de convección en la zona norte de Mendoza se asocia a situaciones sinópticas frontales, a líneas de inestabilidad, o bien puede desarrollarse en una masa de aire localmente inestable. La elaboración operativa de pronósticos de convección requiere de los análisis sinópticos de superficie y altura (complementados con modelos termodinámicos regionales), y principalmente del análisis termodinámico de la estructura vertical de la atmósfera (es decir, a partir de datos de radiosondeo), para lo cual se calculan habitualmente distintos índices indicadores de la inestabilidad estática del entorno. A pesar del gran número de índices utilizados, sólo existen algunos estudios sistemáticos en Argentina que permiten determinar el desempeño comparativo de los mismos como predictores de ocurrencia de convección y precipitaciones (Moyano y otros, 1972; Rosso y otros, 1987). Norte (1982) analizó el desempeño de los índices SWEAT modificado, Total-Total y SPOT en la zona norte de Mendoza, encontrando que el primero da una mejor idea de la intensidad de la actividad convectiva en la región. Posteriormente, Simonelli (2000) realizó un estudio similar sobre la misma zona evaluando el desempeño de los índices K de Whitting, Showalter, Lifted, Total-Total, SWEAT, Fawbush-Miller, Cross-Total y Vertical-Total, mediante un análisis discriminante escalonado. Los resultados finales de su trabajo mostraron que el Fawbush-Miller es el único índice con un desempeño aceptable como predictor de la convección para un período de 24 horas posteriores a la hora de la observación. Sin embargo, la dificultad en el cálculo de este índice hace que el mismo no sea tenido en cuenta en forma operativa.

Las características espacio-temporales de los perfiles de temperatura y humedad en la troposfera y baja estratosfera fueron analizadas mediante el estudio de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF), primeramente por Smith y Woolf (1976), recientemente por Wang y otros (2001) y Deming y otros (2008); y en Argentina por Duarte (1993).

Mediante estas técnicas los autores pudieron identificar los principales patrones temporales de temperatura en cada nivel de la atmósfera, caracterizando perfiles verticales con variabilidad temporal homogénea. La aplicación de técnicas estadísticas como el estudio de EOF o el análisis de componentes principales (ACP) permiten en general la caracterización estadística objetiva de variables vectoriales, tales como los perfiles verticales de temperatura de los ejemplos citados o cualquier otra variable física.

Dada la particular importancia socio-económica que los estudios tendientes a comprender los procesos de convección profunda y mejorar las técnicas de pronóstico de granizo y tormentas severas representan para la zona norte de la provincia de Mendoza, el objetivo principal del presente trabajo es analizar la aplicabilidad del ACP para la caracterización objetiva de los perfiles de temperatura y temperatura de punto de rocío obtenidos de sondeos diarios en la región, a fin de construir, a partir de los patrones producidos, un índice de inestabilidad que sirva como herramienta sencilla en la elaboración de los pronósticos de ocurrencia de convección severa en el área del oasis norte.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

Se tomaron 326 radiosondeos de las 12 UTC realizados en la Estación Meteorológica Mendoza-Aero perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), correspondientes al período octubre-marzo para los años 1987/88, 1989/90 y 1990/91 y enero-febrero de 1995, construyendo una matriz de entrada con las anomalías de temperatura (T) y temperatura de punto de rocío (Td) de los niveles estándar de 850, 700, 500, 400 y 300 hPa. Esta serie de datos es la misma analizada previamente por Simonelli (2000), y ha sido elegida de igual forma en este trabajo a fin de que los resultados sean comparables. Adicionalmente se utilizaron datos de altura geopotencial del reanálisis-1 del National Centers for Environmental Prediction (NCEP; Kalnay y otros, 1996) para la caracterización sinóptica de las situaciones meteorológicas asociadas a los diversos patrones de sondeo.

Para el cálculo de las componentes principales (CPs), se dispusieron los datos de sondeo formando un arreglo matricial  $\mathbf{X}_{[10 \times 326]}$  en el cual

las filas contienen los valores correspondientes a cada nivel de presión para la T (filas 1 a 5) y Td (filas 6 a 10); y cada columna representa el sondeo de un día determinado. Dado que el sondeo constituye una variable en la cual el perfil vertical medio climatológico (es decir, el sondeo medio) explica casi la totalidad de la varianza, se procedió a la remoción del mismo, obteniendo la matriz de desvíos  $\tilde{\mathbf{X}}_{[10 \times 326]}$ . Con esta matriz de entrada se efectuaron los cálculos para la obtención de las CPs de acuerdo a las ecuaciones matriciales:

$$\mathbf{Z} = \tilde{\mathbf{X}}_s \mathbf{Q} \quad [1]$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{Q} \mathbf{D}^{1/2} \quad [2]$$

donde  $\mathbf{Z}_{[10 \times 326]}$  es la matriz de componentes de puntaje,  $\tilde{\mathbf{X}}_s$  es la matriz que resulta de estandarizar las columnas de  $\tilde{\mathbf{X}}$ ,  $\mathbf{Q}_{[326 \times 326]}$  y  $\mathbf{D}_{[326 \times 326]}$  son respectivamente las matrices de autovectores y autovalores de la matriz de correlaciones entre las columnas de  $\tilde{\mathbf{X}}$ , y  $\mathbf{F}_{[326 \times 326]}$  es la matriz de componentes de carga (es decir, la matriz que contiene las correlaciones entre cada sondeo anómalo de entrada (columnas de  $\tilde{\mathbf{X}}$ ) y cada componente de puntaje (columnas de  $\mathbf{Z}$ )).

En estas condiciones resulta  $\tilde{\mathbf{X}}_s = \mathbf{Z}_s \mathbf{F}'$  (donde la prima significa “transpuesta”) y, por lo tanto, cada sondeo anómalo estandarizado  $\tilde{\mathbf{x}}_s$  (columna de  $\tilde{\mathbf{X}}_s$ ) puede escribirse como combinación lineal de las componentes de puntaje estandarizadas  $\mathbf{z}_s$  (columna de  $\mathbf{Z}_s$ ) en la forma:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{s,j} = f_{j1} \mathbf{z}_{s1} + f_{j2} \mathbf{z}_{s2} + \dots + f_{j10} \mathbf{z}_{s10} \quad [3]$$

donde el coeficiente  $f_{ji}$  es el elemento de la  $j$ -ésima columna y la  $i$ -ésima fila de  $\mathbf{F}$ , y teniendo en cuenta además, que el rango de  $\tilde{\mathbf{X}}$  no puede ser mayor a 10. Información adicional sobre esta metodología y sus propiedades puede consultarse en Lattin y otros (2003).

La ecuación [3] permite identificar cada sondeo con un número no mayor a 10 factores de carga  $f_{ji}$  los cuales constituyen el peso de cada componente para representar el sondeo en cuestión. Para identificar los patrones principales capaces de discriminar entre sondeos

“convectivos” (C) y “no convectivos” (NC), se procedió a individualizar los días en los cuales se registraron o no eventos asociados a convección, y se construyó un vector  $\mathbf{c}_{[326 \times 1]}$  con valores “1” para el caso C y “0” para el caso NC. Se definió “Ocurrencia de Convección” cuando en la observación meteorológica se reporta la presencia de nubes bajas de los grupos 3 y/o 9, de acuerdo con el código de clasificación de nubes de la Organización Meteorológica Mundial, en el período de 24 horas comprendido entre las 12 UTC del día y las 12 UTC del día siguiente. Los patrones principales  $\mathbf{z}_j$  asociados a C o NC se identificaron correlacionando las componentes de carga  $\mathbf{f}_j$  con el vector  $\mathbf{c}$ .

Con el propósito de elaborar futuros pronósticos de C/NC a partir de los datos de sondeo de T y Td, se procedió a la elaboración de un modelo de regresión múltiple logística entre el vector respuesta  $\mathbf{c}$  y las componentes de carga  $\mathbf{f}_j$ , de la forma:

$$\hat{c}_i = P(c_i = 1) = \frac{e^{w_i}}{1 + e^{w_i}} \quad [4]$$

donde  $\hat{c}_i$  es un estimador del coeficiente de  $\mathbf{c}$  correspondiente al  $i$ -ésimo día y representa la probabilidad de un evento convectivo, y  $w_i$  es el  $i$ -ésimo elemento del vector:

$$\mathbf{w} = b_0 + b_1 \mathbf{f}_1 + b_2 \mathbf{f}_2 + \dots + b_n \mathbf{f}_n \quad [5]$$

donde los coeficientes  $b_0, b_1, \dots, b_n$  se ajustan por máxima verosimilitud y  $n$  es el número de componentes significativas retenidas.

Dado que  $\mathbf{F} = \frac{\tilde{\mathbf{X}}_s' \mathbf{Z}_s}{m-1}$ , donde  $m$  es el número de filas de  $\mathbf{X}$  (en nuestro caso  $m=10$ ), resulta:

$$\mathbf{w} = \tilde{\mathbf{X}}_s' \frac{\mathbf{Z}_s^* \mathbf{b}^*}{m-1} + b_0 [\mathbf{1}]_{326} \quad [6]$$

donde  $\mathbf{Z}_s^*$  es la matriz que contiene las componentes de puntaje estandarizadas que corresponden a los predictores usados en la ecuación de regresión [4]-[5] (es decir, todas o aquellas componentes con coeficientes  $b_i$

significativos),  $\mathbf{b}^*$  es la matriz vector que contiene los coeficientes de ajuste  $b_1, \dots, b_n$  y  $[1]_{326}$  es un vector columna de 326 elementos iguales a 1.

La matriz  $\mathbf{A} = \frac{\mathbf{Z}_s^* \mathbf{b}^*}{m-1}$  es un vector columna que

sólo depende de los resultados del ACP y del análisis de regresión [4]-[5]. Debido a esto, una vez determinados  $\mathbf{A}$  y  $b_0$  del análisis estadístico descrito, dado cualquier sondeo anómalo estandarizado  $\tilde{\mathbf{x}}_s$  (no necesariamente perteneciente al presente análisis), el índice de C (1) o NC (0) puede estimarse mediante la ecuación:

$$\hat{c} = \frac{e^{\tilde{\mathbf{x}}_s \cdot \mathbf{A} + b_0}}{1 + e^{\tilde{\mathbf{x}}_s \cdot \mathbf{A} + b_0}} \quad [7]$$

la cual serviría para futuros pronósticos.

En efecto, a fin de comprobar la eficiencia del índice definido por la ecuación [7] para predecir eventos de convección profunda, se la aplicó a 270 observaciones tomadas de los períodos octubre-marzo de 2006-2007, 2007-2008 y 2008-2009. En este total de observaciones, 136 corresponden a situaciones en las que se registró convección (casos inestables) y 134 conciernen a entornos sin observación de actividad convectiva (casos estables).

El estudio se repitió aplicando rotación VARIMAX a las componentes significativas del análisis no rotado, con el objetivo de verificar si este tipo de rotación mejora la eficiencia del modelo estadístico de pronóstico de convección (es decir, si determina un índice de C/NC más confiable).

### 3. RESULTADOS

La Tabla I muestra la distribución de varianzas explicadas para las componentes rotadas y no rotadas. A pesar de tener una cantidad total de 10 observaciones por sondeo (5 niveles para T y 5 para Td), las varianzas acumuladas del análisis de CPs revelan que cada sondeo de entrada puede escribirse como combinación lineal de sólo 9 patrones principales, lo cual implica que el rango de la matriz de entrada es menor al rango máximo posible. Probablemente, este hecho se deba a la escasa variabilidad de la humedad en el nivel superior, lo que implicaría que a esas alturas, Td se

torne dependiente únicamente de T. Por otra parte, la Figura 1 muestra el logaritmo de los autovalores en función del número de componente principal (diagrama de LEV). Los valores del logaritmo decrecen casi linealmente para las primeras 6 componentes, observándose una marcada caída entre las componentes 6 y 7. Por este motivo, tomamos como significativas las primeras 6 CPs, las cuales acumulan el 92% de la varianza (ver Tabla I). La aplicación de rotación VARIMAX a las primeras 6 CPs no modifica su varianza acumulada, aunque las varianzas por componente se distribuyen de forma más homogénea.

Cada CP  $\mathbf{z}$  puede interpretarse en su sentido directo [ $\mathbf{z}(+)$ ] o inverso [ $\mathbf{z}(-)$ ] de acuerdo lleven respectivamente componentes de carga  $f$  asociadas positivas o negativas en la ecuación [3]. La Figura 2 muestra las CPs en sus modos directo (arriba) e inverso (abajo), en paneles de la izquierda, acompañadas del sondeo del caso correspondiente al mayor factor de carga asociado en cada caso (paneles de la derecha). Debido a que resulta dificultoso interpretar las desviaciones de los sondeos respecto del sondeo medio, en la Figura 2 se sumó el sondeo medio a las CPs no estandarizadas para facilitar su interpretación.

Consecuentemente, y debido a que las CPs se calcularon en base a desvíos estandarizados de los sondeos originales, para los cuales las desviaciones de Td pueden superar en algún nivel a las de T; en algunos patrones y para algunos niveles, los valores representados de Td pueden superar a los de T indicando un estado de saturación o próximo a la saturación.

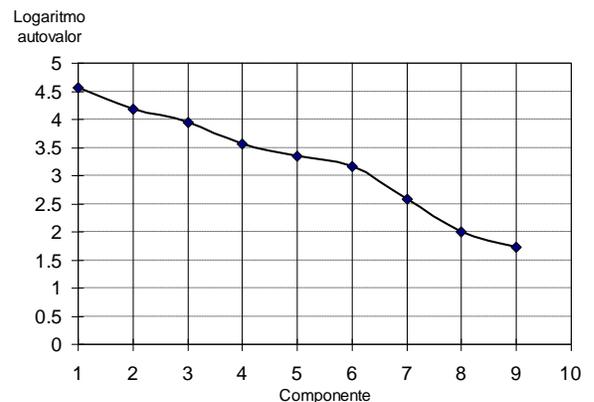


Figura 1: Diagrama de LEV para las CPs no rotadas.

CP	Componentes No Rotadas			Componentes Rotadas		
	Varianza	Varianza Explicada [%]	Varianza Explicada Acumulada[%]	Varianza	Varianza Explicada [%]	Varianza Explicada Acumulada[%]
1	96,41	29,57	29,57	74,45	22,84	22,84
2	65,11	19,97	49,55	53,85	16,52	39,36
3	51,29	15,73	65,28	49,02	15,04	54,39
4	35,18	10,79	76,07	48,81	14,97	69,37
5	28,12	8,63	84,70	39,58	12,14	81,51
6	23,63	7,25	91,95	34,03	10,44	91,95
7	13,28	4,07	96,02			
8	7,38	2,26	98,28			
9	5,59	1,72	100,00			

Tabla I: Varianzas correspondientes a las primeras 6 CPs, explicadas porcentuales y acumuladas.

En otras palabras, las CPs son patrones de sondeos anómalos (desviaciones del perfil vertical medio de T y Td), y por lo tanto modelos en los que eventualmente puede aparecer en algún nivel una desviación de Td mayor a la diferencia entre las medias climatológicas de T y Td para ese nivel. En ese caso, sumar el sondeo medio no bastará para compensar esa desviación de Td presente en el patrón y la misma se presentará mayor que T en el gráfico. De todas formas, se debe tener siempre en cuenta que la adición del sondeo medio a las CPs se realiza al sólo efecto de facilitar la interpretación gráfica de las mismas, y que un nivel con Td mayor que T sugiere un nivel saturado o casi saturado.

La CP 1 en su modo directo (inverso) muestra un sondeo mayormente húmedo (seco) en todos los niveles, sobre todo en la capa entre 500 y 300 hPa; mientras la CP 2 en modo directo (inverso) representa un sondeo seco (húmedo o saturado) en la capa 850-500 hPa, con un gradiente vertical de T menos (más) acentuado en niveles inferiores y una capa relativamente húmeda (seca) entre 400 y 300 hPa. Por su parte, la CP 3 en modo directo (inverso) exhibe un entorno saturado (seco) en 700 hPa y seco (húmedo) en 500 hPa con un marcado (débil) gradiente de Td y débil (marcado) gradiente de T entre estos dos niveles. La CP 4 en modo directo (inverso) muestra un entorno seco

(húmedo) en 400 hPa y un débil (marcado) gradiente de T y Td en niveles bajos. La CP 5 en su modo directo (inverso) presenta un entorno muy seco (saturado) en el nivel de 850 hPa y húmedo (seco) en 700 hPa (inversión (marcado gradiente) de Td en la capa 850-700 hPa). La CP 6 en modo directo (inverso) representa un sondeo húmedo (seco) en niveles bajos, que se seca (humedece) gradualmente con la altura.

Los sondeos de las situaciones reales observadas, mostrados como ejemplos en los paneles de la derecha, exhiben las mismas características que los patrones respectivos. Si bien en los patrones 1 y 3 directos, y 2 y 5 inversos, se observan valores de Td que superan a los valores de T en determinados niveles, la comparación con las situaciones reales asociadas revelan que se trata de niveles saturados o próximos a la saturación.

Los coeficientes de correlación R entre el índice de C-NC  $c$  y las componentes de carga  $F$  para las CPs retenidas, se muestran en la Tabla II. Las correlaciones significativas al 5% se encuentran marcadas en negrita. De acuerdo a los valores mostrados, las componentes 2, 3, 4 y 6 se encuentran significativamente correlacionadas con el índice convectivo  $c$  en sentido inverso (coeficientes de correlación negativos), indicando que los patrones descritos en modo inverso para estas componentes estarían asociados mayormente

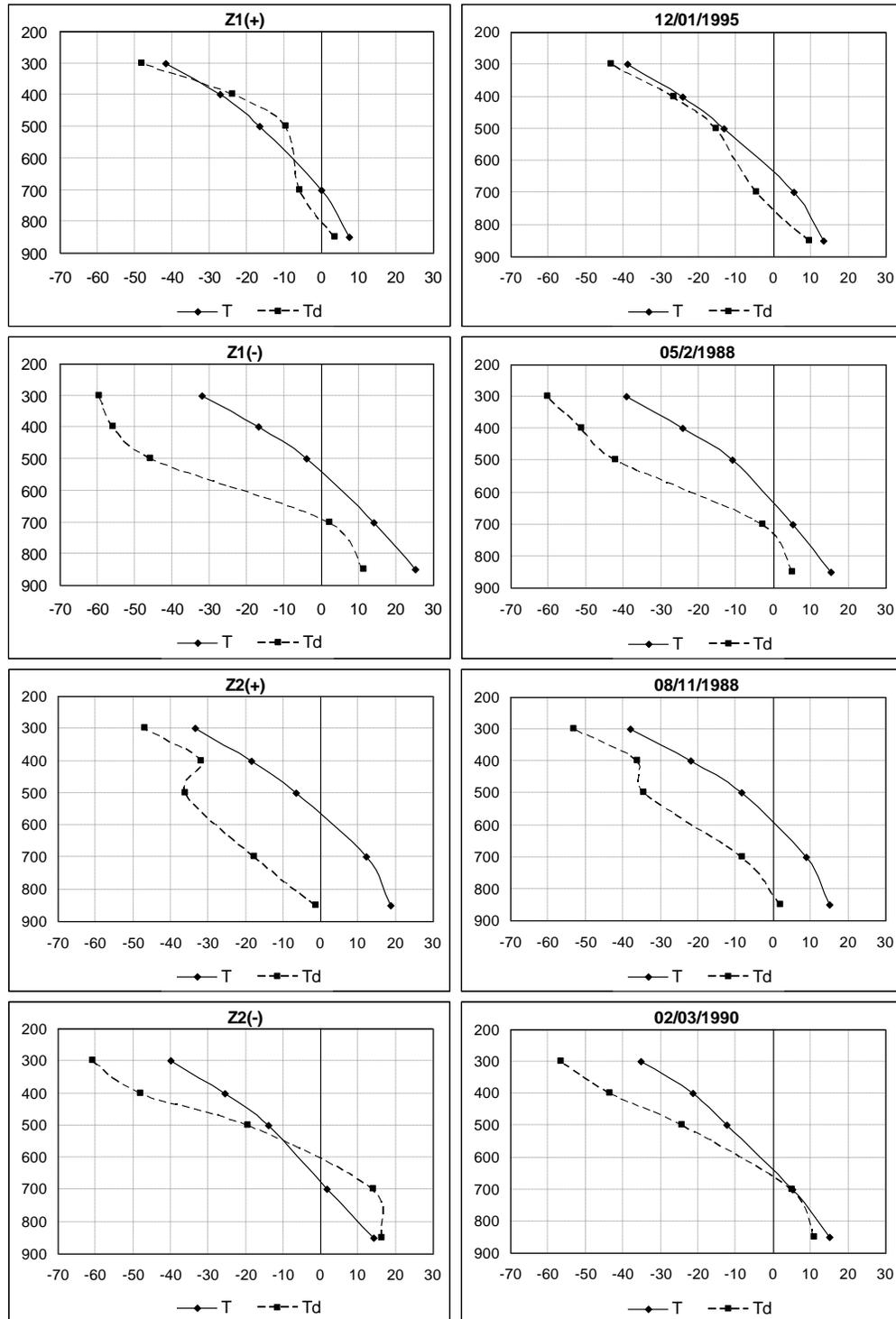


Figura 2: Izquierda: componentes principales 1 (paneles superiores) y 2 (paneles inferiores) en modo directo (+) e inverso (-). Derecha: Sondeos correspondientes al mayor factor de carga  $F$  para los casos respectivos del panel izquierdo (las fechas correspondientes se detallan en cada cuadro). En algunos patrones y para algunos niveles, los valores representados de  $T_d$  pueden superar a los de  $T$  indicando un estado de saturación o próximo a la saturación, debido a que las CPs se calcularon en base a desvíos estandarizados de los sondeos originales, para los cuales las desviaciones de  $T_d$  pueden superar en algún nivel a las de  $T$  (ver texto).

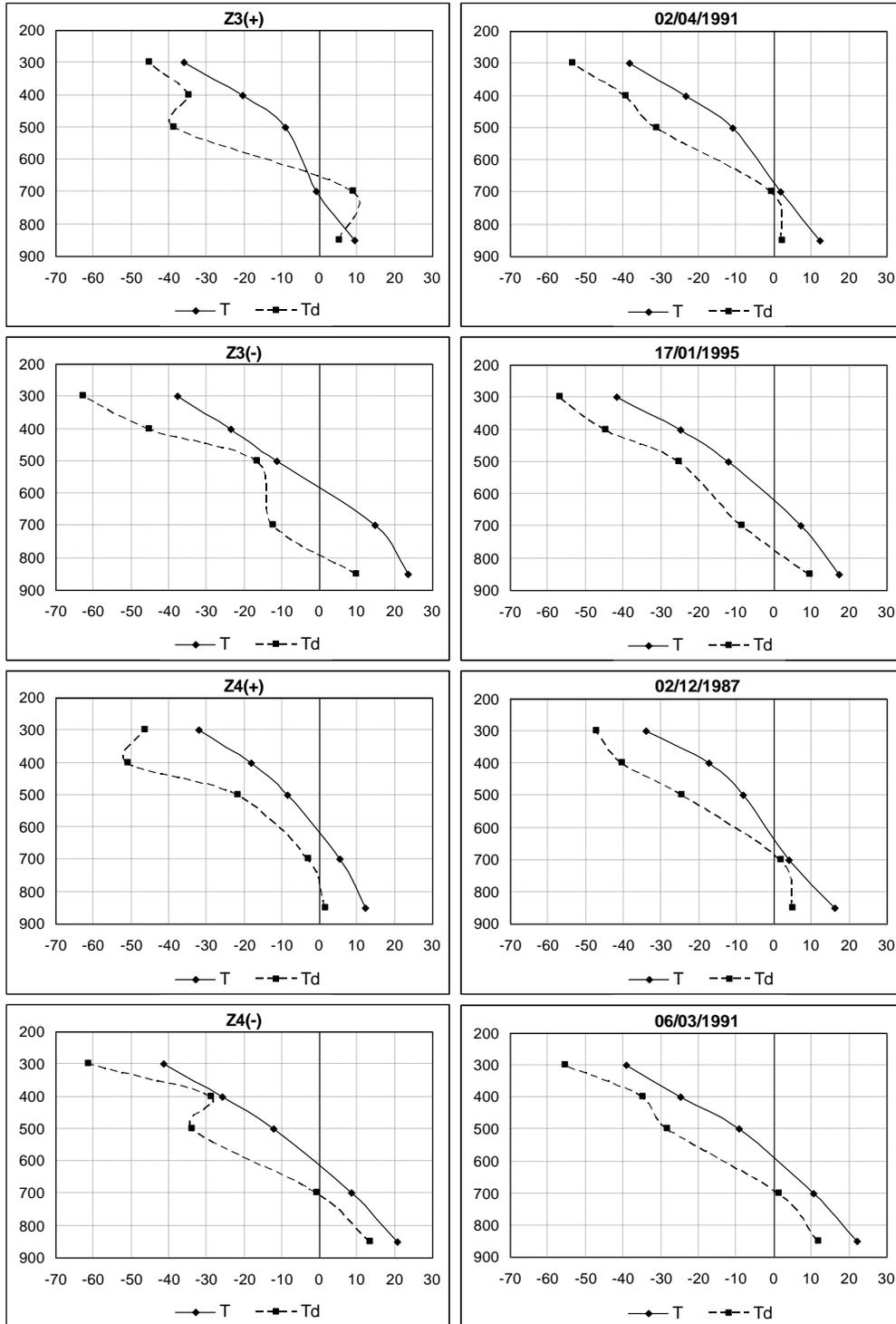


Figura 2 (continuación)

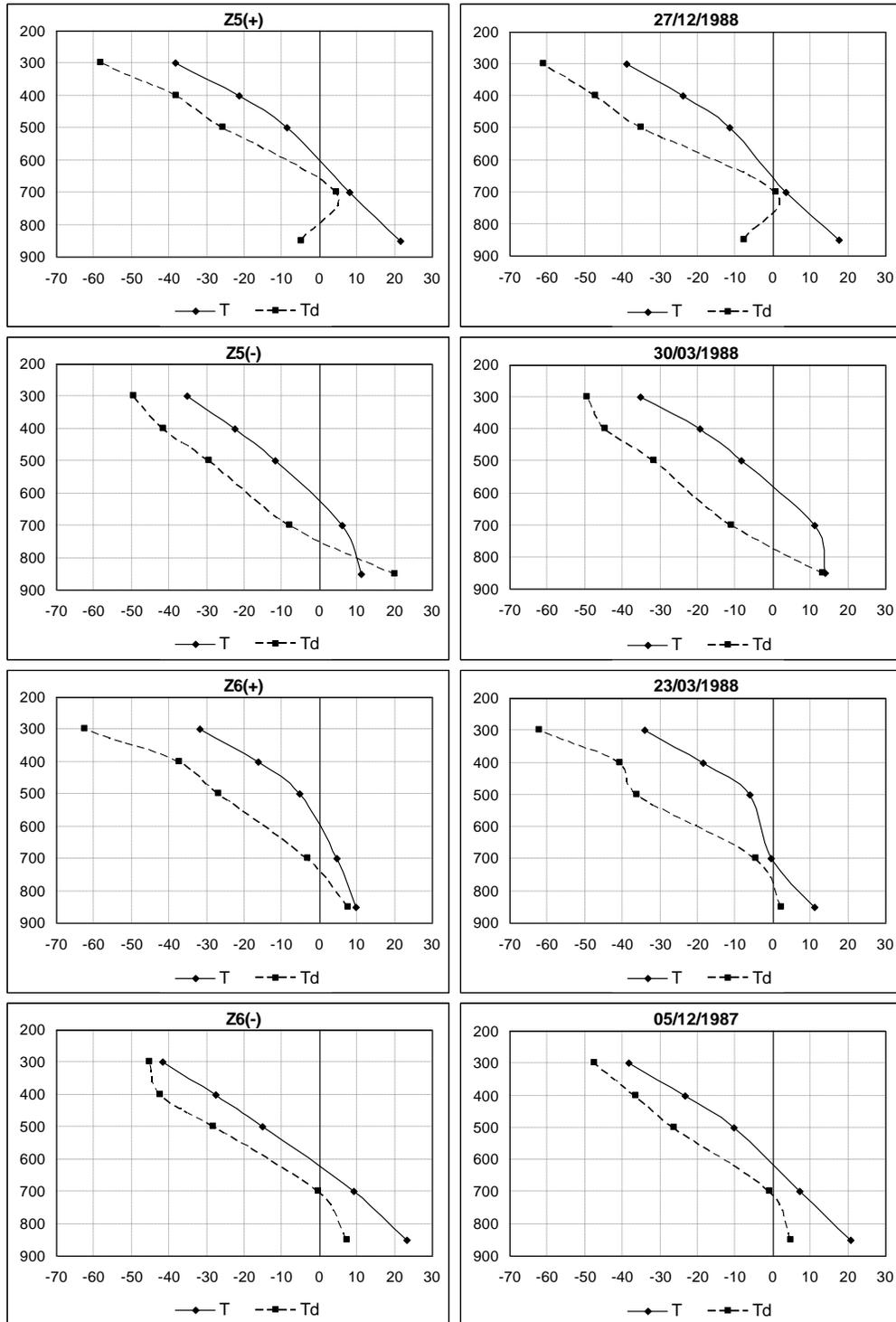


Figura 2 (continuación)

	Análisis de regresión múltiple C vs. F					
	R		b			
			6 predictores		Sólo predictores significativos	
	CPs no rotadas	CPs rotadas	CPs no rotadas	CPs rotadas	CPs no rotadas	CPs rotadas
b <sub>0</sub>			<b>-0,3406</b>	<b>-0,3406</b>	-0,3184	-0,3326
F1	-0,0303	-0,1656	-0,2541	-0,3005	*	*
F2	<b>-0,3056</b>	-0,1845	<b>-2,1483</b>	0,0686	-2,1110	*
F3	<b>-0,2319</b>	<b>-0,2173</b>	<b>-1,5553</b>	<b>-3,4279</b>	-1,5478	-3,7122
F4	<b>-0,2678</b>	0,1555	<b>-2,6829</b>	0,0643	-2,6495	*
F5	-0,0074	-0,0090	-0,3904	-0,4173	*	*
F6	<b>-0,3509</b>	<b>-0,3632</b>	<b>-4,2197</b>	<b>-5,3367</b>	-4,1439	-5,3175
ECM			0,437		0,435	0,464
R			0,493		0,500	0,411

Tabla II: Coeficientes de correlación  $R$  entre el índice de C-NC y las componentes de carga  $F$  para las primeras 6 componentes con y sin rotación, junto a los coeficientes de ajuste  $b$  de la ecuación de regresión múltiple logística. Los valores en negrita indican coeficientes distintos de cero al 5% de significancia. En las filas inferiores se indican los valores de correlación conjunta y error cuadrático medio en cada ajuste de regresión logística.

a eventos de convección, mientras los patrones en modo directo a ausencia de convección. Consecuentemente, la actividad convectiva se vería favorecida en sondeos que muestran un entorno saturado o húmedo en los niveles de 700, 500 o 400 hPa y un gradiente vertical de  $T$  bien marcado en niveles altos (ver patrones 2, 3 y 4 en modo inverso), o un sondeo relativamente húmedo con un gradiente vertical de  $T$  intenso en todos los niveles (ver patrón 6 inverso). Por el contrario, la convección se inhibiría en situaciones de sondeos con características inversas a las anteriores (capas secas en niveles superiores, con gradientes verticales de  $T$  muy débiles en capas bajas). Las CPs 1 y 5 no discriminan entre eventos C y NC (los coeficientes de correlación  $c$  vs.  $F$  no significativos para estas componentes; ver Tabla II). A modo de ejemplo, se graficaron los campos de altura geopotencial de 1000 y 500 hPa correspondientes a los días con mayor factor de carga para cada una de las componentes 2, 3, 4 y 6, los cuales se muestran en la Figura 3 (días correspondientes a los sondeos de los paneles de la derecha en la Figura 2). En los casos C de las componentes 4 y 6 (días 6/3/1991 y 5/12/1987), estos campos muestran situaciones asociadas al

pasaje de una banda frontal (con una baja sobre las costas patagónicas y un anticiclón del Pacífico desplazado hacia latitudes medias en superficie, y un eje de vaguada bien definido atravesando el sur de Chile en altura); mientras que para los casos NC, exhiben el anticiclón del Pacífico desplazado a latitudes más bajas junto a una baja presión en el noroeste argentino. Sin embargo, las situaciones sinópticas seleccionadas para las componentes 2 y 3 no muestran características distintivas entre casos C y NC.

Los coeficientes de ajuste  $b$  de la ecuación de regresión múltiple [5] se muestran también en la Tabla 2. La correlación múltiple tomando todas las componentes arroja una correlación conjunta de 0,49 y un error cuadrático medio de 0,44. Tomando sólo las componentes significativas, esta correlación no se modifica sensiblemente, pasando a 0,5.

La aplicación de rotación VARIMAX a las componentes, no cambia el valor de la correlación múltiple reteniendo la totalidad de los predictores. Sin embargo, el número de componentes que mantienen correlaciones significativas con el índice de C-NC  $c$ , se reduce a sólo dos componentes (las CPs rotadas 3 y 6), cuyos

patrones se muestran en la Figura 4. En modo directo (inverso), la CP 3 representa un sondeo saturado o húmedo (seco) en niveles inferiores, con un débil (fuerte) gradiente de T, y un secamiento (débil humedecimiento) hacia niveles más altos; mientras que la CP 6 presenta un sondeo seco (húmedo o saturado) en todos los niveles, con un débil (fuerte) gradiente de T sobre todo en niveles bajos. De acuerdo al signo de los valores de correlación indicados en la Tabla, ambas CPs se encuentran inversamente correlacionadas con el índice de C-NC, por lo cual, los patrones Z3(-) y Z6(-) corresponderían a eventos convectivos, mientras los Z3(+) y Z6(+) a eventos no convectivos. Las restantes componentes rotadas (no mostradas) no discriminan entre casos C o NC.

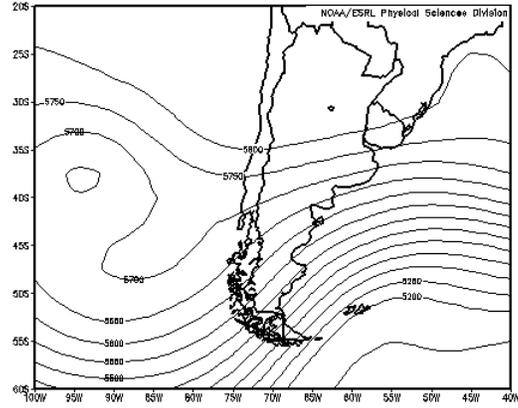
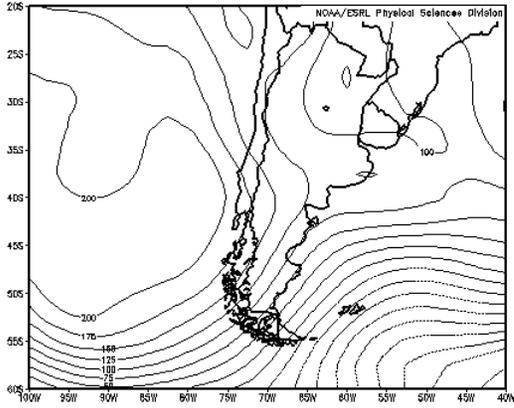
Los valores estimados del coeficiente de C-NC pueden obtenerse a partir de la ecuación [7]. Como se mencionó, el vector  $\mathbf{A}$  y el coeficiente  $b_0$  sólo dependen de los resultados del ACP y del análisis de regresión [4]-[5], y el producto escalar en la ecuación [7] entre este vector y el vector de sondeo anómalo estandarizado  $\tilde{\mathbf{x}}_s$  indica que el índice  $\hat{c}$  representa una medida de similitud entre ambos, ya que la ecuación logística [7] es una función monótona creciente con dicho producto escalar y acotada entre 0 y 1. En consecuencia, los perfiles verticales de T y Td mostrados por el vector  $\mathbf{A}$  representan una situación ideal para la ocurrencia de convección, que puede verse en la Figura 5 para el caso no rotado con predictores significativos. En 850 hPa se observa una fuerte anomalía positiva de T que pasa abruptamente a una marcada anomalía negativa en 500 hPa, manteniéndose así en niveles superiores, lo cual determina un fuerte gradiente en las capas inferiores (por debajo de 500 hPa). Conjuntamente, Td presenta también anomalías marcadas positivas en capas bajas, disminuyendo levemente con la altura hasta el nivel de 400 hPa, a partir de donde se hace casi normal. Esta situación caracterizaría una atmósfera muy caliente en capas bajas y muy fría y húmeda (probablemente saturada) en capas medias y altas, favoreciendo la ocurrencia de convección. La situación inversa caracterizaría una atmósfera estable en la cual la convección se vería inhibida. Mediante la ecuación [7] se han calculado los valores estimados del índice de C-NC a partir de

datos recientes (270 observaciones tomadas de los períodos octubre-marzo de 2006-2007, 2007-2008 y 2008-2009), separándolos luego de acuerdo a los casos de ocurrencia real de C o NC (134 casos de NC y 136 casos de C), y analizando su distribución estadística. A modo de ejemplo mostramos los resultados obtenidos para el modelo no rotado ajustado con los 4 predictores significativos. La Figura 6 muestra un histograma de las correspondientes distribuciones de frecuencias, junto a sus gráficas box-plot en las que se representan sus valores extremos y cuartiles. Estos últimos resultaron de 0,14, 0,29 y 0,52 para el caso NC y 0,45, 0,62 y 0,76 para el caso C. Los índices superiores a 0,68 corresponden a valores que se encuentran en la cola derecha del 10% de la distribución de casos NC, mientras los inferiores a 0,29 se encuentran en la cola izquierda de los casos C. De esta manera, dado un sondeo cualquiera sobre el cual se estima el índice a partir de la ecuación [7], un valor superior a 0,68 indicaría la ocurrencia futura de convección con una probabilidad de error menor al 10%. Análogamente, un valor inferior a 0,29 indicaría la no ocurrencia de convección con igual probabilidad de error.

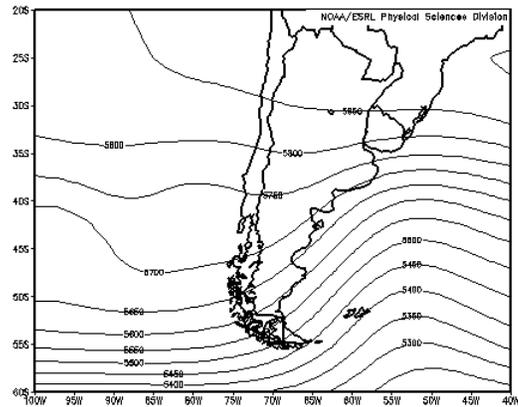
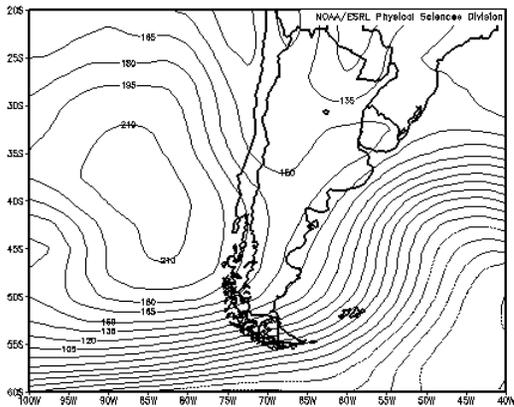
El rango comprendido entre 0,29 y 0,68 representa un intervalo de incertidumbre, que contiene el 44% del total de observaciones, en el cual el índice no discrimina para estos niveles de error. En el caso de las distribuciones estadísticas de los índices estimados a partir de las componentes rotadas con predictores significativos, se obtienen distribuciones similares, pero con un rango de incertidumbre comprendido entre 0,31 y 0,55 pero que contiene el 55% de los datos.

Finalmente, definiendo un criterio en el cual se establece la ocurrencia de convección si el índice estimado es mayor a 0,49 (mediana del total de casos) y la no ocurrencia cuando es menor a dicho valor, se puede evaluar el porcentaje total de acierto de este criterio sumando la cantidad de casos en los cuales se verifica el criterio y dividiendo por la cantidad total de casos. De esta manera, la efectividad total del índice calculado en base a las componentes no rotadas es del 72%, mientras el error se reparte en 14% de probabilidad de falsa alarma (es decir, se pronosticó convección y no la hubo) y 14% de probabilidad de sorpresa (es decir, no se pronosticó convección y la hubo).

8 nov 88 / CP2 (+)



2 mar 90 / CP2 (-)



2 abr 91 / CP3 (+)

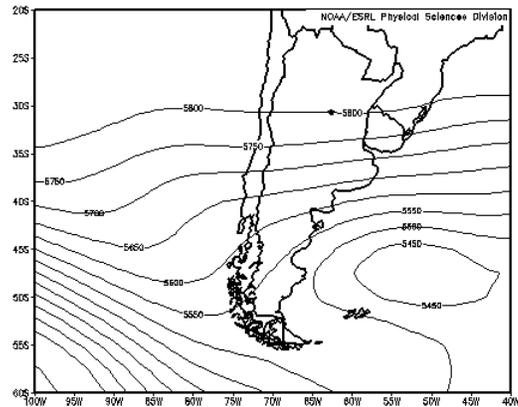
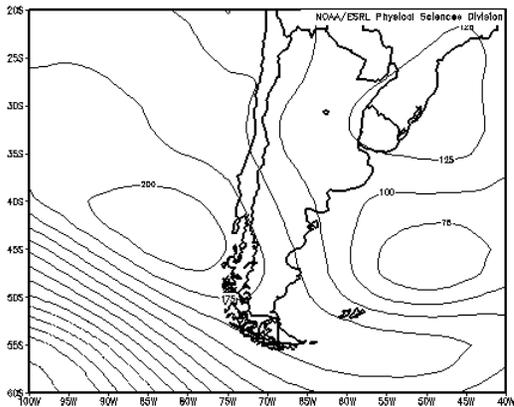
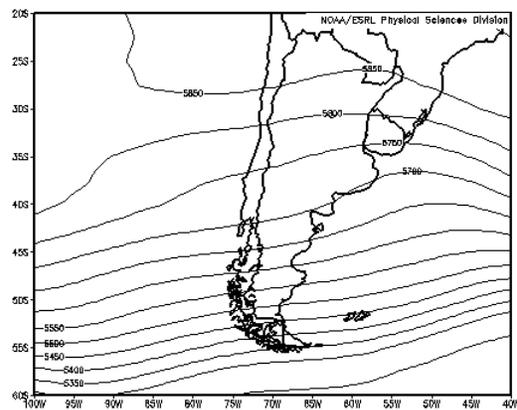
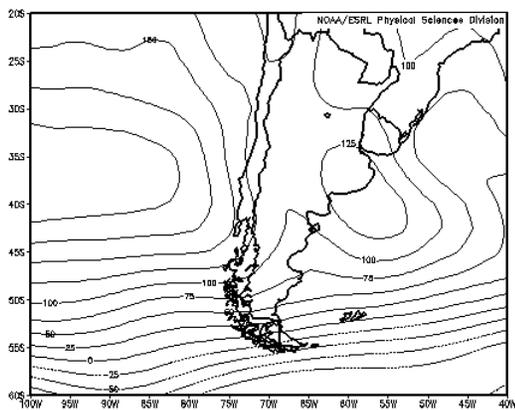
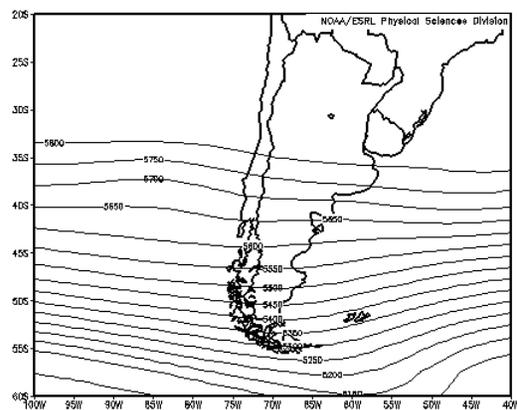
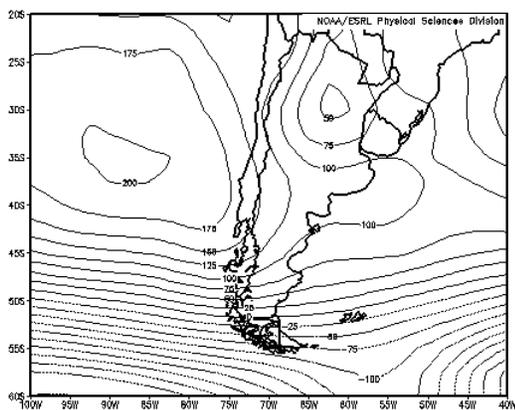


Figura 3: Campos de altura geopotencial de 1000 (izquierda) y 500 (derecha) hPa, correspondientes a las fechas con mayor factor de carga  $F$  para cada una de las CPs en los modos que se indican en cada panel.

17 ene 95 / CP3 (-)



2 dic 87 / CP4 (+)



6 mar 91 / CP4 (-)

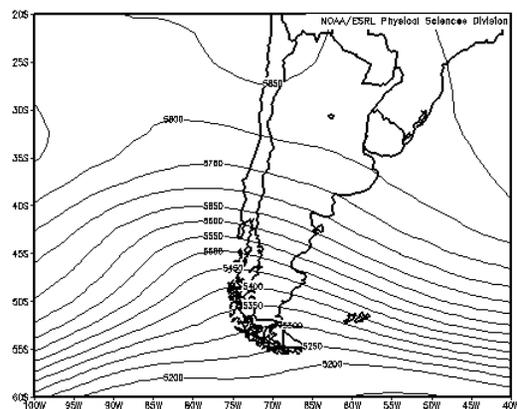
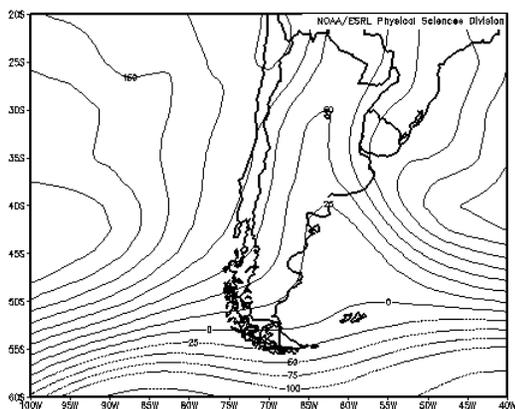
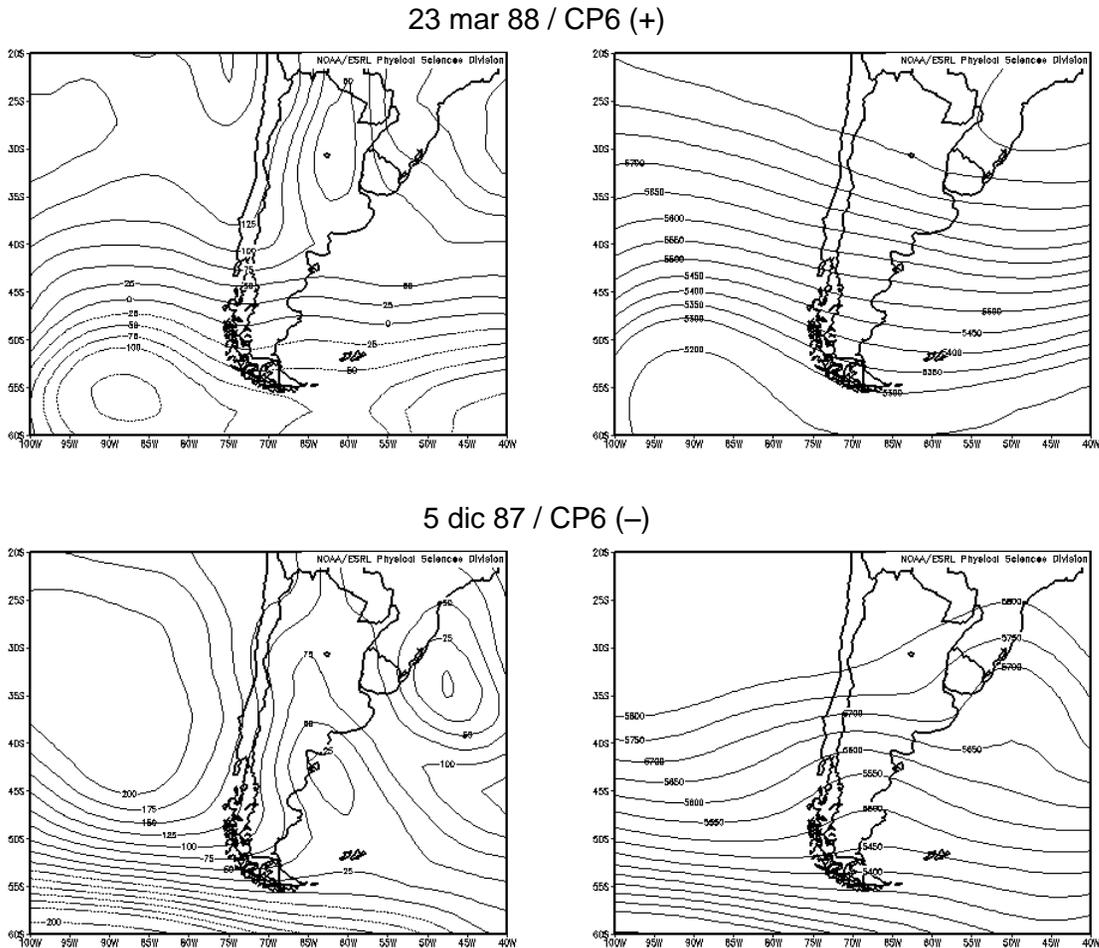


Figura 3 (continuación)



*Figura 3 (continuación)*

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se ha logrado implementar un análisis de CPs para la determinación objetiva de los principales tipos de perfiles verticales de T y Td predominantes en la región norte de la provincia de Mendoza. Estos patrones fueron a su vez comparados con sondeos reales de días particulares (aquellos para los cuales se presenta un valor máximo en la componente de carga respectiva) encontrándose marcadas similitudes entre ambos, lo cual indica que los patrones no constituyen sólo meros artefactos matemáticos, sino que pueden interpretarse como verdaderos perfiles verticales representativos de situaciones reales. Más aún, si se comparan no sólo con un caso real puntual, sino con el perfil

promedio de los diez días con mayores valores de la componente de carga respectiva, se obtienen los mismos resultados (no mostrados). Sin embargo, el hecho de que las componentes se calculen a partir de las desviaciones respecto del sondeo medio (sondeos anómalos), puede arrojar patrones con valores de Td que superan a los de T en ciertos niveles, ya que en el conjunto de datos puede haber situaciones en las que en algún nivel la anomalía de Td supere a la anomalía de T correspondiente y el hecho de sumar el sondeo medio no alcanza a compensar la diferencia. Se ha visto, mediante la comparación con perfiles reales asociados, que una situación como esta indica una capa saturada o próxima a la saturación. Posiblemente, esta circunstancia pueda corregirse mediante la

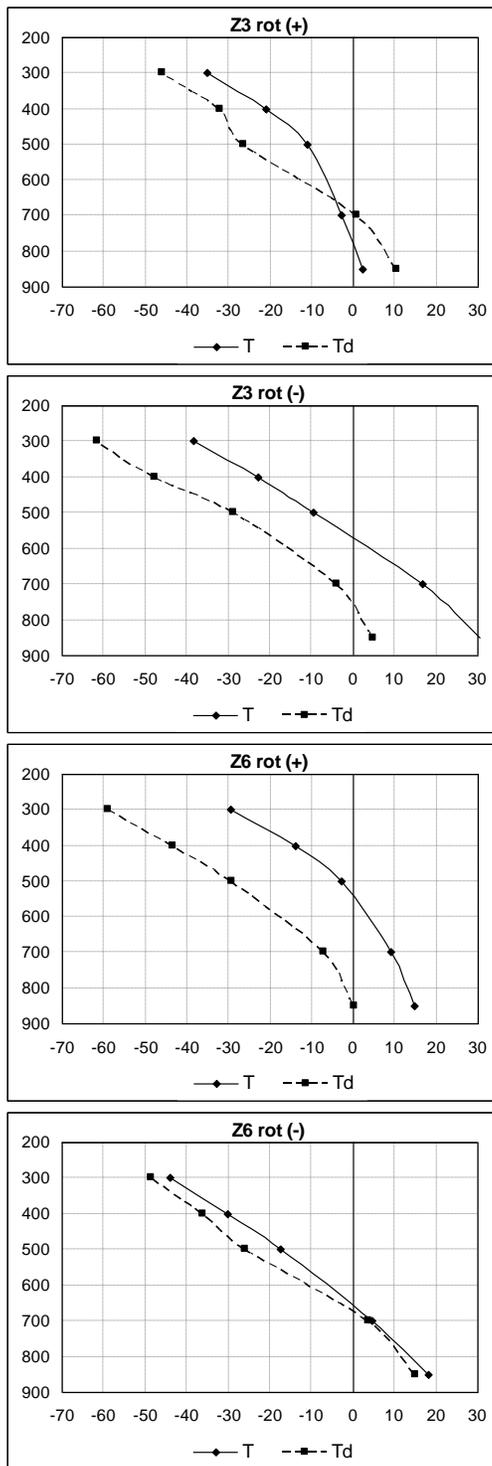


Figura 4: Componentes rotadas 3 (paneles superiores) y 6 (paneles inferiores) en modo directo (indicado como positivo) e inverso (indicado como negativo).

implementación del análisis de CPs basado en la matriz de covarianzas, ya que de esta forma las componentes se calcularían sin estandarizar los sondeos anómalos, conservando las magnitudes y evitando el escalamiento de las anomalías que implica el uso de la matriz de correlaciones; aunque esta es una posibilidad que el investigador deberá examinar en cada caso y requiere un mayor estudio.

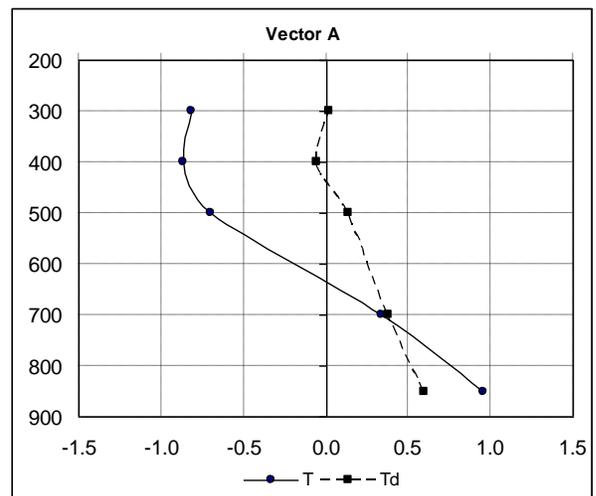


Figura 5: Gráfico del vector A, definido a partir de las CPs no rotadas estandarizadas y los coeficientes de la ecuación de regresión múltiple logística con 4 predictores entre el índice de C-NC y las componentes de carga.

Por otra parte, definiendo un indicador de actividad convectiva, o ausencia de la misma, en base a las observaciones meteorológicas reportadas en la estación de radiosondeo, y correlacionándolo mediante un modelo de regresión logística con las componentes de carga obtenidas del análisis de CPs, se han logrado identificar los principales perfiles verticales que discriminan entre situaciones de convección y de no convección. En rasgos generales, la actividad convectiva en el norte de Mendoza se favorecería en entornos relativamente húmedos (principalmente con un entorno saturado en niveles medios y superiores) y con un marcado gradiente de T en niveles medios y altos, mientras se inhibiría con entornos secos en niveles medios y altos, y débiles gradientes de T en capas bajas. El análisis de las componentes rotadas, sin embargo, indicaría que el factor

fundamental que determina un ambiente propicio o no para la convección es el gradiente de T, más que la humedad.

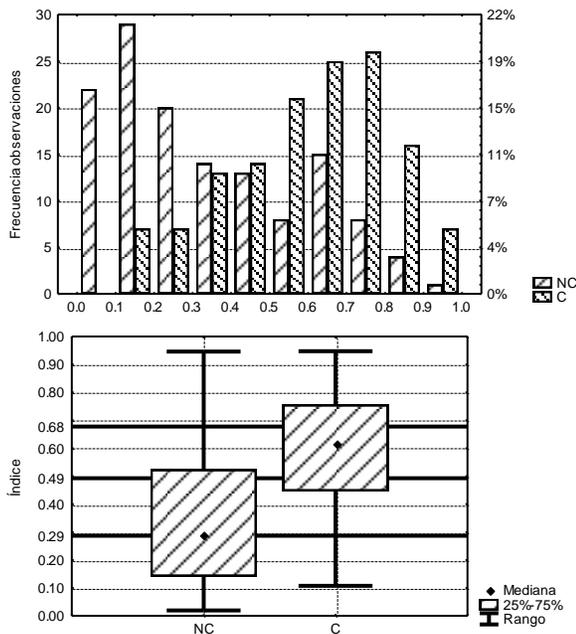


Figura 6: Panel superior) Histograma de frecuencias de los valores del índice de C-NC estimado a partir de la ecuación [7] para 270 observaciones tomadas de los períodos octubre-marzo de 2006-2007, 2007-2008 y 2008-2009, separados en 136 eventos en los que efectivamente se observó convección en la estación meteorológica (conjunto C) y 134 en los que no se observó (conjunto NC). Panel inferior) Box-plot asociado a los datos del histograma anterior. Los valores resaltados indican, en orden de mayor a menor, el percentil 90 de la distribución NC, la mediana de la distribución conjunta C-NC y el percentil 10 de la distribución C.

Si bien para algunos patrones pueden identificarse determinadas situaciones sinópticas particulares asociadas a la C o NC, otros patrones no muestran características distintivas notorias entre estos casos. En rasgos generales, sin embargo, situaciones asociadas a pasajes frontales favorecerían la actividad convectiva, mientras una situación con el anticiclón del Pacífico desplazado hacia latitudes más bajas junto a una baja presión en el noreste argentino, la inhibirían.

El indicador de C/NC puede estimarse a partir de un modelo de regresión múltiple logístico dependiente de las componentes de carga, con un valor de correlación conjunta de 0,50. En el caso de las componentes no rotadas, el modelo depende de cuatro componentes de carga, mientras que la aplicación de rotación VARIMAX a las componentes, permite obtener un modelo dependiente de sólo dos componentes de carga con un valor de correlación conjunta sólo 9 centésimas menor. Este modelo de regresión múltiple, calculado a partir de las componentes rotadas o no rotadas, define un estimador del indicador de C/NC, que consecuentemente constituye un índice de estabilidad/inestabilidad, que puede obtenerse muy fácilmente a partir del producto escalar entre el radiosondeo dado y un vector **A** determinado por única vez a partir del análisis de CPs y el modelo de regresión. Por lo tanto, el estudio puede efectuarse para una región cualquiera en la cual se cuente con información de radiosondeos, a partir de un conjunto de datos del lugar, y determinar así el vector **A** para esa región, que luego puede usarse para el cálculo del índice como apoyo para el pronóstico de actividad convectiva. En consecuencia, el vector **A** dependerá del conjunto de datos de las estaciones consideradas y por lo tanto de las características climatológicas de cada región, lo cual redundará en índices con distinto grado de efectividad de acuerdo a la zona. Para este análisis sobre la región norte de Mendoza, la efectividad del índice resultó del 72%, sólo 3% menor a la obtenida por Simonelli (2000) para el índice Fawbush-Miller, que resultó el de mayor efectividad de entre los analizados por la autora. Sin embargo, cabe destacar que para el presente estudio, un índice superior a 0,68 o inferior a 0,29 indicaría la generación de actividad convectiva o de inhibición de la misma respectivamente, en las 24 horas siguientes a la obtención del radiosondeo, con un 10% de probabilidad de error; aunque parte de este error podría deberse a la forma de definición del indicador de C-NC (p.e., la presencia o no de nubes bajas de los grupos 3 y/o 9 en el período de 24 horas siguientes a la hora del radiosondeo), debido a que, por ejemplo, el índice podría estar indicando un ambiente inestable, con actividad convectiva producida en horas precedentes a la hora del radiosondeo, que luego se estabiliza con la desaparición de la convección en las siguientes 24 horas; o bien podría indicar un

ambiente estable pero que luego se inestabiliza produciendo actividad convectiva en horas de la madrugada siguiente, lo cual no es advertido a la hora del radiosondeo. El investigador deberá determinar el mejor indicador en función de las condiciones climatológicas del lugar a estudiar y de los datos disponibles.

Agradecimientos. A los fondos provenientes de los proyectos de investigación PIP 2010-439 y PFIP 2008-056. Al Servicio Meteorológico Nacional por la facilitación de los datos. A Martín Silva y Julio Cristaldo.

## REFERENCIAS

- Deming, J., Chaohua, D., Ruili, H. y Ronghui, C., 2008. Impact assessment of additional predictors to the retrieval of atmospheric profiles from infrared radiances. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Art. n° 71520D.
- Duarte, M.L., 1993. Temporal variations of the vertical profile of temperatures of Argentina. *Int. J. Climatol.*, 13, 437-445.
- Informe Ambiental, 2009. Secretaría de Medio Ambiente, Gobierno de Mendoza.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y. Leetmaa, A. y Reynolds, R., 1996. The NCEP / NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-441.
- Lattin, J., Carroll, J.D. y Green, P.E., 2003. *Analyzing Multivariate Data*. Duxbury Applied Series, Thompson Brooks/Cole. 556 págs.
- Martínez Carretero, E. y Dalmaso A.D. (Editores), 1995. *Mendoza Ambiental*. IADIZA – Ministerio de Medio Ambiente, Urbanismo y Vivienda. 292 págs.
- Moyano, M.C., Blanco, V.A. y Casinelli, E.J., 1972. Análisis comparativo de índices de inestabilidad como predictores de fenómenos convectivos para las estaciones Resistencia, Córdoba y Ezeiza. *Meteorologica*, 3, N° 1-2-3, 135-156.
- Nicolini, M.C. y Torres Brizuela, M. 1997. Estadística de vientos fuertes asociados a convección en Ezeiza y Resistencia y estudio numérico de los forzantes en un caso real. *Meteorologica*, 22, N° 2, 19-35.
- Nicolini, M. y Norte, F., 1978. Análisis en tiempo diferido de las situaciones sinópticas correspondientes a los días de tormenta convectiva en la Provincia de Mendoza. Informe de la temporada granicera 1976-77, 26-43.
- Norte, F.A., 1982. Evaluación de índices de inestabilidad y parámetros sinópticos como predictores de tiempo convectivo en el norte de Mendoza. *Geoacta*, 11, N° 2, 193-206.
- Norte F., 1980. Clasificación sinóptica de las tormentas convectivas y su relación con las tareas operativas en el área de Defensa. Informe de las primeras experiencias de ajuste de defensa. Temporada granicera 1978-1979. Tomo 2, 51-95. Programa Nacional de Lucha Antigranizo. Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales.
- Rosso, L.C., Quinteros, C.Y., de Candurra, R. y de Lázaro S.Q., 1987. Índices de inestabilidad como predictores de ocurrencia de precipitaciones. *Anales II Congreso Interamericano de Meteorología y V Congreso Argentino de Meteorología*, 3.2.1-3.2.4
- Saluzzi, M.E., 1983. Aspectos físicos de la convección severa en Mendoza. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires, 115 págs.
- Saluzzi, M.E., Nuñez J.M. y Perez, L., 1979. Las grandes nubes convectivas a sotavento de los Andes, sus características y su comportamiento. *Geoacta*, 9, N° 1, 35-45.
- Servicio Meteorológico Nacional, 2009. *Estadísticas Climatológicas*.
- Simonelli, S.C., 2000. Modelo estadístico de pronóstico de convección para la zona norte de la provincia de Mendoza. Tesis Doctoral, FCEyN, UBA, 158 págs.
- Smith, W.L. y Woolf, H.M., 1976. The use of Eigenvectors of Statistical Covariance Matrices for Interpreting Satellite Sounding Radiometer Observations. *J. Atmos. Sci.*, 33, 1127-1140.
- Wang, J., Cole, H.L. y Carlson, D.J., 2001. Water Vapor Variability in the Tropical Western Pacific from 20-year Radiosonde Data. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18, N° 5, 752-766.



## NOTAS Y CORRESPONDENCIA

### APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA SIG PARA LA REPRESENTACIÓN DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA MARINA EN EL ATLÁNTICO SUR

Elisa C. Nuré y Estela A. Collini

Departamento Meteorología, Servicio de Hidrografía Naval  
Comodoro Py 2055, Piso 15, Ciudad Autónoma de Buenos Aires

(Manuscrito recibido el 22 de abril de 2010, en su versión final el 20 de diciembre de 2010)

#### RESUMEN

Este trabajo presenta una aplicación de la tecnología de Sistemas de Información Geográfica (SIG) a las bases de datos de información meteorológica marina generadas en función de procedimientos estadísticos recomendados por la Organización Meteorológica Mundial para la elaboración de Resúmenes Climáticos Marinos.

Este SIG permite una visualización dinámica de valores extremos y frecuencias en forma de mapas, tablas y gráficos, tanto temporales como espaciales, así como de la distribución de las observaciones meteorológicas marinas en el Océano Atlántico Sudoccidental.

La información climática regional marina elaborada utilizando esta tecnología, es de interés para toda ciencia o disciplina relacionada con el medio ambiente y constituye un valioso soporte para la planificación de tareas en el ámbito de la seguridad náutica, tanto para el Servicio de Hidrografía Naval como para otras instituciones que desarrollen actividades afines.

*Palabras claves:* SIG, climática, estadística, marina, seguridad.

### APPLICATION OF GIS TECHNOLOGY FOR THE REPRESENTATION OF CLIMATE MARINE INFORMATION IN THE SOUTH ATLANTIC REGION

#### ABSTRACT

This article shows a Geographic Information Systems (GIS) application to marine climatic information data bases. These data bases are created following the World Meteorological Organization recommendations for applying statistical procedures to marine observations in order to elaborate Marine Climatic Summaries.

This GIS allows a dynamic visualization of maps, tables and graphics showing extreme values and frequencies of meteorological variables in time and space as well as the marine meteorological observations distribution over the South Atlantic Ocean.

The regional climatic marine information obtained using this technology, will be a useful tool for environmental related disciplines and, it will be also of valuable support for the safety of naval operations.

*Keywords:* GIS, climatic, statistical, naval, safety

## 1. INTRODUCCIÓN

El globo terráqueo se ha dividido en zonas de incumbencia y responsabilidad de los países miembros de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), quienes se comprometen a contribuir a la seguridad náutica en dichas áreas, mediante normas y procedimientos definidos por la Organización Marítima Internacional en el Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (IMO, 1974). Para la República Argentina se define la zona NAVAREA VI, área que cubre una extensión aproximada desde 35° 50'S hasta el Polo Sur y entre 20°O y 67° 16'O, siendo la costa argentina un límite natural.

Los océanos juegan un rol clave en el sistema climático intercambiando con la atmósfera grandes cantidades de calor, vapor de agua, partículas y momento; son dinámicos y sus propiedades superficiales varían en diferentes escalas temporales, permitiendo una amplia gama de intercambios y retroalimentaciones entre la atmósfera y el océano (Bigg y otros, 2003).

Los océanos del Hemisferio Sur presentan una baja densidad de observaciones meteorológicas comparativamente con otros océanos del mundo, en cambio en el caso del Atlántico Norte, la navegación es una actividad rutinaria que siempre aportó información meteorológica que contribuyó a desarrollar el conocimiento climatológico.

Dentro del área del programa de gestión de datos de la OMM, el equipo de expertos sobre climatología marina desarrolla procedimientos y normas para la recopilación de datos, para la creación de conjuntos de datos climatológicos de acuerdo a Normas Mínimas de Control de Calidad (WMO, 2004), y establece mecanismos de intercambio de datos con los Centros Colectores Internacionales.

El Departamento de Meteorología del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) en coordinación con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), tiene como responsabilidad la recopilación de las observaciones meteorológicas marinas, habiéndose generado una base de datos que abarca el período desde 1950 a la fecha, actualizada permanentemente (Nuré, 2001; 2006; 2007; 2009a). Dichas bases de datos fueron depuradas siguiendo los procedimientos sugeridos por la OMM para la generación de la climatología marina. Se obtuvo así un conjunto de resultados

estadísticos contenidos en un sistema de bases de datos, definido como Resúmenes Climáticos Marinos (Nuré, 2009b).

Los SIG son una herramienta sistemática que combina el manejo de datos con la presentación de mapas, refiriendo geográficamente una serie de "estratos" de información, a fin de facilitar la superposición, cuantificación y síntesis de los datos, así como de orientar las decisiones, facilitando el avance en el estudio y análisis de las variables climatológicas. En un trabajo preliminar se mostraron ejemplos de la aplicación de esta tecnología a la distribución de las observaciones meteorológicas marinas (Collini y otros, 2004).

En esta nota se exponen ejemplos de la aplicación de esta tecnología a los Resúmenes Climáticos Marinos de variables seleccionadas sobre el Océano Atlántico Sudoccidental.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

Es importante sintetizar las diferentes etapas involucradas en la generación del dato que forma parte de estos Resúmenes Climáticos Marinos.

Los buques en navegación realizan observaciones meteorológicas, que se codifican en el formato de mensaje SHIP (WMO, 1988), se asientan en planillas de observaciones y simultáneamente se emiten a través de las líneas de comunicaciones del buque en navegación, llegando en tiempo real al Departamento Meteorología del SHN, donde se les aplica en tiempo diferido, un tratamiento de control de calidad según Recomendaciones de la OMM (WMO, 1988; 2004). Estos datos consistidos, se agregan a la base de datos histórica y una selección de los mismos es procesada trimestralmente para ser transferida a los Centros Colectores de Datos de Alemania (Deutscher Wetterdienst, Hamburg) e Inglaterra (Meteorological Office, Bracknell), tarea que se realiza en coordinación con el SMN.

En esta base de datos, cada registro contiene la observación meteorológica original, a la cual se agregan 20 campos de control de calidad definidos por la OMM y 14 campos definidos en el Departamento, cuyo contenido es el resultado de las verificaciones de los valores de las variables, realizadas por los programas de consistencia.

Además se desarrollaron programas de grabación con control de calidad "in situ", para ser instalados a bordo de los buques en navegación a los fines de optimizar la calidad de los datos y generar

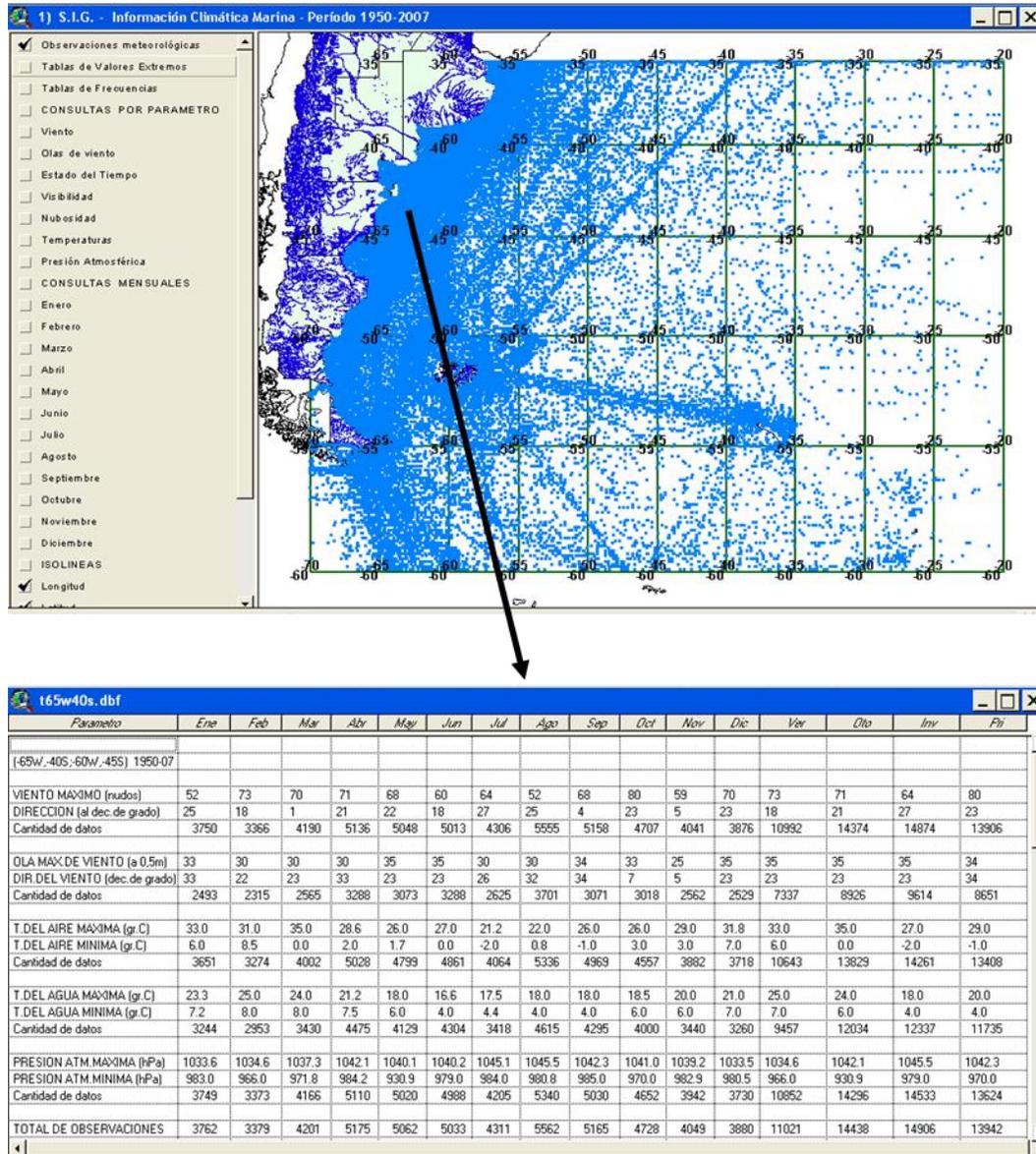


Figura 1: mapa donde se muestra la distribución de las observaciones en el Atlántico Sudoccidental y la tabla de valores extremos de las variables para la zona comprendida entre 40° S – 45° S y 60° W- 65° W y la costa.

automáticamente el mensaje codificado. Un resumen de la metodología de control de calidad aplicada, se describe en el ANEXO.

A esta base de datos se aplican programas de cálculo de valores extremos y frecuencias relativas de viento, olas de viento, estado del tiempo, visibilidad, nubosidad, temperaturas del aire y del agua y presión atmosférica, para la generación de los resúmenes climáticos sobre una retícula de 5° x

5° sobre la zona NAVAREA VI, los cuales se integran y visualizan en un entorno SIG.

Cabe aclarar que, dado que la base de datos de las observaciones SHIP se actualiza constantemente con el ingreso de registros, al efectuar periódicamente el reproceso de las aplicaciones, también se actualizan consecuentemente los resúmenes climáticos marinos. En este trabajo se muestran resultados preliminares correspondientes

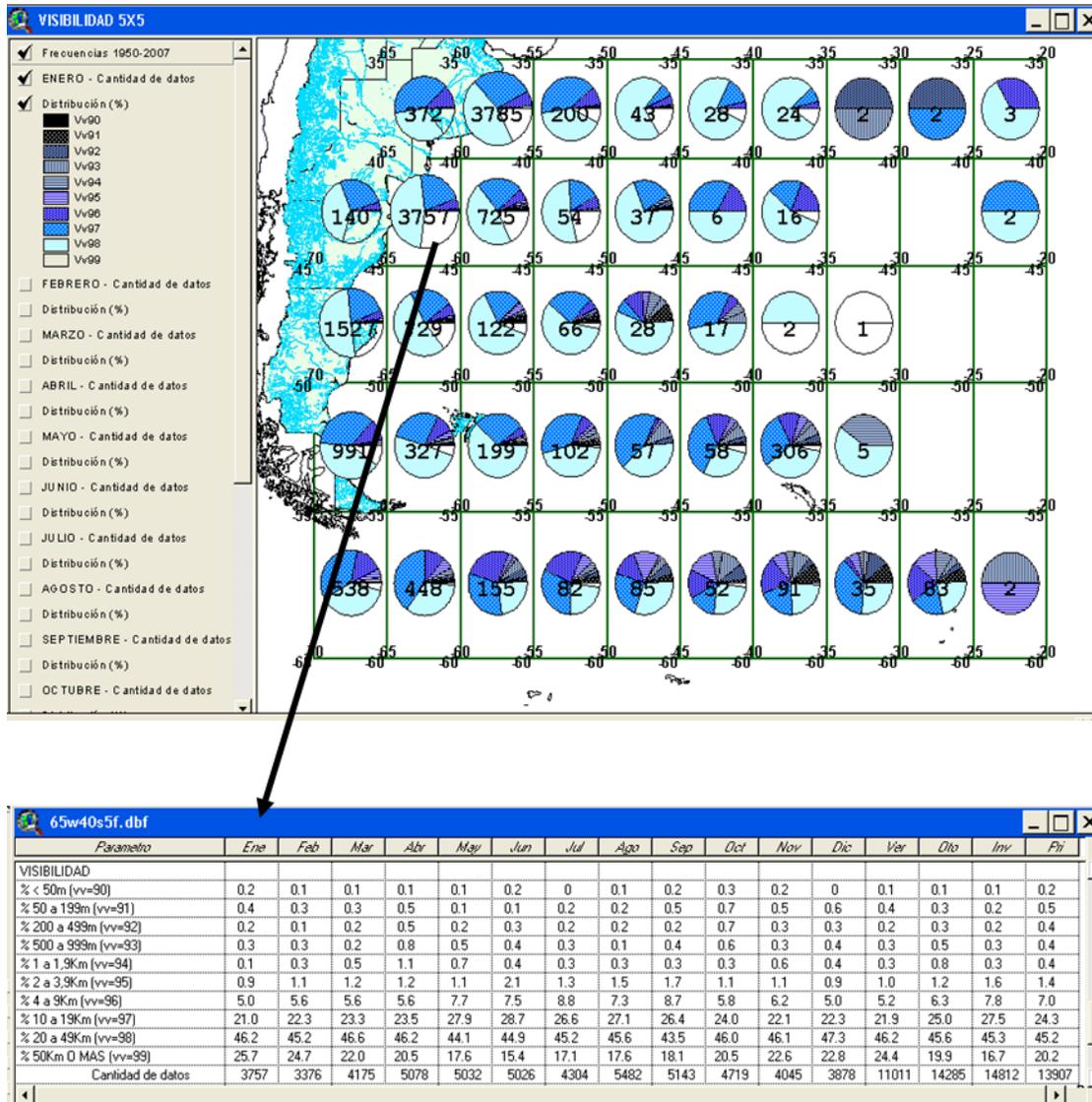


Figura 2: mapa donde se muestra la distribución de la frecuencia de visibilidad por gamas del mes de enero del período, con la tabla de los porcentajes para todos los meses y estaciones para la misma zona de la Figura 1.

al período 1950-2007 (se está en proceso de digitalizar información histórica).

### 3. RESULTADOS

La aplicación de la tecnología SIG a los resúmenes climáticos marinos produce una visualización dinámica de la climatología marina en forma de tablas y gráficos (tanto temporales como espaciales), de la cantidad de datos, las frecuencias

relativas en intervalos y valores extremos con su localización, de las variables viento, olas de viento, estado del tiempo, visibilidad, nubosidad, temperatura del aire y del agua, y presión atmosférica, en cada cuadrado de 5° x 5° de la retícula.

En este SIG se realizan consultas sobre los resultados estadísticos mensuales del período completo (enero a diciembre 1950-2007), estacionales (verano, otoño, invierno y primavera

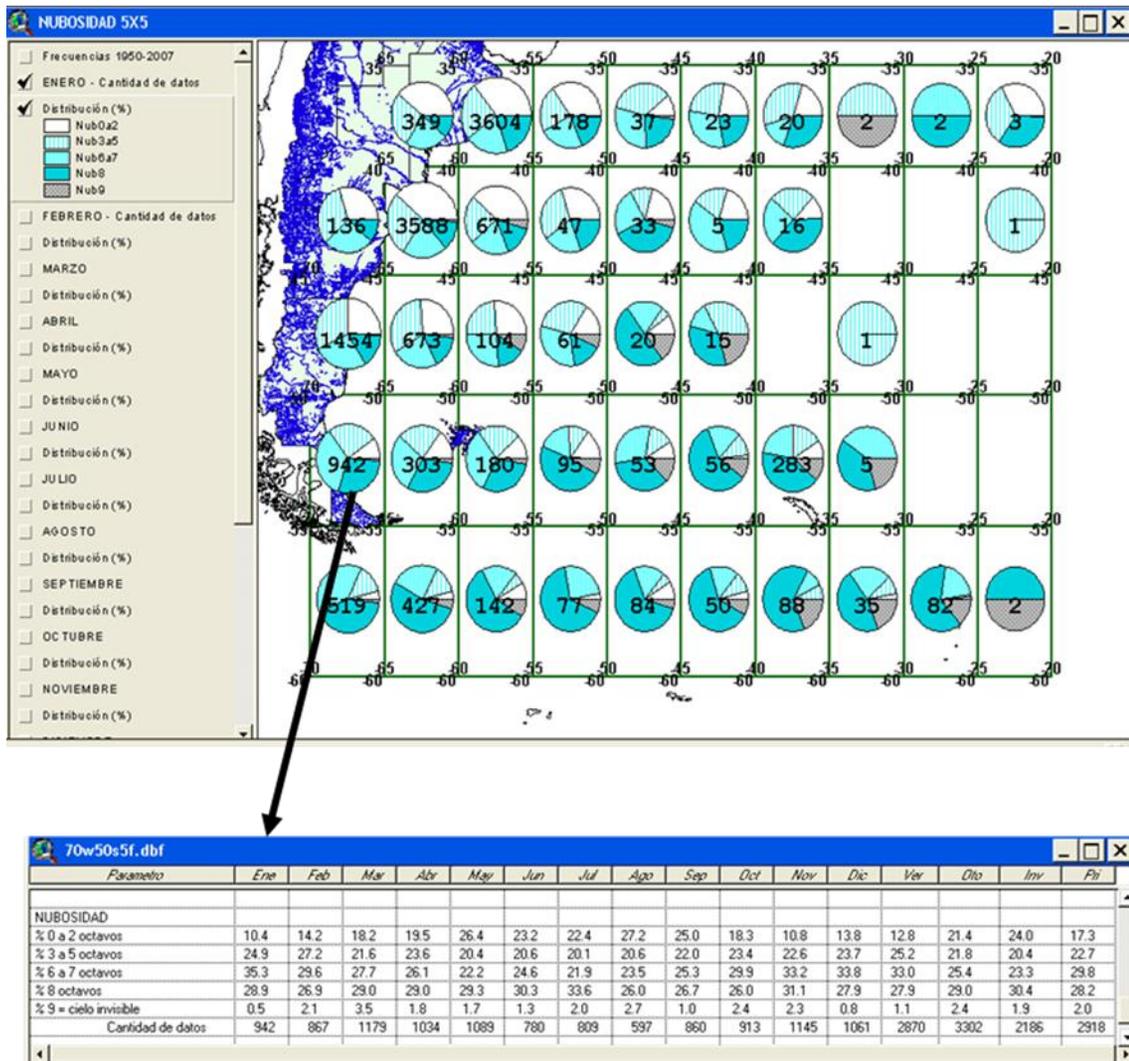


Figura 3: mapa donde se muestra la distribución de la frecuencia de nubosidad por gamas del mes de enero del período con la tabla de los porcentajes para todos los meses y estaciones para la zona comprendida entre 50°S y 55°S y 65°W y la costa.

1950-2007), o decadales (enero a diciembre, verano, otoño, invierno y primavera 1950-59, 1960-69, 1970-79, 1980-89, 1990-99 y 2000-09), considerando tres tipos de selección: i) geográfica (seleccionando un cuadrado dentro de la retícula de 5° x 5°, se despliega la correspondiente tabla), ii) por parámetro (seleccionando la capa temática del parámetro, se despliega un sub-menú de selección temporal) o iii) temporal (seleccionando la capa temática de mes o estación, se despliega un sub-menú de selección de parámetro).

En este trabajo se muestran algunos ejemplos de los productos generados. En particular, mapas y tablas de valores extremos y frecuencias de algunas variables, resultantes de la activación de la correspondiente capa temática a consultar y la posterior selección de la zona en el océano. En la Figura 1, se observa la distribución de las observaciones meteorológicas marinas en el Atlántico Sur, provenientes de la base de datos histórica. En la misma figura, para la zona comprendida entre 40°S-45°S y 60°O-65°O y la costa, se muestran las tablas de valores máximos de

viento, de olas de viento y su respectiva dirección, de valores extremos de presión atmosférica, de temperatura del aire y del mar, para todos los meses y estaciones. Los gráficos de distribución de frecuencia de visibilidad en gamas para el mes de enero, junto con la tabla de los porcentajes para todos los meses y estaciones, se muestran en la Figura 2. Dado que el Estrecho de Magallanes es una zona de alto tránsito marítimo, tanto la

distribución del viento como la distribución de la nubosidad son variables de particular interés y frecuente consulta. Para la zona comprendida entre 65°S, 45°O y la costa, la Figura 3 presenta la distribución de nubosidad en gamas del mes de enero y la tabla de los porcentajes para todos los meses y estaciones.

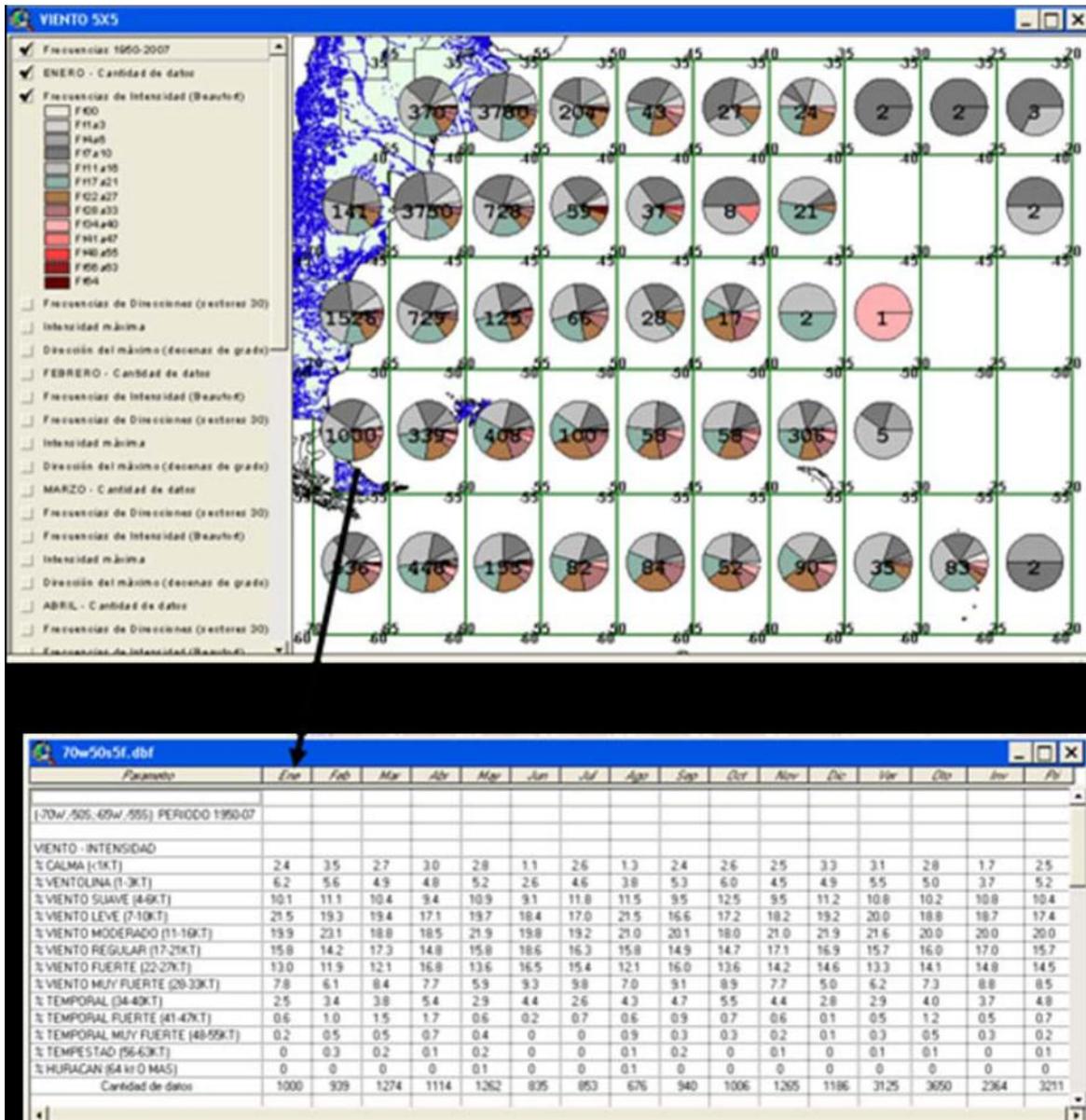


Figura 4: mapa donde se muestra la distribución de frecuencia de la intensidad del viento para el mes de enero del período y con la tabla de los porcentajes para todos los meses y estaciones para la misma zona de la Figura 3.

Para la misma zona, en la Figura 4 se observa la distribución de frecuencia de la intensidad del viento para el mes de enero y la tabla de porcentajes para todos los meses y estaciones.

La aplicación SIG desarrollada presenta los mapas en Proyección Mercator con elipsoide de referencia GS 84. Los datos de los ríos y afluentes contenidos en el Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina, editado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación e Instituto Nacional del Agua (INA 2002), se han integrado al SIG.

#### 4. CONCLUSIONES

Con la aplicación de los SIG, la información geográfica puede ser integrada fácilmente en las bases de datos y puede ser visualizada en un mapa y simultáneamente relacionada con otros datos georeferenciados. Las mayores ventajas derivadas de su utilización, surgen de la posibilidad de realizar análisis de conjuntos de datos espaciales y no espaciales de forma integrada, sobre todo de aquellos datos donde la localización geográfica es una característica importante o es un elemento crítico. Las aplicaciones desarrolladas en el entorno SIG son un instrumento invaluable para la toma de decisión (por ejemplo, para la administración de recursos naturales, para el estudio del medio ambiente regional y para el estudio del cambio climático). En este caso, servirá de apoyo para las actividades desarrolladas en el ámbito marino: seguridad náutica, administración portuaria, pesca, estudios medioambientales, exploración e investigación oceanográfica, instalación de boyas, consumo de combustible, etc.

Se prevé la integración al SIG del análisis estadístico de tendencias y patrones, a partir de los valores medios de viento, temperaturas y presión atmosférica. Este objetivo general se completará con la integración de síntesis climáticas y estudios de variabilidad espacio-temporal de variables de circulación atmosférica sobre el sector Atlántico Sudoccidental.

Agradecimientos: A la División SIG del Instituto Geográfico Nacional (ex Instituto Geográfico Militar), por el soporte computacional y valioso asesoramiento. Asimismo, hemos contado con la inestimable colaboración del Dr. Héctor Salgado en materia cartográfica. Este trabajo se enmarca

dentro del Proyecto “Visualización de resúmenes climáticos marinos utilizando tecnología SIG (Sistemas de Información Geográfica)”, desarrollado en el ámbito del Departamento Meteorología del Servicio de Hidrografía Naval, dentro de los Proyectos de la Subsecretaría de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico del Ministerio de Defensa.

#### ANEXO

1. El control de calidad de los datos comprende los siguientes cuatro niveles:
2. parámetro: verificación de existencia de información y rangos válidos.
3. registro: análisis de coherencia física entre parámetros.
4. archivo: verificación de registros repetidos y análisis secuencial de observaciones sucesivas del mismo buque, que no difieran más de 6 horas entre sí, analizando los valores de posición, presión atmosférica y temperaturas que hayan resultado correctos según las verificaciones previas.
5. geográfica: verificación espacial de la información, a través del análisis de la derrota del buque, aplicando la tecnología de sistemas de información geográfica (Nuré, 2006).
6. En los niveles 1 a 3, los campos de control de calidad pueden tomar valores 0 (no se efectuó control de calidad), 1 (el elemento parece correcto), 2 (el elemento parece incompatible con otro), 3 (el elemento parece dudoso), 4 (el elemento parece erróneo) o 9 (elemento faltante).

#### REFERENCIAS

- Bigg, G.R., Jickells, T.D., Liss, P.S. y Osborn, T.J., 2003. Review: The role of the oceans in climate. *Int. J. Climatol.*, 23, 1127–1159.
- Collini, E.A., Nuré, E., Cattaneo, N., Salgado, H. y Gutiérrez, J.M., 2004. Aplicación de la Tecnología SIG para la representación de la Información Meteorológica Marina. *Anales de la Reunión de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas (AAGG)*, Octubre 2004, Buenos Aires, Argentina.
- IMO, 1974. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS). International Maritime Organization.

- INA, 2002. Atlas Digital de los Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina. Subsecretaría de Recursos Hídricos e Instituto Nacional del Agua.
- Nuré, E., 2001. Control de Calidad de la información meteorológica y glaciológica proveniente de diversas fuentes. Boletín del Servicio de Hidrografía Naval, H-106, Año IV - Nro.1.
- Nuré, E., 2006. Aplicación en un entorno de sistemas de información geográfica, para el control de calidad de la posición de las observaciones meteorológicas de buques. SMARA-MT 08/06.
- Nuré, E., 2007. Sistema de Control de Calidad de la información meteorológica marina y de hielos marinos. Jornadas Científicas y Tecnológicas del Servicio de Hidrografía Naval, 16 al 18 de Octubre de 2007.
- Nuré, E., 2009a: Base de datos de observaciones meteorológicas de buques. Historial y control de calidad. SMARA-MT 01/09.
- Nuré, E., 2009b: Resúmenes Climáticos Marinos. SMARA-MT 02/09.
- WMO, 1988. FM 13-X SHIP Report of Surface Observations from a Sea Station. World Meteorological Organization.
- WMO, 2004. Minimum quality control standards, MQCS. Versión V. Annex 2 to Recommendation 9 (JCOMM-I). Joint WMO/IOC Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology (JCOMM)