

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

Diego C. Araneo¹, Silvia C. Simonelli¹, Federico A. Norte¹, Maximiliano Viale¹ y Jorge R. Santos²

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

² 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 km² 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.

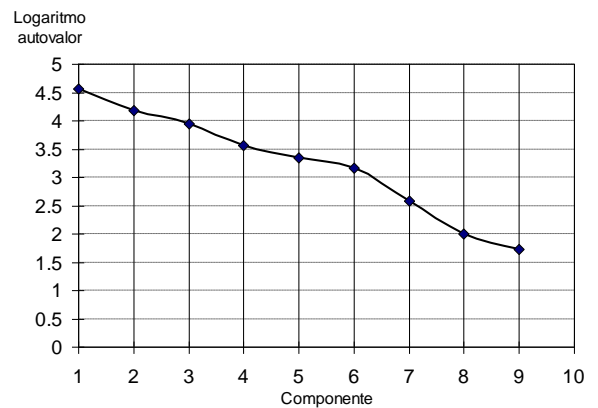


Figura 1: Diagrama de LEV para las CPs no rotadas.

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

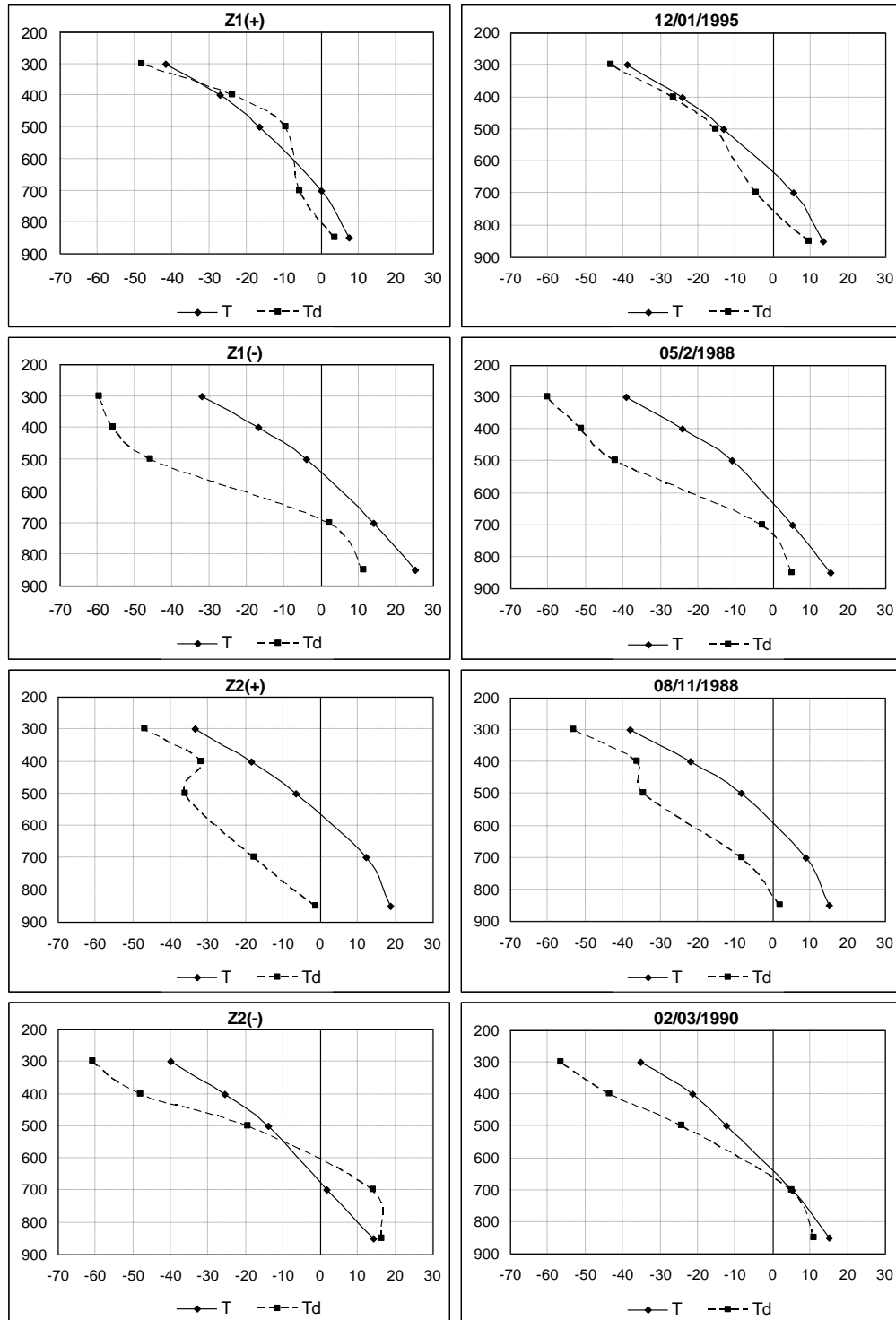


Figura 2: Izquierda: componentes principales 1 (paneles superiores) y 2 (paneles inferiores) en modo directo (+) e inverso (-). Derecha: Sondeos correspondientes al mayor factor de carga F para los casos respectivos del panel izquierdo (las fechas correspondientes se detallan en cada cuadro). En algunos 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).

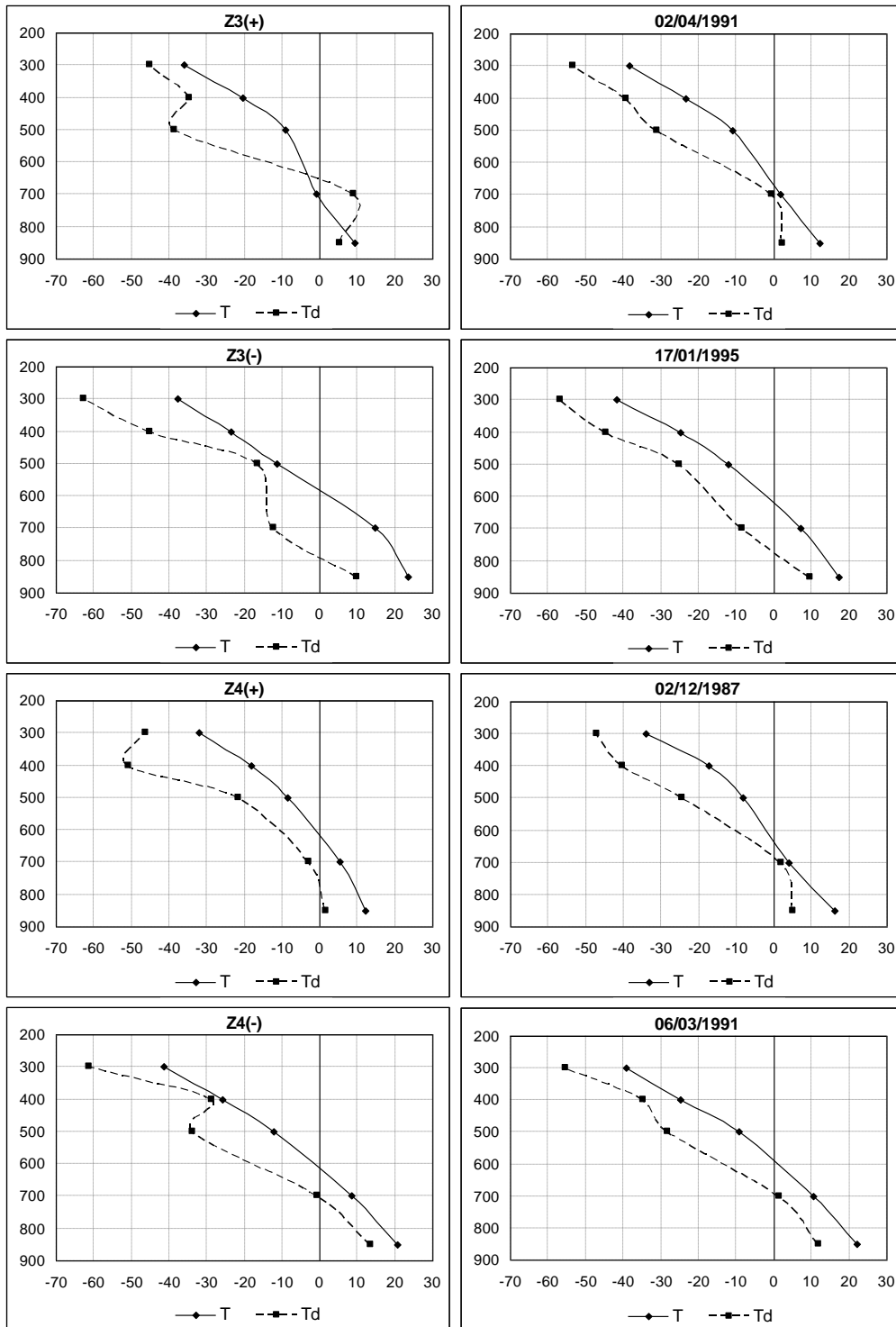


Figura 2 (continuación)

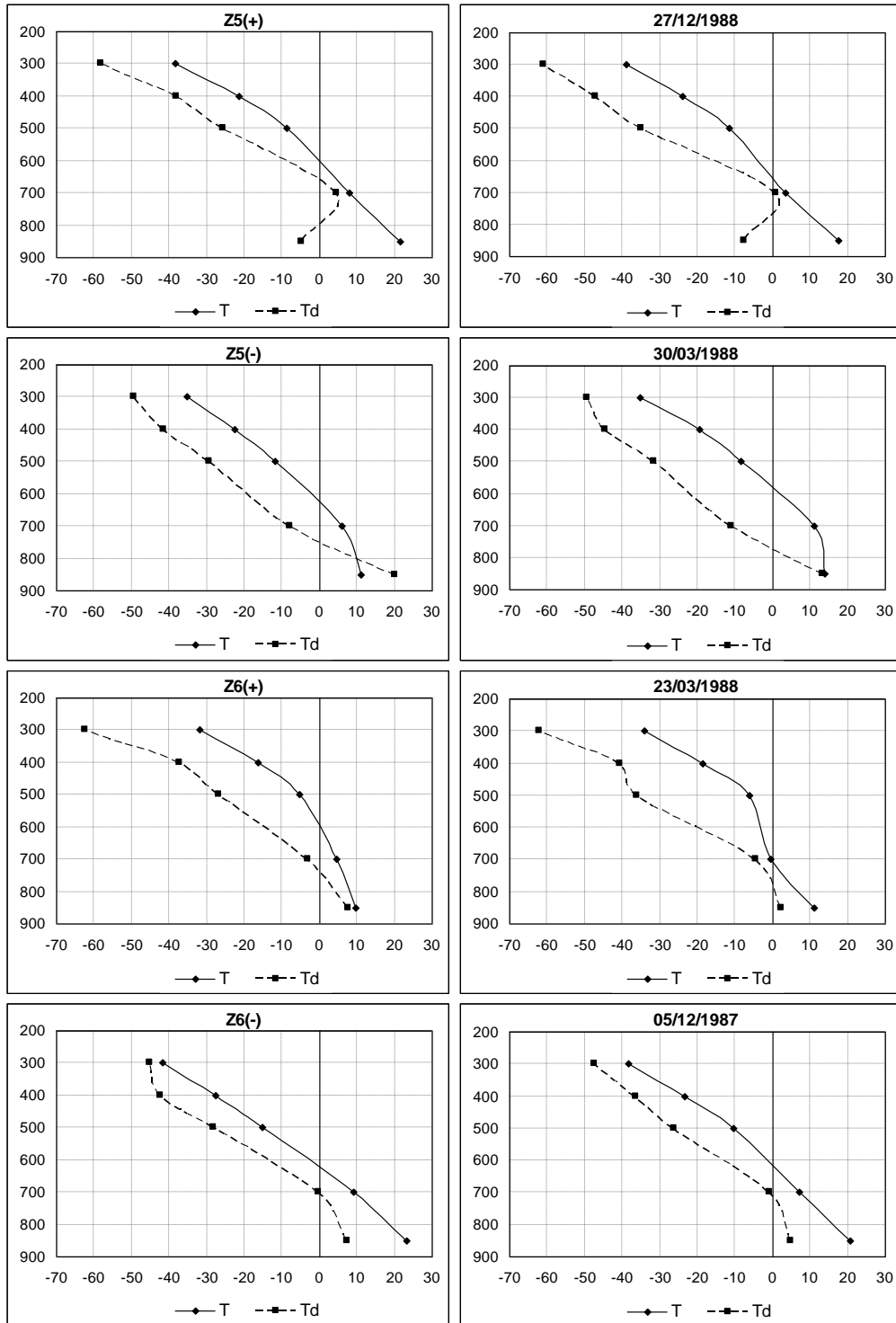


Figura 2 (continuación)

	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 ₀			-0,3406	-0,3406	-0,3184	-0,3326
F1	-0,0303	-0,1656	-0,2541	-0,3005	*	*
F2	-0,3056	-0,1845	-2,1483	0,0686	-2,1110	*
F3	-0,2319	-0,2173	-1,5553	-3,4279	-1,5478	-3,7122
F4	-0,2678	0,1555	-2,6829	0,0643	-2,6495	*
F5	-0,0074	-0,0090	-0,3904	-0,4173	*	*
F6	-0,3509	-0,3632	-4,2197	-5,3367	-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.

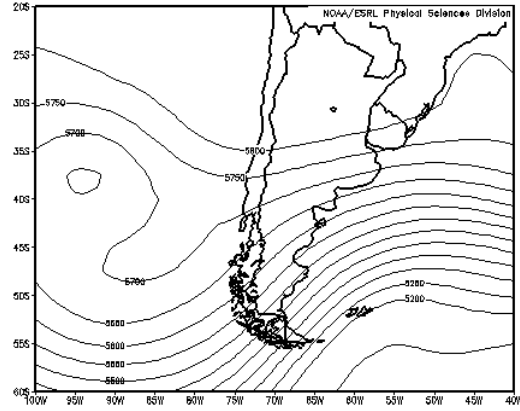
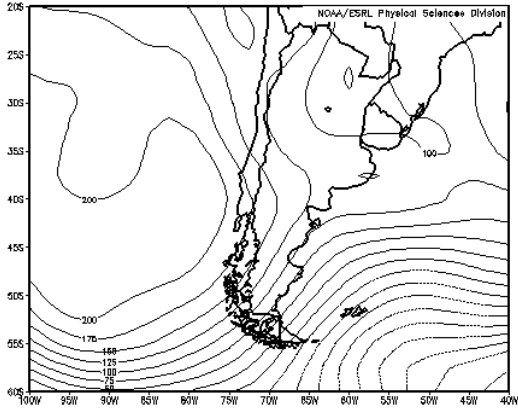
Los valores estimados del coeficiente de C-NC pueden obtenerse a partir de la ecuación [7]. Como se mencionó, el vector \mathbf{A} y el coeficiente b_0 sólo dependen de los resultados del ACP y del análisis de regresión [4]-[5], y el producto escalar en la ecuación [7] entre este vector y el vector de 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.

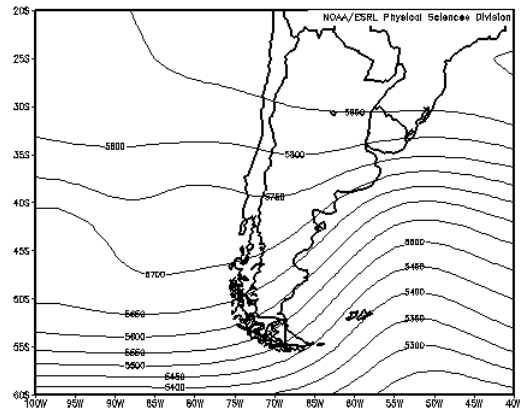
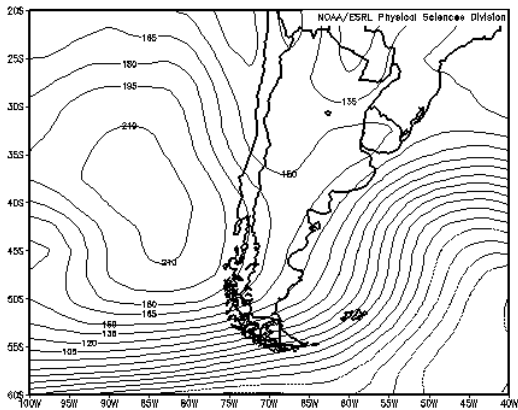
El rango comprendido entre 0,29 y 0,68 representa un intervalo de incertidumbre, que contiene el 44% del total de observaciones, en el cual el índice no discrimina para estos niveles de error. En el caso de las distribuciones estadísticas de los índices estimados a partir de las componentes rotadas con 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 (+)

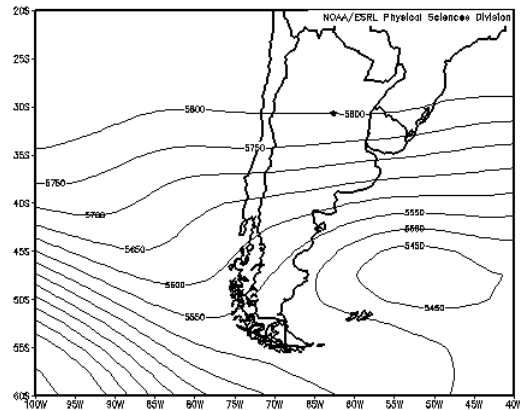
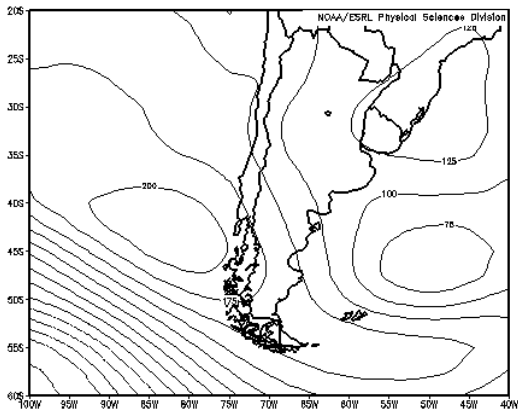
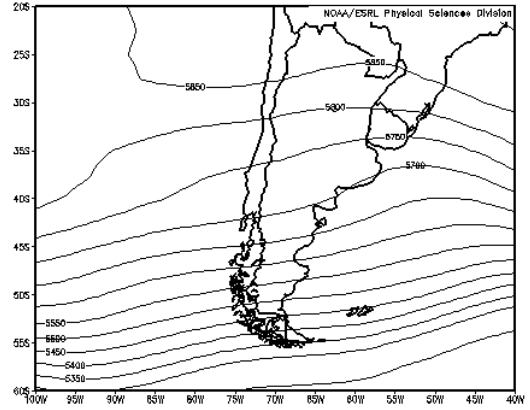
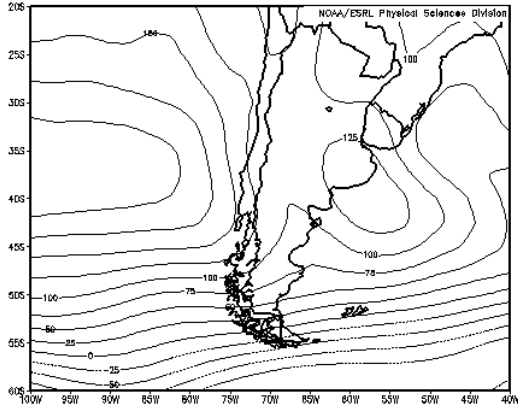
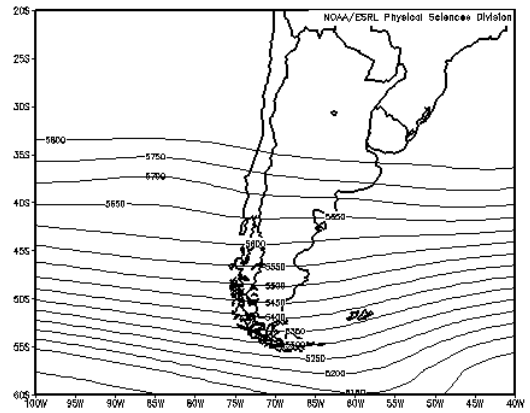
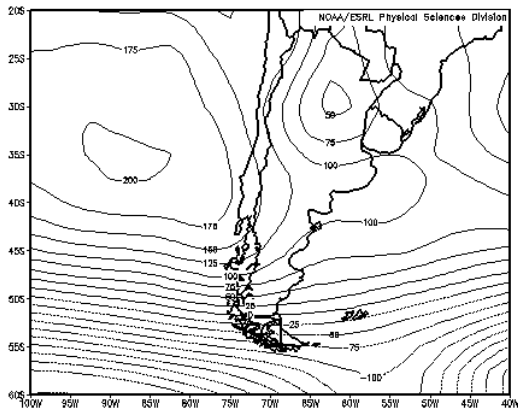


Figura 3: Campos de altura geopotencial de 1000 (izquierda) y 500 (derecha) hPa, correspondientes a las fechas con mayor factor de carga F para cada una de las CPs en los modos que se indican en cada panel.

17 ene 95 / CP3 (-)



2 dic 87 / CP4 (+)



6 mar 91 / CP4 (-)

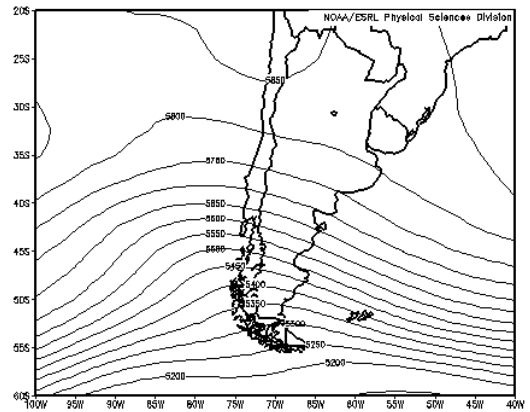
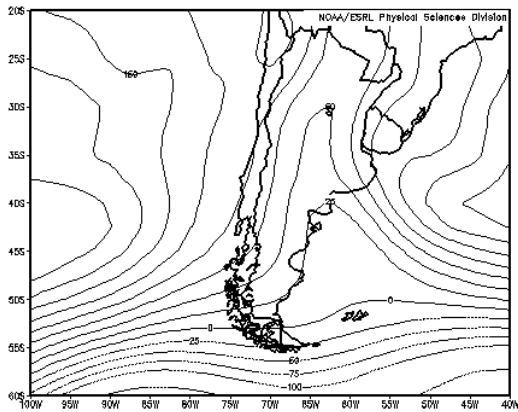


Figura 3 (continuación)

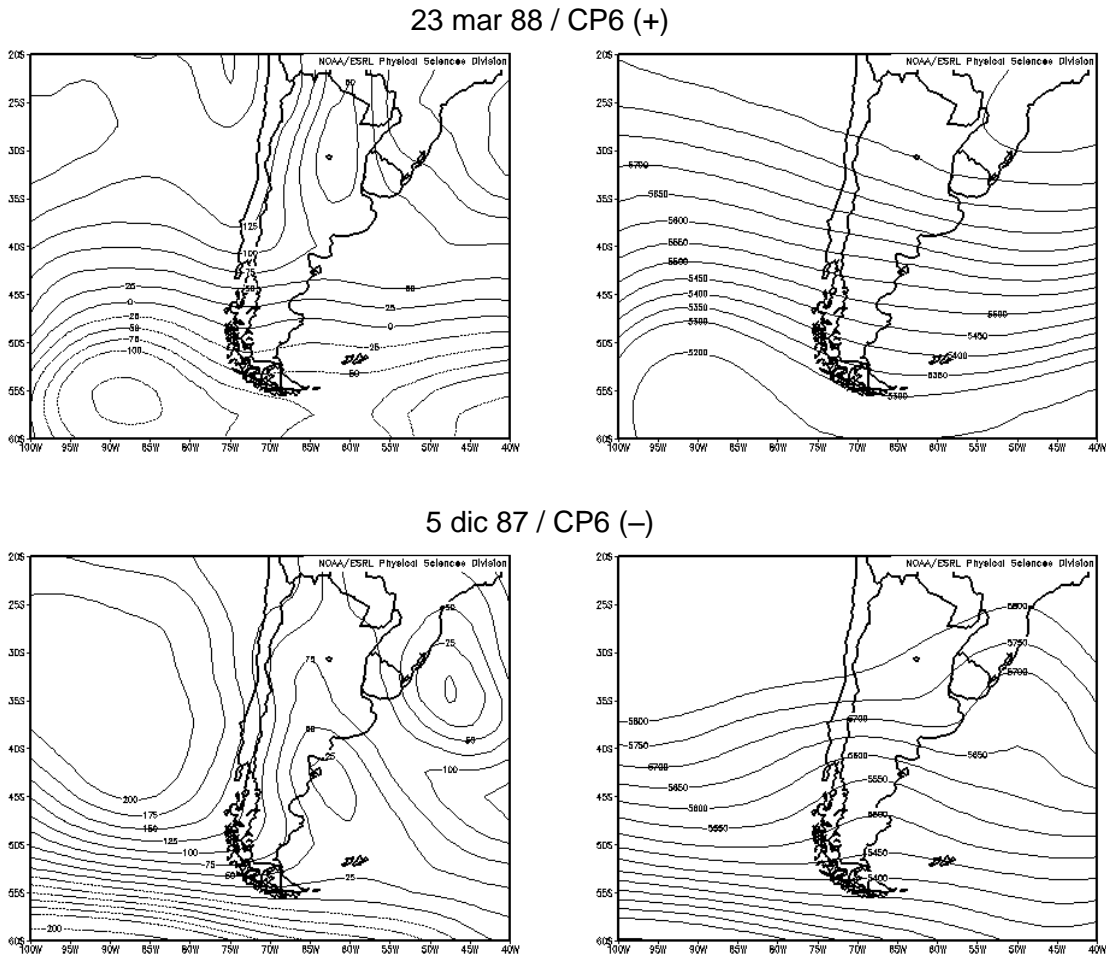


Figura 3 (continuación)

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

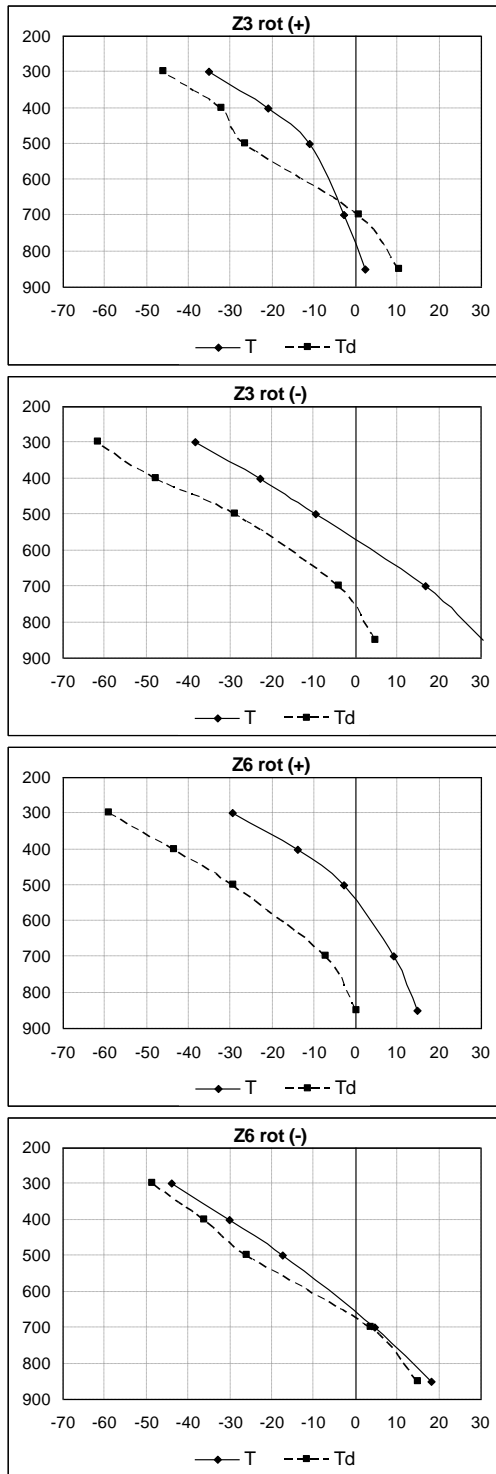


Figura 4: Componentes rotadas 3 (paneles superiores) y 6 (paneles inferiores) en modo directo (indicado como positivo) e inverso (indicado como negativo).

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.

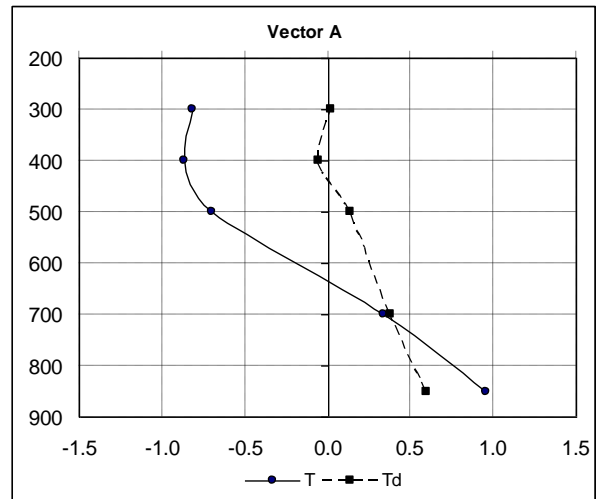


Figura 5: Gráfico del vector A, definido a partir de las CPs no rotadas estandarizadas y los coeficientes de la ecuación de regresión múltiple logística con 4 predictores entre el índice de C-NC y las componentes de carga.

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.

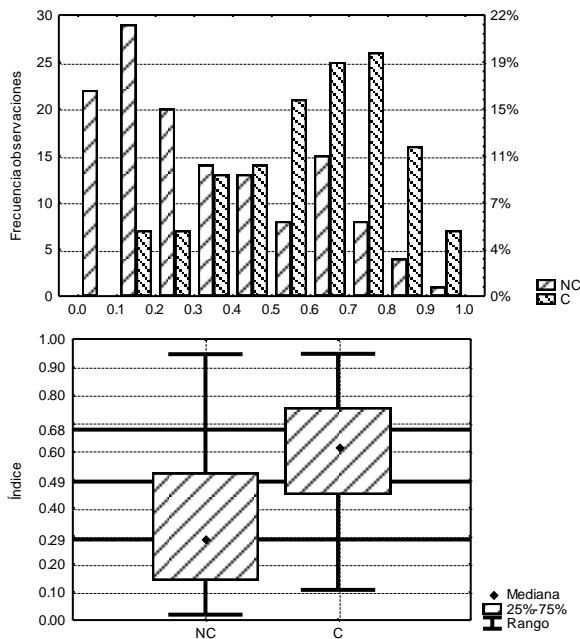


Figura 6: Panel superior) Histograma de frecuencias de los valores del índice de C-NC estimado a partir de la ecuación [7] para 270 observaciones tomadas de los períodos octubre-marzo de 2006-2007, 2007-2008 y 2008-2009, separados en 136 eventos en los que efectivamente se observó convección en la estación 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.

