

COMPARACIÓN DE ESTRUCTURAS VERTICALES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD ENTRE CONDICIONES NORMALES Y EVENTOS ZONDA PARA DISTINTAS LOCALIDADES DEL CONO SUR DE SUDAMÉRICA

Adrián Yuchechechén^{1,2,3}, Federico Norte⁴, Diego Araneo^{1,4}
aey@uca.edu.ar

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

²Unidad de Investigación y Desarrollo de las Ingenierías, Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina

³Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas e Ingeniería, Universidad Católica Argentina, Buenos Aires, Argentina

⁴Programa Regional de Meteorología, Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Centro Regional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Mendoza, Argentina

RESUMEN

El zonda es un fenómeno local de mesoescala característico de la región andina, asociado a perturbaciones de escala sinóptica (frentes), y frecuentemente vinculado con un calentamiento y un descenso brusco de la humedad en las capas bajas de la atmósfera a sotavento. Con el fin de estudiar la estructura vertical de la atmósfera en distintas localidades del cono sur de Sudamérica en presencia de eventos zonda en la región andina, se efectuó una composición perfiles de verticales de temperatura T , temperatura de rocío T_d , y de la diferencia $T - T_d$ en todos los niveles estándar entre 850 y 10 hPa para fechas en las que se ha registrado eventos zonda en el El Plumerillo (32°49'48''S, 68°46'48''O). Los perfiles obtenidos fueron comparados con la climatología de cada estación y las diferencias entre cada variable, por nivel, fueron testeadas estadísticamente. En general, puede observarse una modificación sustancial en las condiciones de humedad en varios niveles de la troposfera no solamente en la región de acción del zonda sino también en toda la región central de Argentina y a barlovento de la cordillera, en Chile. Los perfiles verticales analizados permiten establecer también un comportamiento diferenciado de la tropopausa en varias de las estaciones estudiadas.

ABSTRACT

The zonda wind is a mesoscale phenomenon characteristic of the Andean region associated to synoptic perturbations (fronts) and frequently tied to heating and a rapid reduction of humidity in the lower levels of the atmosphere in the lee of the orography. With the aim of studying the vertical structure of the atmosphere at different radiosonde stations in the southern tip of South America during zonda events in the Andean region, vertical profiles for temperature T , dewpoint T_d , and the difference $T - T_d$ were composed at all mandatory levels between 850 and 10 hPa for dates when the zonda was registered at El Plumerillo (32°49'48''S, 68°46'48''O). At each location, the profiles were compared with the long-term climatology ones and for each level the difference between them was tested statistically. In general, there is a substantial modification in humidity conditions at various levels of the troposphere not only in the region where the zonda is blowing but also to the east of it, in the central region of Argentina; such conditions are also seen west of the Andes in Chile. Furthermore, the vertical profiles show that the position of the tropopause for zonda events differs from the climatology ones at some of the stations analyzed.

Palabras clave: perfiles verticales, temperatura, temperatura de rocío, zonda.

1) INTRODUCCIÓN

Muchos fenómenos meteorológicos deben su presencia a la orografía, entre ellos cierto tipo de viento severo que desciende adiabáticamente, a sotavento de distintas cadenas montañosas del mundo. Algunos ejemplos son el *chinook* en la Montañas Rocosas de los Estados Unidos, el *Canterbury-nor'wester* en Nueva Zelanda y el *berg* en Sudáfrica. La diferente nomenclatura sólo hace referencia a cada región particular pues las características generales son similares en todos los casos. Genéricamente, a todos ellos se los denomina de tipo *foehn*, que es como se conoce en los Alpes; Lin (2007) discute algunas de las probables causas dinámicas que pueden dar lugar a este efecto. En la región subtropical de Sudamérica dicho viento es el *zonda*, y el fenómeno ha sido estudiado por Norte (1988). El modelado numérico sobre los Andes ha demostrado que el zonda es precedido por el pasaje de un frente frío (Seluchi et al., 2003). Para distintas estaciones de radiosondeo ubicadas en el sur de Sudamérica, el objetivo es analizar y comparar los perfiles verticales de temperatura T , temperatura de rocío T_d , y de la diferencia $T - T_d$ para eventos zonda registrados en una localidad cordillerana con los perfiles que resultan de la climatología y establecer si la presencia de zonda altera las condiciones de la atmósfera en distintos niveles estándar del grupo de estaciones estudiadas.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Sólo se considera la ocurrencia de zonda en el Aeropuerto El Plumerillo, Mendoza (32°49'48''S, 68°46'48''O). La base de datos incluye 136 eventos zonda entre 1980 y 2011. Los datos utilizados para generar los perfiles verticales de las variables deseadas provienen de radiosondeos lanzados desde estaciones aerológicas ubicadas en Argentina y Chile, obtenidos de la base de datos mundial de radiosondeos de la Universidad de Wyoming. Las estaciones se detallan en la Tabla I. Según normas internacionales de la Organización Meteorológica Mundial los radiosondeos deben lanzarse con cierta periodicidad horaria y una separación mínima de tres horas comenzando con las 00Z, que corresponde a la medianoche en el Meridiano de Greenwich. Una buena práctica es que cada punto de la red mundial realice observaciones a las 00Z y 12Z, aunque en muchos casos esto no se cumple, y en otros la densidad de datos es aún mayor (la estación 88889 es un ejemplo de ello). Para cada localidad de la Tabla I y para los niveles estándar de interés, se separó la información proveniente de distintas horas y se calcularon el valor medio y el desvío estándar de diferentes variables (temperatura y temperatura de rocío incluidas). Por mes, se calculó la anomalía de cada variable y si ella excedió en módulo al doble del desvío estándar el registro completo, que incluye a esta variable y a todas las otras que la acompañan, fue descartado y no se incluyó en la base de datos a utilizar.

Para cada estación de la Tabla I se efectuó la climatología de temperatura T , temperatura de rocío T_d y de la diferencia $T - T_d$, que da cuenta del contenido de humedad del aire, para los niveles estándar entre 850 y 10 hPa, ambos inclusive, sin distinción de meses. Se siguió el mismo procedimiento pero sólo para las fechas de evento zonda en SAME. Es importante destacar que la base de datos de ocurrencia de zonda incluye también la hora de comienzo y la hora de culminación. Este dato no fue tenido en cuenta para la selección de la información a utilizar en la climatología de eventos zonda para cada estación de la Tabla I, pues la misma fue calculada haciendo uso de toda la información disponible, es decir, incluyendo todas las horas de lanzamiento de los sondeos presentes para la fecha en la que se registró cada evento. Los resultados obtenidos no debieran verse afectados por esta práctica en virtud del gran espectro de horas de comienzo de cada evento, que a veces puede adelantarse al momento del lanzamiento de un sondeo y otras veces atrasarse. Vale la pena aclarar también que tal consideración tiene mayor validez para las estaciones ubicadas a menor distancia de

SAME.

Con el fin de efectuar una comparación para cada nivel estándar entre condiciones normales y de eventos zonda, se procedió a calcular el valor medio de cada una de las variables mencionadas. La diferencia entre dichos valores medios fue testada estadísticamente para determinar si ambas situaciones se corresponden con iguales o diferentes medias muestrales, esto es, si la presencia de un evento zonda altera o no de manera significativa el comportamiento del nivel correspondiente. En todos los casos el nivel de significancia se estableció en 95%.

Identificador OMM	Código OACI	Ubicación	Latitud	Longitud	Elevación (m)
85442	SCFA	Antofagasta	23°25'48"S	70°26'60"O	115
85543	SCER	Valparaíso (Quintero)	32°46'48"S	71°30'36"O	8
85586	SCSN	Valparaíso (Santo Domingo)	33°39'00"S	71°36'36"O	75
85799	SCTE	Puerto Montt	41°25'48"S	73°05'60"O	79
85934	SCCI	Punta Arenas	53°00'00"S	70°50'60"O	33
87047	SASA	Salta	24°51'00"S	65°28'48"O	1221
87155	SARE	Resistencia	27°27'00"S	59°02'60"O	52
87344	SACO	Córdoba	31°19'12"S	64°13'12"O	474
87418	SAME	Mendoza	32°49'48"S	68°46'48"O	704
87576	SAEZ	Ezeiza	34°48'36"S	58°31'48"O	20
87623	SAZR	Santa Rosa	36°33'36"S	64°15'36"O	191
87715	SAZN	Neuquén	38°57'00"S	68°07'48"O	271
87748	–	Bahía Blanca	38°43'48"S	62°10'12"O	75
87860	SAVC	Comodoro Rivadavia	45°46'48"S	67°30'00"O	46
88889	EGYP	Mount Pleasant	51°48'36"S	58°27'00"O	73

Tabla I - Estaciones utilizadas. Para las estaciones ubicadas en aeropuertos se incluye el código asignado por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI).

3) RESULTADOS

La Figura 2 muestra los perfiles obtenidos para T , T_d y $T - T_d$ en condiciones normales y para eventos zonda en las cinco estaciones chilenas analizadas. Para SCFA (Fig. 2 a), los perfiles medios de T son los característicos de una región de subsidencia –afectada por el anticiclón semipermanente del Pacífico Sur que se ubica al oeste de la costa–, con una menor disponibilidad de humedad en las capas inferiores de la troposfera. Esto se presenta en ambas situaciones, aunque el secamiento es mayor para eventos zonda. En apariencia, el perfil de T es muy similar en ambos casos, mientras que en condiciones normales T_d es mayor más cerca de la superficie. Estadísticamente se determinó que los valores medios de T obtenidos en cada caso difieren para los niveles ubicados entre 400 y 200 hPa (media y alta troposfera) y también para el rango 30-10 hPa, y son estadísticamente indistintos fuera de los niveles mencionados. Para T_d son significativamente distintos sólo entre 850 y 300 hPa, mientras $T - T_d$ lo es sólo entre 850 y 500 hPa. El comportamiento de SCER y SCSA (Figs. 2 b y c, respectivamente) no debería diferir en virtud de que ambas estaciones se ubican en la misma ciudad. En efecto, la base de datos del Integrated Global Radiosonde Archive (Durre et al., 2006), disponible en <http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/igra/igra-metadata.txt>, indica que SCER fue relocalizada en SCSA en el

año 1999. En ambas estaciones puede verse que existe un menor secamiento de la troposfera para situaciones zonda. Estadísticamente, en SCER los perfiles de T son distintos para todos los niveles analizados a excepción de 200, 70 y 10 hPa; lo mismo ocurre para T_d a excepción de 850, 70 y 20 hPa, y para $T - T_d$ entre 850 y 200 hPa. Si se analiza SCSN, para T no existe diferencia significativa entre eventos zonda y condiciones normales en 150, 50, 30 y 20 hPa, entre 70 y 20 hPa para T_d , y por encima de 200 hPa para $T - T_d$. De esta forma, se registra en Valparaíso una diferencia significativa en toda la troposfera cuando un evento zonda tiene lugar en la región. Las variables tienen un comportamiento similar al del par SCER/SCSN en la troposfera para SCTE (Fig. 2 d), con un menor secamiento de la troposfera para situaciones zonda. Los perfiles verticales de temperatura permiten determinar el límite entre la troposfera y la estratosfera, marcado por la tropopausa térmica, cuya definición radica en un cambio brusco del gradiente de T (WMO, 1992). A diferencia de los casos anteriores, en los que el perfil de T muestra que la tropopausa térmica para eventos zonda y no zonda se ubica en torno al mismo nivel —100 y 200 hPa en SCFA y SCER/SCSA respectivamente— la tropopausa en SCTE para eventos zonda parece ubicarse alrededor de los 300-250 hPa, por debajo de la posición que adopta en condiciones normales, 200 hPa (Fig. 2. d). Climatológicamente, la tropopausa simple en SCTE se ubica alrededor de los 200 (170) hPa para verano (invierno) (Yuchechen, 2009). La Figura 3 muestra el sondeo en SCTE correspondiente a una fecha de zonda en SAME, con la tropopausa ubicada en 242 hPa, unos 50 hPa por debajo del valor medio para invierno. Al comparar eventos zonda y no zonda en SCTE todos los niveles entre 850 y 70 hPa (a excepción de 250 hPa) difieren estadísticamente para T , y el resto de los niveles no difiere. Al considerar T_d y $T - T_d$, la diferencia es significativa entre ambos eventos entre 850 y 200 hPa, excluyendo 250 hPa. La Figura 2 d) muestra incluso la presencia de tropopausas múltiples, también consideradas en WMO (1992). Si se toma a la región ubicada entre las tropopausas más baja y más alta como la zona de transición entre la troposfera y la estratosfera, la Fig. 2 d) permite concluir que en dicha capa, en la cual tienen lugar una diversidad de fenómenos y puede ser tratada de manera análoga la región denominada “surf zone” por Mc Intyre y Palmer (1984), existe un calentamiento en situaciones zonda respecto de condiciones normales. De acuerdo a lo descrito, tal calentamiento es significativo, y el mismo puede ser de relevancia para la evolución de las perturbaciones en altura en el entorno de la estación considerada. La última localidad chilena por analizar corresponde a SCCI, la más austral de la Tabla I. Los perfiles mostrados (Fig. 2 e) indican que tanto T como T_d son más frías para eventos zonda, algo que puede estar asociado a las perturbaciones anticiclónicas que suceden al pasaje de los frentes. Los perfiles de T de condiciones normales difieren de las de zonda sólo entre 850 y 300 hPa, prácticamente toda la troposfera dada la latitud considerada, y para 30 y 20 hPa. Por otro lado, los perfiles de T_d entre 850 y 200 hPa, además del nivel de 10 hPa, son estadísticamente diferentes cuando se comparan situaciones zonda y no zonda. Asimismo, la diferencia $T - T_d$ parece a simple vista no diferir para la troposfera y la baja estratósfera. Esto efectivamente es así por cuanto, estadísticamente, tal variable es distinta para eventos zonda y no zonda sólo en 250, 200 y 20 hPa.

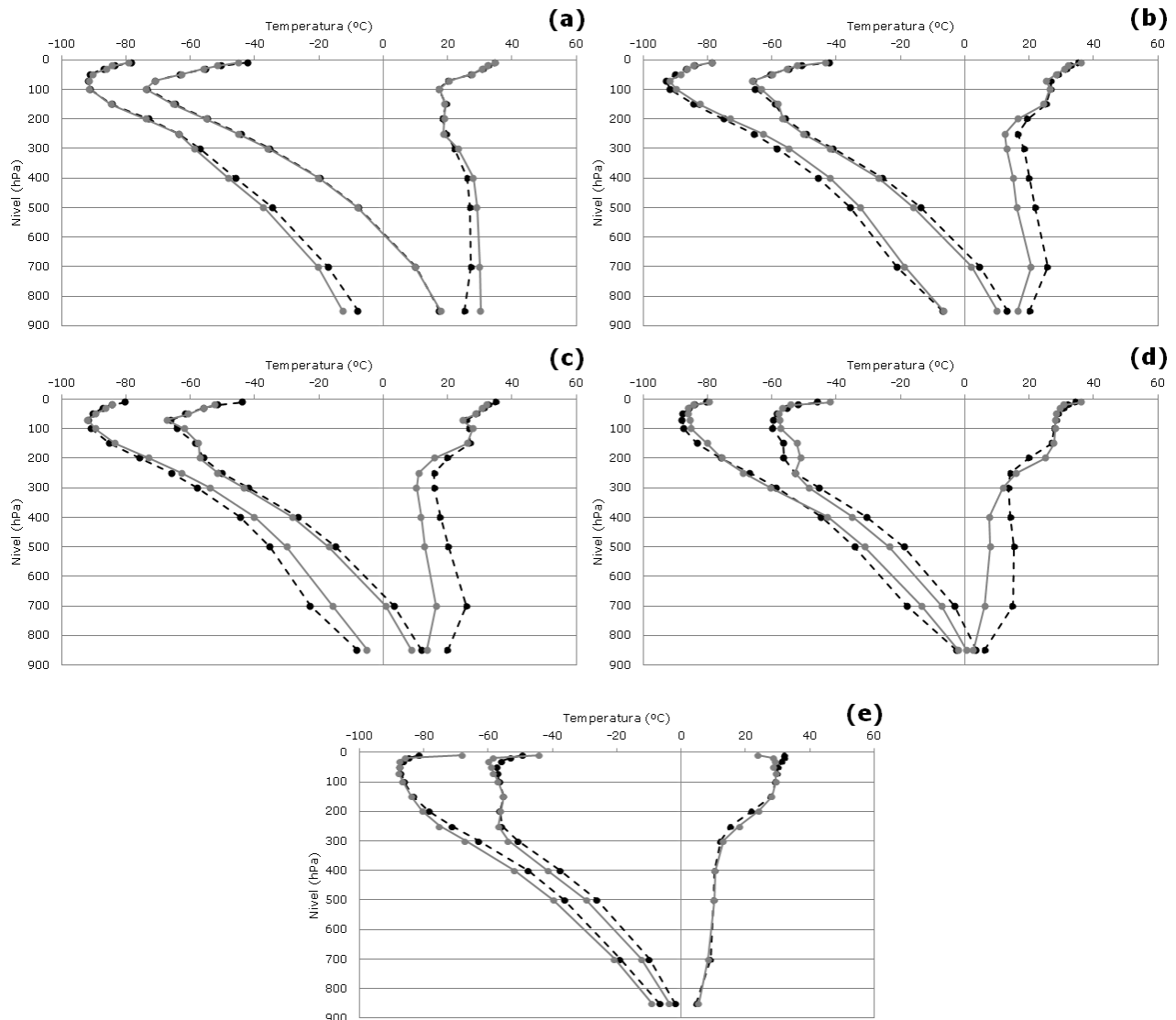


Figura 2 - Perfiles verticales de T , T_d y $T - T_d$ para situaciones normales (línea punteada negra) y eventos zonda (línea gris) en las estaciones de la Tabla I ubicadas al oeste de la cordillera: (a) 85442, (b) 85543, (c) 85586, (d) 85799 y (e) 85934.

La Figura 4 incluye los perfiles verticales obtenidos para las estaciones ubicadas al este de la cordillera. SASA (Fig. 4 a) muestra que T (T_d) se ubica por encima (debajo) de los valores correspondientes a condiciones normales entre la media y la baja troposfera, con una diferencia máxima de $T - T_d$ en 700 hPa. La falta de información de humedad no permite evaluar los resultados por encima de los 250 hPa, pero en este nivel $T - T_d$ para eventos zonda vuelve a incrementarse, adoptando el valor máximo del perfil, alrededor de 30°C. Desafortunadamente, la información disponible no permite establecer la significancia estadística de la diferencia entre eventos zonda y no zonda para este nivel, pero sí por debajo del mismo, entre 300 y 850 hPa: los resultados indican la diferencia estadística de ambos perfiles de $T - T_d$ sólo para los niveles de 700 y 500 hPa. Algo similar ocurre para T_d , mientras que para T la diferencia entre los perfiles es estadísticamente distinta para 700 hPa y entre 300 y 200 hPa.

En la Figura 4 b) puede verse para SARE un comportamiento similar al descrito para SASA, aunque la diferencia para $T - T_d$ entre ambos perfiles es menos marcada. A pesar de ello, los mismos son estadísticamente distintos entre 700 y 300 hPa; lo mismo ocurre para los perfiles de T_d . La falta de información de humedad por encima de los 200 hPa no permite extraer conclusiones para $T - T_d$ en la estratósfera. En cuanto a T los perfiles para eventos zonda y no zonda difieren estadísticamente en la baja estratósfera y la troposfera, entre 850 y 200 hPa (exceptuando 250 hPa). Para SACO y SAME (Figs. 4 c y d) los perfiles son muy similares a los mostrados en SASA, con un marcado secamiento en torno a los 700 hPa para eventos zonda en ambas estaciones. Es interesante mencionar que tal secamiento en SACO es incluso mayor que en SAME, que es la estación en donde el zonda ha sido registrado. Aún más interesante es el hecho de que para $T - T_d$ la diferencia entre ambos perfiles es significativa sólo para 850 y 700 en SAME, pero lo es para todos los niveles entre 850 y 300 hPa en SACO, lo cual permite establecer la influencia espacial del fenómeno analizado, que en este caso alcanza a perturbar casi toda la troposfera de una estación ubicada a 600 kilómetros al noreste de donde el mismo ha sido registrado. La diferencia estadística entre perfiles de temperatura para SACO y SAME es variable con la altura. Para abreviar, sólo se mencionará la significancia en los niveles de 850 y 700 hPa para ambas localidades. En cuanto a T_d , existe significancia en la diferencia de perfiles para los mismos niveles en SAME, y entre 700 y 300 hPa para SACO.

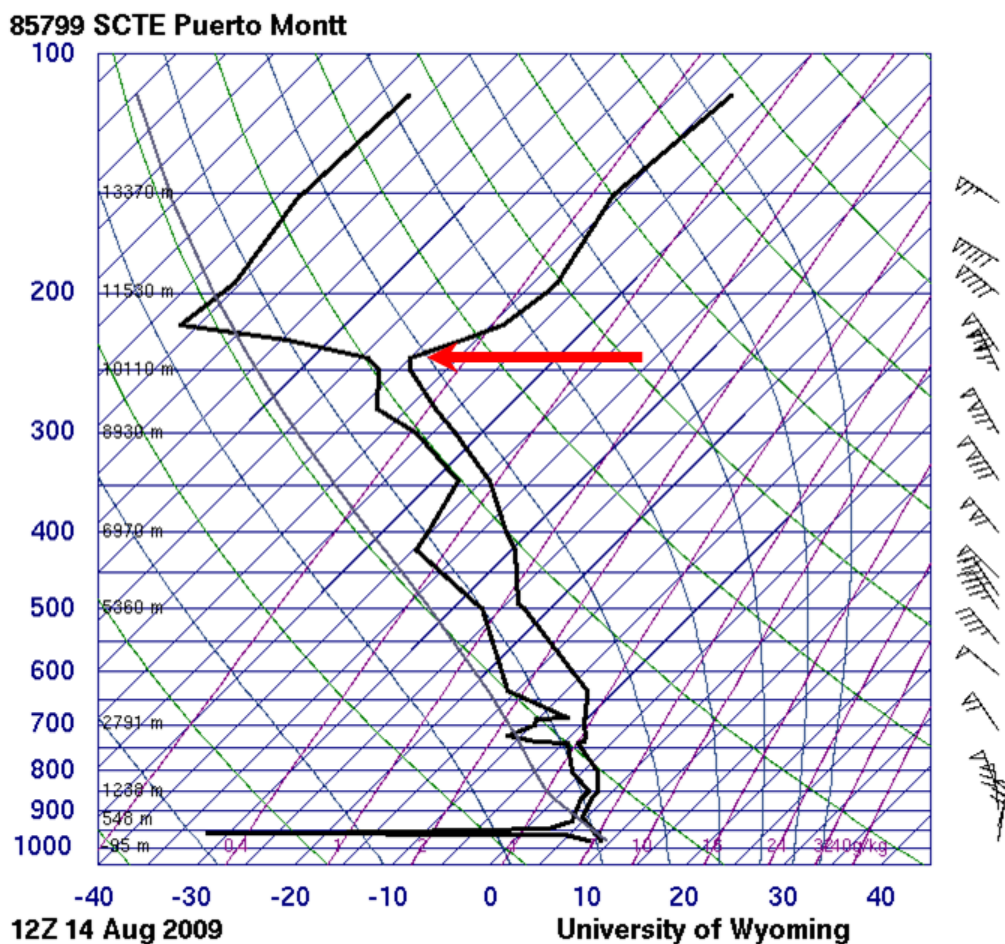


Figura 3 – Sondeo para el 14 de agosto de 2009 12Z en SCTE. El sondeo presenta tropopausa simple; la flecha marca su posición en 242 hPa. Este día el zonda en SAME se inició cuatro horas más tarde.

Para SAEZ (Fig. 4 e) lo más sobresaliente es el ligero secamiento por debajo (encima) de 500 hPa para eventos zonda en los perfiles de $T - T_d$; sólo se hará mención de la significancia estadística en todos los niveles analizados excepto 500, 400, 70 y 50 hPa para la diferencia de perfiles de temperatura, y en 850, 400 y el rango 250-150 hPa para $T - T_d$. Asimismo, los perfiles de temperatura muestran la presencia de tropopausas múltiples y la ubicación de la tropopausa más baja parece no modificarse en eventos zonda respecto de condiciones normales, en torno a los 200 hPa. La diferencia de perfiles de $T - T_d$ entre condiciones normales y zonda para SAZR (Fig. 4 f) muestran una atmósfera menos seca entre 700 y 250 hPa para zonda, pero la misma es significativa sólo entre 500 y 300 hPa; entre 850 y 400 hPa, los perfiles de T_d también difieren en forma significativa. Respecto de la tropopausa, el comportamiento es similar al mencionado para SAEZ, pues los perfiles permiten visualizar la presencia de tropopausas múltiples pero no parece haber modificación alguna en la posición de la tropopausa más baja para eventos zonda.

Nuevamente se puede visualizar la presencia de tropopausas múltiples en los perfiles de temperatura de SAZN (Fig. 4 g), y en este caso la tropopausa más baja durante eventos zonda parece ubicarse debajo de la contraparte de condiciones normales, lo cual se encuentra de acuerdo con el hecho de que los perfiles de T difieren estadísticamente entre 200 y 70 hPa. En contraste, los perfiles de $T - T_d$ son indiferentes para todos los niveles analizados. La Figura 4 h), correspondiente a Bahía Blanca, muestra para $T - T_d$ algo similar a lo discutido para SAZN en cuanto a un menor secamiento de la troposfera para eventos zonda, aunque sólo 500 y 400 hPa muestran una diferencia significativa. Si se asocia la activación del zonda con una perturbación frontal, dicho comportamiento puede estar vinculado a la dirección de avance de tal perturbación. En la región, existen tres direcciones de avance de los frentes fríos: sudoeste-noreste (la más común), sur-norte, y oeste-este, asociada con irrupciones de aire polar que pueden alcanzar muy bajas latitudes (Marengo et al., 1997); una típica situación de avance del frente en la dirección sudoeste-noreste se analiza en Seluchi et al. (2006). De acuerdo a los resultados obtenidos aquí, la dirección mayormente vinculada con la presencia de zonda en SAME parece ser la sudoeste-noreste, pues una troposfera más húmeda como las mostrada en las Figs. 4 f) y h) para eventos zonda podrían indicar actividad frontal en el sur de la provincia de Buenos Aires y la provincia de La Pampa cuando el frente aún no ha alcanzado las latitudes de SAME. Sin embargo, si esta es una explicación factible queda por determinar la razón por la cual, de acuerdo a lo observado, SAZN no presenta una troposfera más seca y la tropopausa más elevada como consecuencia de la perturbación post-frontal.

Las dobles tropopausas siguen presentes en los perfiles de SAVC y EGYD (Figs. 4 i y j). Para SAVC, la tropopausa se encuentra más baja ($\approx 250-300$ hPa) para eventos zonda. Por debajo de los 300 hPa puede verse una troposfera más húmeda que en condiciones normales y, de hecho, las diferencias entre los perfiles de $T - T_d$ son significativas entre 850 y 400 hPa. En referencia a T , la diferencia para eventos zonda y no zonda es estadísticamente distinta para todos los niveles excepto 250, 70, 50 y 10 hPa; lo contrario ocurre para T_d , para la cual la diferencia es indiferente en la mayoría de los niveles. Finalmente en EGYD, en concordancia con una vaguada o un centro de baja presión intensificados, la atmósfera se encuentra más fría y más húmeda para eventos zonda. Para T , a excepción de 10 hPa todos los niveles difieren estadísticamente de las condiciones normales. El comportamiento es variado para T_d , y la diferencia entre perfiles de $T - T_d$ es significativa para 500 y entre 200 y 20 hPa.

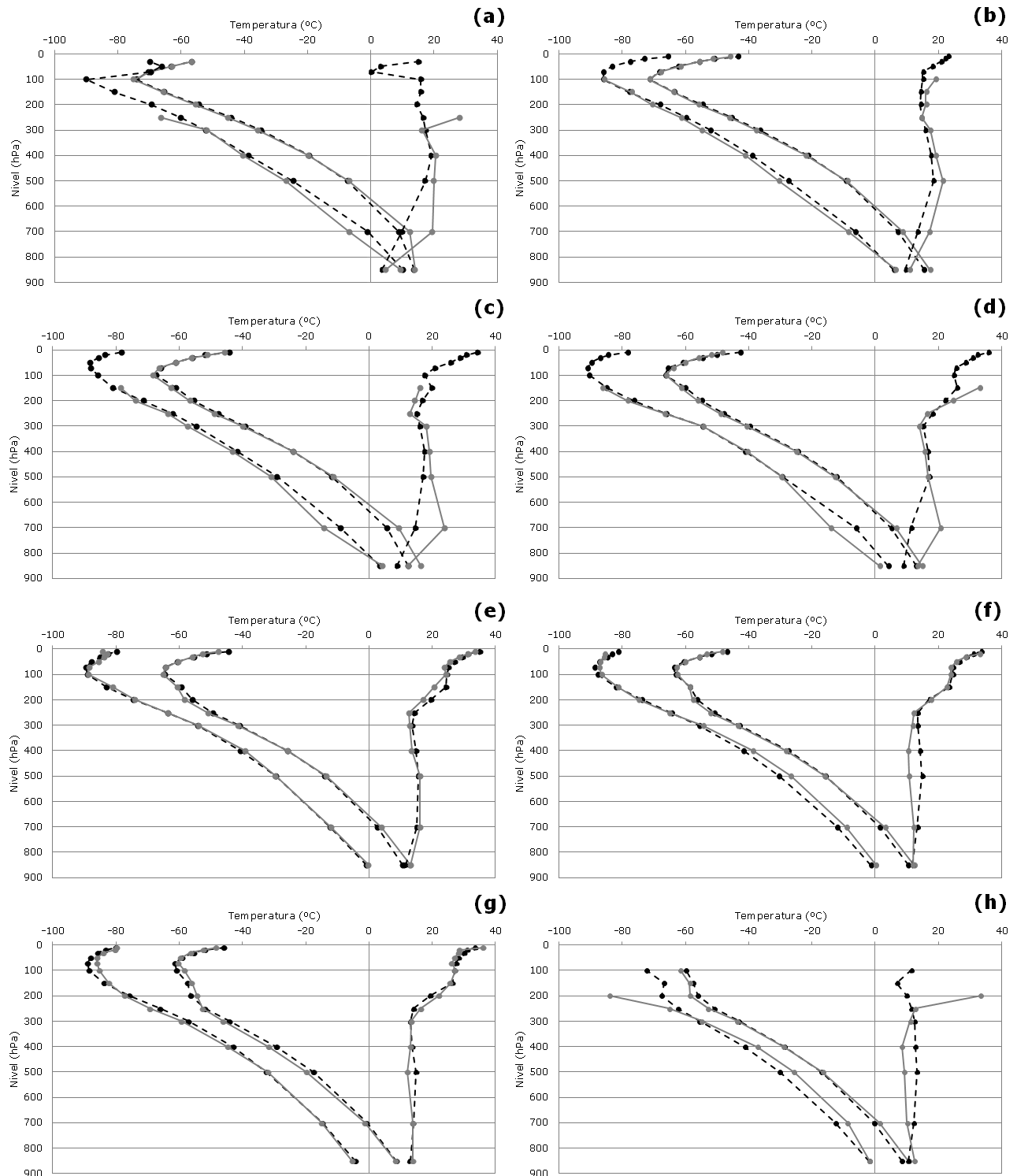


Figura 4 - Ídem Fig. 2 para las estaciones de la Tabla I ubicadas al este de la cordillera: (a) 87047, (b) 87155, (c) 87344, (d) 87418, (e) 87576, (f) 87623, (g) 87715, (h) 87748, (i) 87860 y (j) 88889.

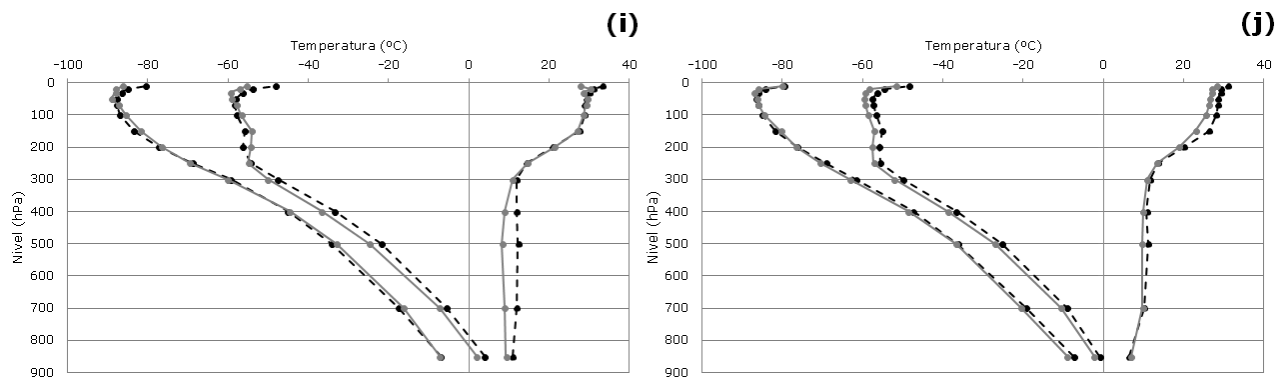


Figura 4 - (continuación)

4) CONCLUSIONES

Perfiles verticales de temperatura T , temperatura de rocío T_d y de la diferencia $T - T_d$, que da cuenta del contenido de humedad, han sido obtenidos en distintas estaciones de radiosondeo del sur de Sudamérica efectuando composiciones para fechas eventos zonda registrados en SAME y para condiciones normales. Los perfiles de cada variable se compararon entre sí para situaciones zonda y no zonda con el objetivo de establecer si la presencia del fenómeno en SAME, que altera las condiciones de las variables mencionadas en los niveles de la baja troposfera, modifica respecto de su climatología las características de los niveles estándar de la troposfera y la estratósfera en las estaciones restantes. De manera general, se ha encontrado que la presencia del zonda en SAME altera las condiciones de una o más de las variables en la baja troposfera de las estaciones de la región central de Argentina y Chile, pero también se registran diferencias significativas en uno o varios niveles en estaciones ubicadas fuera de la banda de latitudes mencionada. Los perfiles verticales obtenidos permiten también establecer la presencia de tropopausas múltiples en varias de las estaciones analizadas y en ciertos casos, como en SCTE, una tropopausa más baja en presencia de zonda. Muchos de los resultados encontrados están de acuerdo con el pasaje de frentes sobre la región, pero existen diferencias que no pueden justificarse y se requiere de mayor investigación y el uso de metodología alternativa para poder explicarlos.

AGRADECIMIENTOS: Los autores agradecen a Julio Cristaldo por haber compilado las fechas de ocurrencia de zonda en SAME. El trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto CONICET PIP 2012/4 N° 0075.

REFERENCIAS

- Durre, I., Vose R. S., y Wuertz D. B., 2006:** An Overview of the Integrated Global Radiosonde Archive. *Journal of Climate*, 19, 53-68
- Lin, Y.-L., 2007:** Orographically forced flows. *Mesoscale Dynamics*, Cambridge University Press, 109-183
- Marengo, J., Cornejo A., Satyamurty P., Nobre C., y Sea W., 1997:** Cold Surges in Tropical and Extratropical South America: The Strong Event in June 1994. *Monthly Weather Review*, 125, 2759-2786.

McIntyre, M. E., y Palmer T. N., 1984: The 'surf zone' in the stratosphere. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 46, 825-849.

Norte, F. A., 1988: Características del viento zonda en la región de Cuyo. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

Seluchi, M. E., Garreaud R. D., Norte F. A., y Saulo A. C., 2006: Influence of the Subtropical Andes on Baroclinic Disturbances, A Cold Front Case Study. *Monthly Weather Review*, 134, 3317-3335.

Seluchi, M. E., Norte F. A., Satyamurty P., y Chou S. C., 2003: Analysis of Three Situations of the Foehn effect over the Andes (Zonda Wind) Using the Eta-CPTEC Regional Model. *Weather and Forecasting*, 18, 481-501.

World Meteorological Organization (WMO), 1992: International Meteorological Vocabulary – No. 182. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

Yuchechen, A. E., 2009: La tropopausa térmica en el Sudamérica: climatología, variabilidad, y relaciones con la troposfera media y la baja estratósfera. Tesis doctoral, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 311 pp.