

## UN INDICE DIARIO DEL POTENCIAL METEOROLOGICO DE CONTAMINACION ATMOSFERICA PARA SANTIAGO A PARTIR DE PERFILES VERTICALES DE VIENTO

**José Rutllant C.**

Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.  
Casilla 2777, Santiago, Chile.

### RESUMEN

Habiéndose establecido la relevancia de las depresiones costeras de núcleo cálido en el potencial meteorológico de contaminación atmosférica de Santiago, se hace necesario definir índices objetivos que cuantifiquen la intensidad del fenómeno.

El comportamiento de la inversión térmica en los primeros 1000 m de atmósfera sobre Quintero ha mostrado su efectividad en la representación general del fenómeno. Sin embargo, la necesidad de determinaciones rutinarias del factor de ventilación en Santiago y el alto costo de los métodos directos para medir la profundidad de la capa mezclada, han conducido a la prueba de técnicas indirectas de costo menor.

En este trabajo se analiza la efectividad del globo piloto en la determinación del factor de ventilación en Santiago, durante la ocurrencia de las depresiones señaladas. Se concluye que el primer mínimo en la velocidad del viento a partir de la superficie, en el seno de una capa en que la dirección cambia del cuadrante W al E, indica razonablemente bien el tope de la capa de mezcla en las primeras horas de la tarde, que interviene como límite en la integración vertical de la velocidad del viento para la estimación del factor de ventilación urbano máximo.

### ABSTRACT

A daily index for the air pollution potential in Santiago (Chile) based on pibal observations

The relevance of the warm core coastal lows in the air pollution potential of Santiago being established, it becomes necessary to define objective indices to quantify the intensity of the phenomenon.

The behavior of the thermal inversion in the lowest 1000 m at Quintero has proven effective in the general representation of the phenomenon. However, the need for routine estimates of the ventilation factor in Santiago and the high cost of direct measurements of the mixing depth, have lead to the test of indirect, lower cost methods.

The effectivity of pibal techniques in the determination of the ventilation factor in Santiago during the occurrence of the aforementioned lows is analyzed here. It is concluded that the first wind speed minimum above the surface within a layer in which the wind direction quadrant changes from W to E, provides a reasonable good indication of the top of the afternoon mixing depth, which is used as an upper limit in the vertical integration of the windspeed in the maximum urban ventilation factor estimates.

### 1. INTRODUCCION

Una caracterización preliminar de las condiciones meteorológicas asociadas a la ocurrencia de depresiones costeras de núcleo cálido, no asociadas al frente polar, en la zona central de Chile y su incidencia en algunos episodios de contaminación atmosférica en Santiago ha sido presentada anteriormente (Rutllant 1973, 1981).

Del análisis de la presencia de inversiones térmicas superficiales intensas en Quintero, que aparecen asociadas a la ocurrencia de las depresiones mencionadas, se ha concluido (Rutllant y Salinas 1982a, 1982b) que en la mayoría de los casos estas inversiones coexisten con anomalías negativas de la presión atmosférica en superficie y de la componente zonal del viento en 850 mb. La ocurrencia simultánea de anomalías positivas en la temperatura de 850 mb y en el espesor 1000-850 mb sugiere que el fuerte calentamiento de la tropósfera baja está en general asociado a advecciones cálidas producidas por vientos con componentes del E que subsiden por la ladera andina. Este fenómeno sería inducido en parte por la convergencia superficial inherente a la depresión, pudiendo además estar asociado a un efecto Foehn con flujo del E sobre la cordillera o a "vientos de barrera" (Rutllant 1983b).

Paralelamente a la necesidad de un estudio detallado de casos específicos para intentar dilucidar la importancia relativa de diferentes mecanismos forzantes que podrían generar los fenómenos descritos, surge el interés práctico de estudiar cuantitativamente la forma en que las inversiones térmicas observadas diariamente en la estación de radiosonda de Quintero, durante la ocurrencia de estas depresiones, repercuten en Santiago.

En general, la altura de la base de la inversión térmica que limita la capa de mezcla se determina mediante perfiles verticales de temperatura que se pueden obtener a través de radiosondas, aviones, radares acústicos u ópticos. Cualquiera de estos métodos requiere de inversiones considerables y altos costos de operación. No estando disponible ninguna de estas técnicas sobre una base rutinaria en nuestra capital, por una parte, y pensando que si se quiere definir un índice del potencial meteorológico de contaminación atmosférica urbana asociado al factor de ventilación, es necesario establecer, además de la profundidad de la capa de mezcla, el flujo horizontal medio a través de ella; se expone a continuación un método de cálculo del factor de ventilación basado sólo en un perfil vertical de vientos en la tropósfera baja, adaptando técnicas convencionales de seguimiento óptico de globos piloto.

Mediante el análisis de situaciones meteorológicas con bajas costeras, en que se contó en forma casi simultánea con radiosondeo y perfiles de viento en Santiago, se puede concluir que el método parece adecuado a los requerimientos planteados, pudiendo al menos obtenerse un factor de ventilación representativo del período de máximo calentamiento superficial diurno por insolación. Debido a que en este período ocurren además las mayores velocidades superficiales de viento, tendremos una estimación del factor de ventilación máximo diario.

## 2. INDICE DEL POTENCIAL DE CONTAMINACION ATMOSFERICA

Con el objeto de caracterizar meteorológicamente el poder dispersante de la atmósfera urbana bajo los efectos de la inversión térmica cerca de la superficie, en condiciones estacionarias, se puede utilizar el factor de ventilación FV (Rutllant y Salinas, 1982a):

$$FV = H * U$$

en que H es la altura de la capa superficial mezclada y U la velocidad media del viento en su interior (Figura 1).

En este modelo de comportamiento de la atmósfera urbana se supone que el viento tiene una dirección constante con la altura, condición que se acerca más a la realidad mientras menor sea H y más enérgica la turbulencia en la capa de mezcla.

En estas condiciones:

$$FV = H * 1/H \int_0^H u \, dz = \int_0^H u \, dz$$

quedando H incorporado sólo como límite de integración.

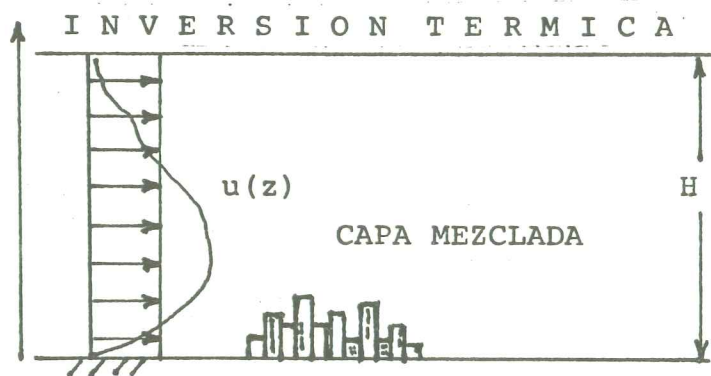


Fig. 1 Elementos del factor de ventilación

Debido a que el Índice del Potencial de Contaminación Atmosférica (IPCA) debe compararse con índices de concentración de contaminantes, resulta conveniente expresarlo de modo que su valor aumente a medida que el FV disminuye; por ejemplo a través de la expresión:

$$\text{IPCA} = c/\text{FV} * 1000 [\text{s}/\text{m}^2]$$

en que "c" es una constante que debe permitir, al menos en una primera etapa, categorizar los IPCA en niveles tales como:

$$\begin{aligned} 0 < \text{IPCA} < 10 &= \text{Bajo} \\ 10 < \text{IPCA} < 20 &= \text{Medio} \\ 20 < \text{IPCA} < 30 &= \text{Alto} \\ \text{IPCA} > 30 &= \text{Muy Alto} \end{aligned}$$

### 3. RELACION GENERAL ENTRE PERFILES VERTICALES DE VIENTO E INVERSIONES TERMICAS

La relación entre el perfil vertical de vientos y la altura de la base de la inversión de temperatura deriva del desacoplamiento dinámico que se produce entre las capas adyacentes a la discontinuidad térmica, producido por una resistencia al intercambio turbulento vertical de masa, calor y cantidad de movimiento (extrema estabilidad atmosférica). Así, entre la capa superficial mezclada y la atmósfera que está por encima de la base de la inversión es previsible que se produzca una desconexión que se puede traducir en un mínimo de la velocidad del viento y un fuerte cizalle vertical, esperándose que ambas manifestaciones se den con un grado de definición proporcional a la intensidad de la inversión de temperatura.

Un estudio de las inversiones térmicas a partir de 400 observaciones en la Bahía de San Francisco, California (Miller, 1968) indica la presencia de un mínimo de velocidad cerca de la base de la inversión (Figura 2) que parece bien definido en algunas ocasiones, extendiéndose en otras como una zona difusa entre la base y 200 a 300 m sobre ella. Sobre este mínimo la velocidad aumenta rápidamente con la altura dando a veces un máximo de velocidad con apariencia de chorro en la mitad superior de la capa con inversión térmica. La Figura 3 muestra la velocidad resultante, dirección y temperatura media para febrero de 1964 en Antofagasta y Quintero a las 12 horas GMT según el mismo autor, observándose esencialmente los mismos rasgos ya señalados.

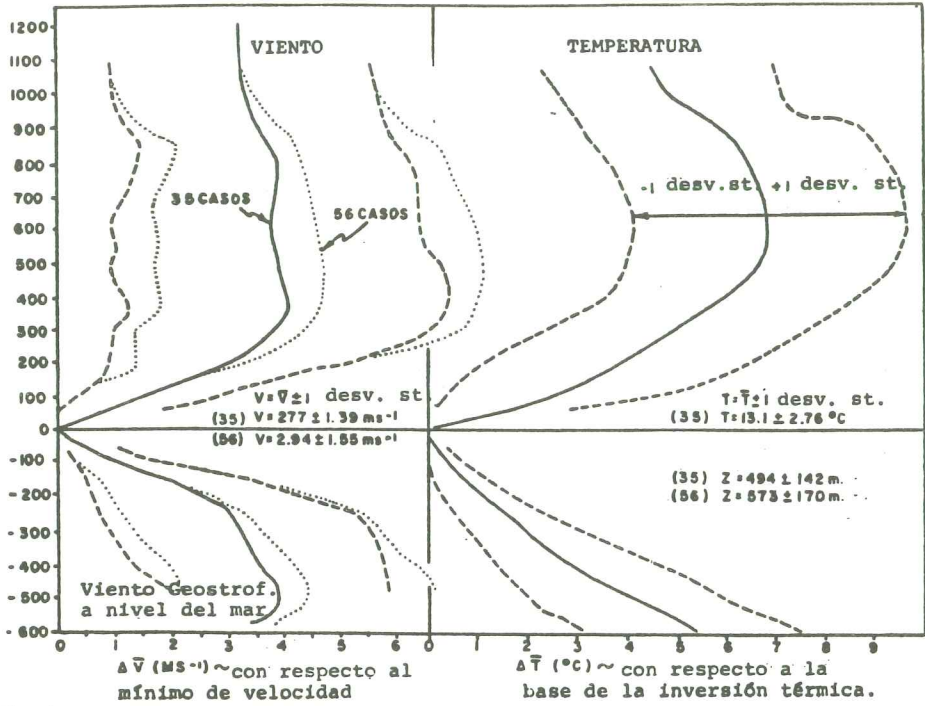


Fig. 2 Relaci\u00f3n entre los perfiles de temperatura y viento en la Bah\u00eda de San Francisco (California, U.S.A.). Adaptado de Miller (1968).

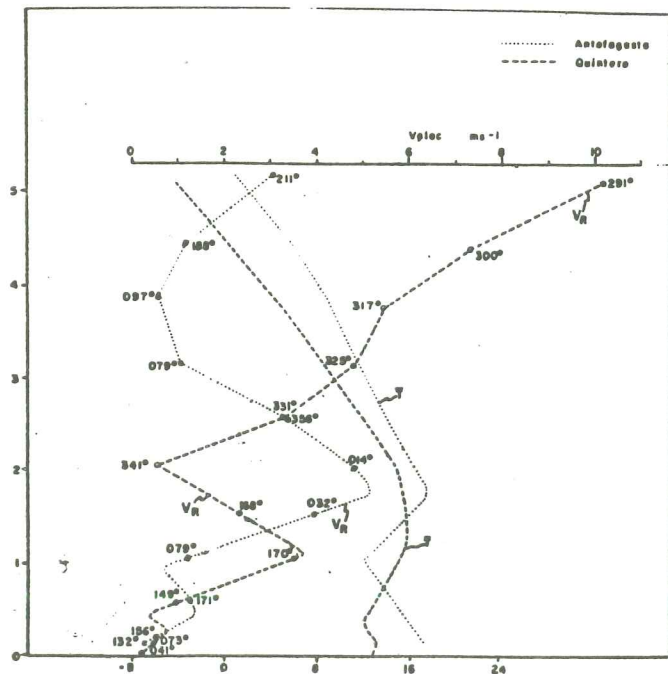


Fig. 3 Perfiles de velocidad del viento ( $V_R$ ) y temperatura ( $T$ ) para Antofagasta y Quintero a las 12 Z durante febrero de 1964. Adaptado de Miller (1968).

Establecidos estos hechos generales, quedaría por investigarse si las relaciones estadísticas entre el nivel del mínimo de velocidad en el perfil de vientos y la altura de la base de la inversión térmica en zonas costeras es válida en situaciones individuales en el área metropolitana de Santiago.

#### 4. CAMPOS DE VIENTO Y TEMPERATURA OBSERVADOS EN EL AREA METROPOLITANA DE SANTIAGO, ASOCIADOS A BAJOS FACTORES DE VENTILACION

Analizaremos algunos campos de viento y temperatura obtenidos en diferentes campañas de medición en Santiago, destacando los rasgos más relevantes en relación a la posición de la capa con inversión térmica durante los días en que se hizo presente una depresión costera de núcleo cálido.

La Figura 4 muestra el campo medio de la dirección del viento por cuadrantes obtenido en el Campamento Antumapu de la Universidad de Chile al S de Santiago. El promedio se extiende a un período de 13 días de la segunda quincena de agosto de 1971.

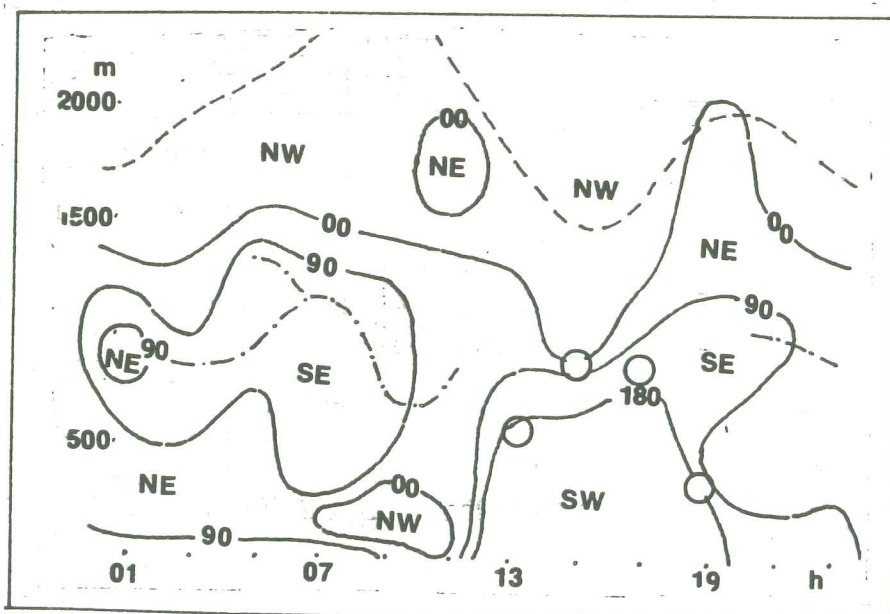


Fig. 4 Dirección media del viento por cuadrantes en Santiago. (Antumapu, 17-30 agosto 1971; adaptado de Rutllant, 1973).

- · — · — Posición media del chorro del E
- ○ ○ Primer mínimo en la velocidad del viento
- - - - Isotaca 4 m/s en flujo del NW

En primer lugar, se puede advertir el desarrollo de la capa superficial de vientos del cuadrante SW entre las 11 y 19 horas, coincidiendo aproximadamente con la capa mezclada que se extiende bajo la inversión térmica (Rutllant, 1973).

A través de esta inversión se observa una transición en la dirección del viento desde el cuadrante SW al NW, pasando por SE.

Los círculos indican la posición del primer mínimo en la velocidad del viento. La línea de puntos y segmentos muestra una zona en que el flujo del E tiene una apariencia de chorro, coincidiendo aproximadamente con el tope de la inversión térmica.

La presencia de vientos del NW con velocidad creciente a partir de los 2000 m de altura y el flujo con componente del E al pie de esta capa son consistentes con un modelo de vientos de barrera (Rutllant, 1983b). La línea segmentada muestra la posición de la isotaca 4 m/s.

La situación individual del 25 de agosto, en que culminó el desarrollo de una depresión costera, se ilustra en la Figura 5. En ella se observa que la base de la inversión térmica "B" puede asociarse con el primer mínimo en la velocidad del viento (círculo) siempre que éste se ubique en la proximidad del primer cambio significativo en la dirección. La magnitud de este cambio se expresa en grados sexagesimales con una barra entre los niveles que muestran la máxima diferencia direccional.

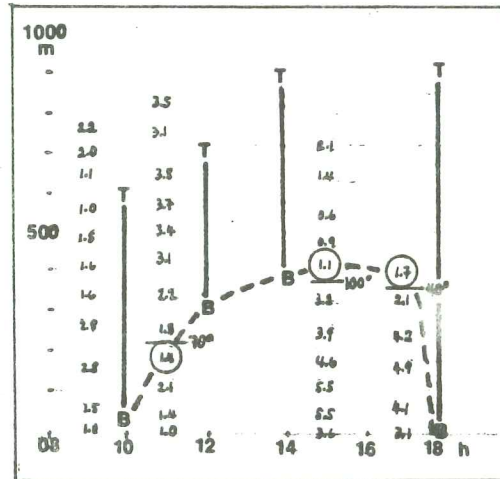


Fig. 5 Magnitud de la velocidad del viento, en relación a la base de la inversión térmica (B). Mínimo significativo (círculo) y cambio dirección (segmento) para 25 de agosto de 1971. Tope inversión (T).

En lo relativo a la variación temporal en la posición de la capa con inversión térmica, es necesario destacar que la base de ésta presenta una evolución diaria de carácter radiativo, con un descenso hasta la superficie durante el régimen nocturno y una creciente elevación debida a la mezcla convectiva durante el período diurno, culminando después de mediodía.

Diferente es el comportamiento del tope de esta inversión o de la inversión nocturna elevada, que se puede asociar al calentamiento advectivo producido por el flujo subsidente del E. La Figura 6 ilustra la variación temporal de la temperatura a 650 m sobre la superficie en el período comprendido entre el 23 y 25 de agosto, en que se profundiza la depresión costera. Durante los días 23 y 24 se observó velocidades superiores a 5 m/s con una dirección E a alturas comprendidas entre 700 y 1200 m sobre la superficie. En particular, durante la madrugada del 24 se produjo un aumento de 7°C asociado a vientos de dirección 90 y 110 grados con velocidades de 9 y 10 m/s a 750 m de altura.

La influencia del flujo subsidente del E en la formación de una inversión térmica elevada aparece aún más claramente configurada durante las mediciones efectuadas en agosto de 1972. La Figura 7 presenta la marcha de la posición de las inversiones térmicas entre los días 29 y 30 de agosto, indicándose los rasgos del campo de vientos ya comentados en relación a la posición de la base y el tope de las inversiones térmicas elevadas.

Así, junto al primer mínimo en la velocidad del viento (círculo) y la capa con mayor cambio direccional (segmento) se indica la posición de la velocidad máxima del flujo del E, anotándose la velocidad y dirección asociada dentro de un rectángulo.

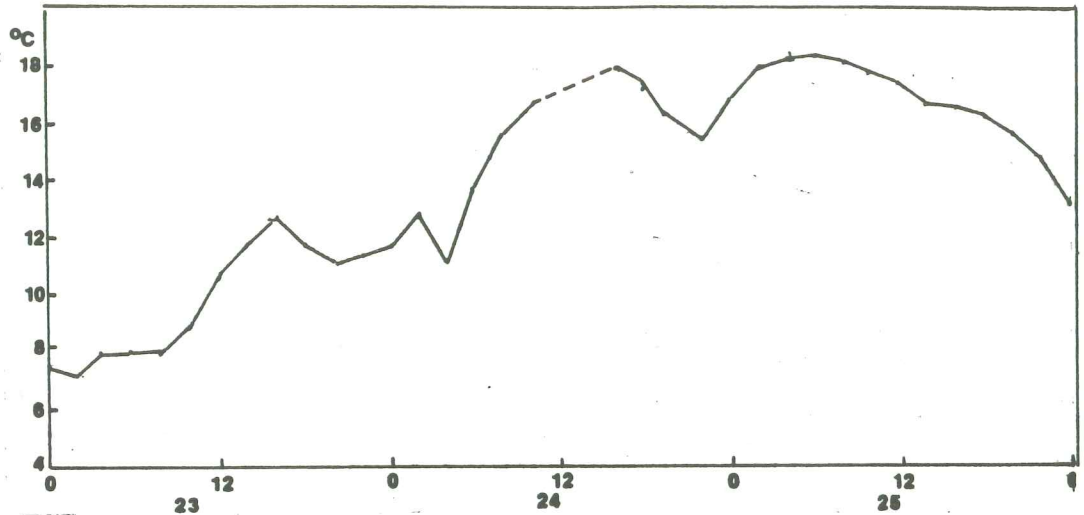


Fig. 6 Marcha bihoraria de la temperatura a 650 m sobre Santiago entre el 23 y 25 de agosto de 1971.

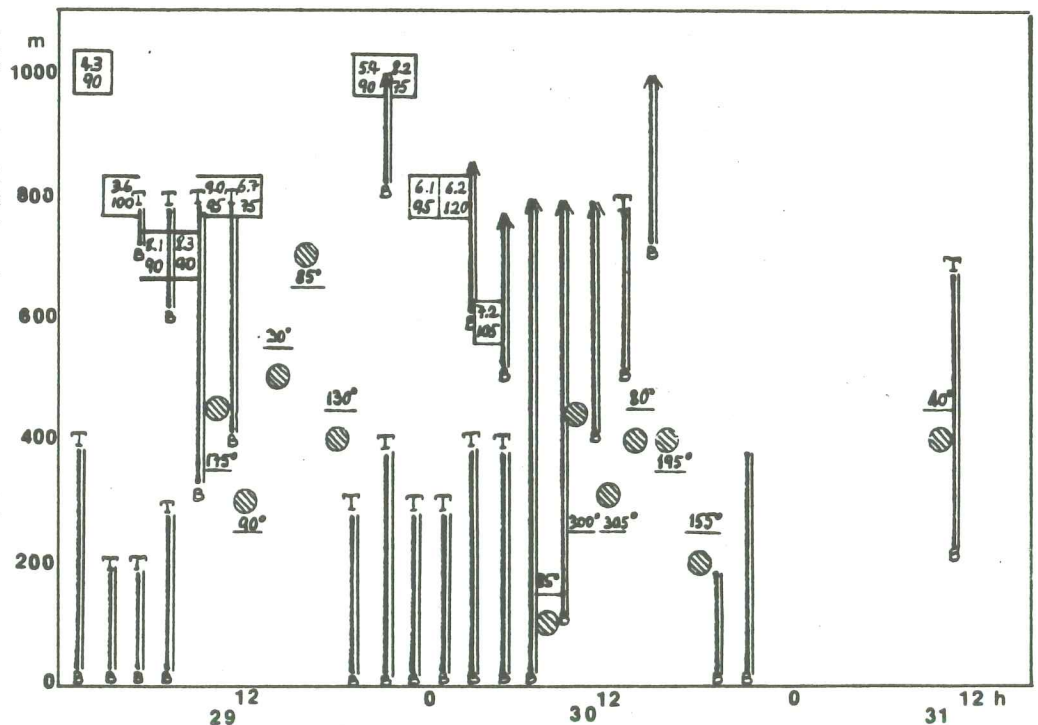


Fig. 7 Posición de las inversiones térmicas (B = base; T = tope) para Santiago (Campus Antumapu U. Ch.) entre el 29 y 31 de agosto de 1972. En recuadros la velocidad (m/s) y dirección en grados del flujo máx. del E. Se indica además el primer mín. en la velocidad del viento desde la superficie (círculo) y cambios en la dirección (segmento, sobre el cual se indica la diferencia angular).

Además de la clara asociación entre el máximo flujo del E y la formación de la inversión térmica elevada durante la noche, se observa un descenso en el nivel del chorro del E, produciéndose cerca del amanecer una fusión de la inversión radiativa superficial con la inversión elevada.

La relación entre la altura de la base de la inversión térmica durante el período diurno y el primer mínimo en la velocidad del viento, en combinación con un máximo cambio en la dirección, parece satisfactoria, tomando en cuenta que se trabaja con una resolución vertical de 100 m y que no se considera otras capas estables que no sean inversiones térmicas.

Las condiciones meteorológicas dominantes durante las mediciones de mayo de 1975 fueron de bloqueo, con leves variaciones interdiarias entre los días 11 y 21 de ese mes. La Figura 8 presenta los perfiles verticales medios de temperatura y viento entre los días 13 y 26, período en el que se desarrollaron las mediciones.

Si bien los efectos del flujo del E en el seno de la capa con inversión térmica no son tan marcados como en los casos que acabamos de analizar por la acción de suavizamiento de los promedios y por la menor intensidad del fenómeno en relación a la ocurrencia de depresiones costeras individuales (Rutllant, 1983a), puede observarse la correspondencia entre el comienzo de una capa estable y los mínimos de velocidad del viento en el período diurno comprendido entre las 10 y las 18 horas. El cambio de dirección, al igual que en los casos anteriores, contribuye a precisar el nivel del mínimo de velocidad relevante.

En términos de días individuales se analiza lo ocurrido el 21 de mayo, un día después que se intensificó una vaguada de núcleo cálido con eje del NNE, bajo una dorsal en 500 mb abarcando el norte y centro de Chile.

La Figura 9 muestra los perfiles de temperatura, dirección y velocidad del viento, individualizándose durante el período diurno la posición de los indicadores de la altura de la base de la inversión térmica y las máximas velocidades del E. En primer lugar, es posible observar una inversión nocturna superficial de unos 600 a 1000 m de profundidad. En las primeras horas de la madrugada el tope de esta capa puede asociarse a un flujo con componente del E. Sin embargo, a medida que transcurre la madrugada y se entra en la mañana la dirección del viento se muestra oscilante, con intermitencias del E y W. Esta situación también se advierte en los días precedentes, probablemente como un rasgo local del bloqueo atmosférico.

A las 17 horas se observan dos delgadas capas de inversión con los indicadores del campo de vientos señalando una posición intermedia entre ambas, una hora antes y una hora después del radiosondeo.

Para los efectos de la asociación entre el flujo de aire en la tropósfera media modificado por la Cordillera de los Andes y los vientos con componente del E, la Figura 10 nos muestra la distribución del campo de vientos en un corte W - E según fue observado el 15 de abril de 1980 (Rutllant, 1983b). Al respecto, hay que destacar que en el caso que nos ocupa el chorro del NNW se mantuvo muy estable entre el 17 y el 21 de mayo, a unos 2700 m sobre la superficie. La máxima velocidad fue alcanzada el día 19 en la madrugada, en que se superaron los 20 m/s.

La campaña de mediciones de 1976 se realizó en el mes de noviembre. La estructura de los campos medios de viento y temperatura se analizó y comparó con las situaciones de invierno en Ulriksen y Rutllant, (1977). En general, la base de las inversiones térmicas o comienzo de capas estables elevadas parecen ubicarse a unos 1400 m sobre la superficie a las 15 horas y a unos 1000 m a las 13, 17, 19 y 21 horas, aparentemente asociadas a máximos prematinales del flujo del E a unos 1100 m sobre el suelo.

En el transcurso de los días 19 y 20 se observó la penetración de una profunda cuña con vientos de SW en toda la tropósfera, coincidiendo, tal como sucede en invierno, con un descenso en la presión atmosférica superficial. La vaguada resultante se cierra y culmina sobre la zona central de Chile el día 21, para el cual la Figura 11 muestra la secuencia temporal de los perfiles verticales de temperatura y viento. En este caso, los radiosondeos cautivos no alcanzaron alturas superiores a los 600 m sobre la superficie. Sin embargo, la consistencia de los indicadores del campo de vientos a las 13, 15 y 17 horas revela que la base de la capa estable se encontraba entre 1000 y 1100 m sobre el suelo.





1500	55/6	15.7	85/6	16.0	315/5	15.2	355/6	15.0	30/4	15.4	350/2	16.9	345/6	320/17	5/9								
m	75/6	16.2	95/6	16.7	290/3	16.0	340/3	15.8	340/3	15.7	360/2	17.7	5/4	325/14	10/8								
	80/5	17.0	115/4	17.4	235/1	16.7	50/2	16.5	325/3	16.7	275/2	18.4	33/2	325/10	5/3								
	80/2	18.0	160/5	18.2	110/5	17.5	70/4	17.1	355/1	17.6	270/2	18.6	105/2	335/7	20/2								
	90/4	18.8	170/10	18.9	85/6	18.3	50/4	17.8	20/1	18.2	280/2	19.0	260/1	345/6	220/1								
1000	80/7	19.5	175/10	19.7	70/3	18.8	30/1	18.5	350/3	18.4	25/3	19.4	285/2	330/6	195/3								
	40/6	19.2	175/6	20.2	285/3	19.1	340/4	18.8	345/4	18.6	35/4	19.8	305/2	23.2	310/4	20.3	230/4	190/6					
	70/6	19.1	150/2	20.2	265/7	19.4	350/7	19.0	340/1	18.5	35/5	19.4	5/3	22.1	310/3	20.1	185/2	195/8	15.8				
	65/5	19.2	85/2	19.5	240/7	19.3	360/7	18.8	280/1	18.2	50/5	19.5	45/4	21.9	330/2	20.4	60/2	190/10	16.4				
	55/4	19.2	65/1	18.3	250/3	18.9	10/5	18.3	260/2	17.8	65/5	20.0	80/3	300/3	21.6	275/2	20.3	153/0	190/12	16.5			
500	15/5	18.6	55/3	17.7	225/4	18.5	345/4	17.8	270/5	17.4	65/4	19.8	55/4	280/5	21.2	255/1	20.7	215/6	17.9	205/12	16.6		
	10/6	17.3	70/4	16.6	215/3	17.9	265/2	17.1	260/5	16.8	45/4	19.1	35/5	290/3	21.6	230/2	20.5	220/9	17.9	215/12	16.8		
	15/8	16.7	90/3	15.9	160/3	16.4	0/0	15.6	210/3	16.2	25/4	18.2	20/3	300/6	21.6	215/2	20.9	225/11	18.1	220/10	17.2		
	15/6	15.6	90/2	15.2	150/3	15.4	175/1	14.1	190/2	15.3	5/3	16.8	10/1	280/6	21.7	220/3	21.3	230/10	18.0	205/8	16.9		
	15/3	13.5	90/1	12.6	150/1	14.7	175/1	12.5	190/1	14.2	5/1	17.7	10/1	280/4	23.3	220/1	21.8	230/5	16.0	205/4	15.9		
0	-	10.6	-	9.7	-	9.8	-	9.7	-	13.3	-	20.2	-	-	26.6	-	23.3	-	14.4	-	11.8		
	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	h

Fig. 9 Perfiles verticales de dirección/velocidad del viento (nudos) y temperatura (°C) para el 21 de mayo de 1975. Se indican inversiones térmicas (trazos verticales); mínimos significativos en la velocidad del viento (círculos); cambios de dirección (trazos horizontales) y velocidades relativas máximas en flujo del E (recuadros).

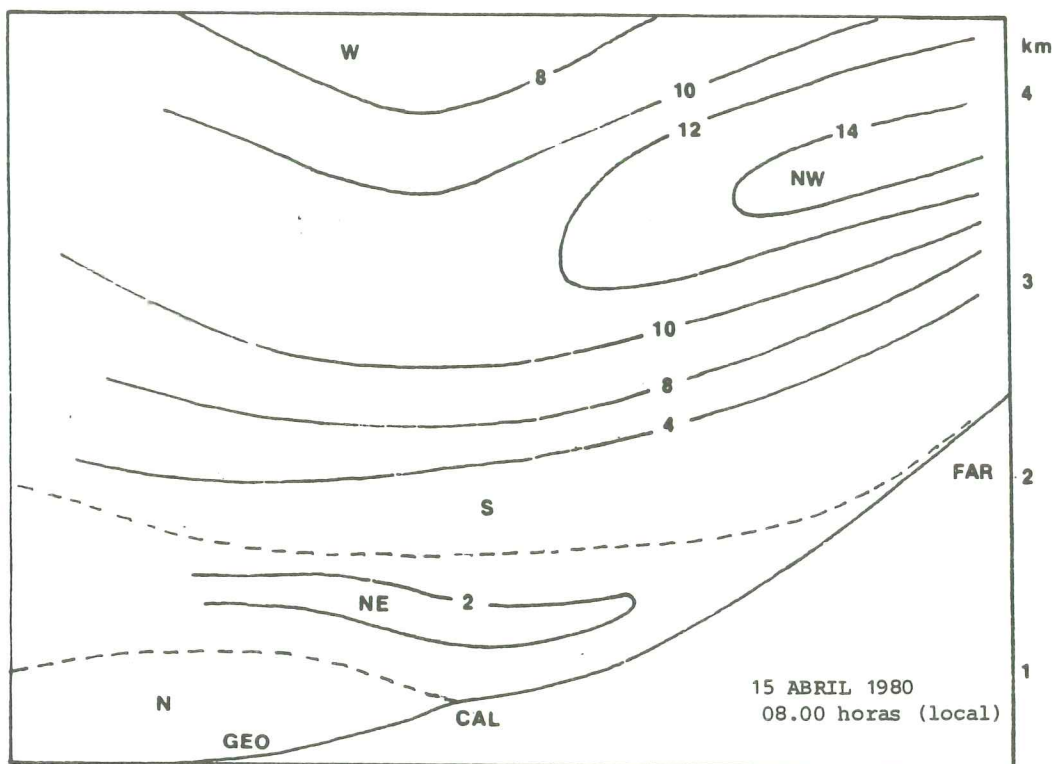


Fig. 10 Perfil transversal de vientos entre Pudahuel y Farellones (FAR) a partir de mediciones en esos lugares, Departamento de Geofísica U. Ch. (GEO) y Cerro Calán (CAL). Líneas continuas son isotacas en  $\text{m s}^{-1}$ . La zona comprendida entre líneas de segmento corresponde a un flujo con componente del E.  
Adaptado de Rutllant (1983b).

El radiosondeo cautivo de las 20 horas muestra dos delgadas capas casi isotérmicas entre 500-600 m y 1000-1100 m, mientras el globo piloto de las 21 horas indica un primer mínimo en velocidad a los 400 m, aunque la transición de dirección se da en forma franca entre los 700 y 800 m.

Las comparaciones efectuadas hasta aquí han sido hechas sobre la base de mediciones no exactamente simultáneas de viento y temperatura y realizadas con el fin de caracterizar campos medios. Así, en la mayoría de los casos se comparó datos obtenidos mediante radiosondeos cautivos y globos piloto con diferentes velocidades ascensionales. Adicionalmente, los valores analizados se originaron en interpolaciones a intervalos regulares de 100 m de altura.

En diciembre de 1983 fue posible efectuar una validación directa de la técnica de inferencia de alturas de la base de inversiones térmicas mediante perfiles verticales de viento. Esto se hizo a través del lanzamiento de una radiosonda liviana atada a un globo piloto de 30 g. De este modo, junto con recibirse las señales de temperatura y presión, fue posible determinar simultáneamente el perfil de vientos.

La Figura 12 muestra el resultado de esta comparación directa realizada el 13 de diciembre de 1983 a las 14 horas. Se incluye además un perfil de vientos obtenido el mismo día a las 10.30 horas.

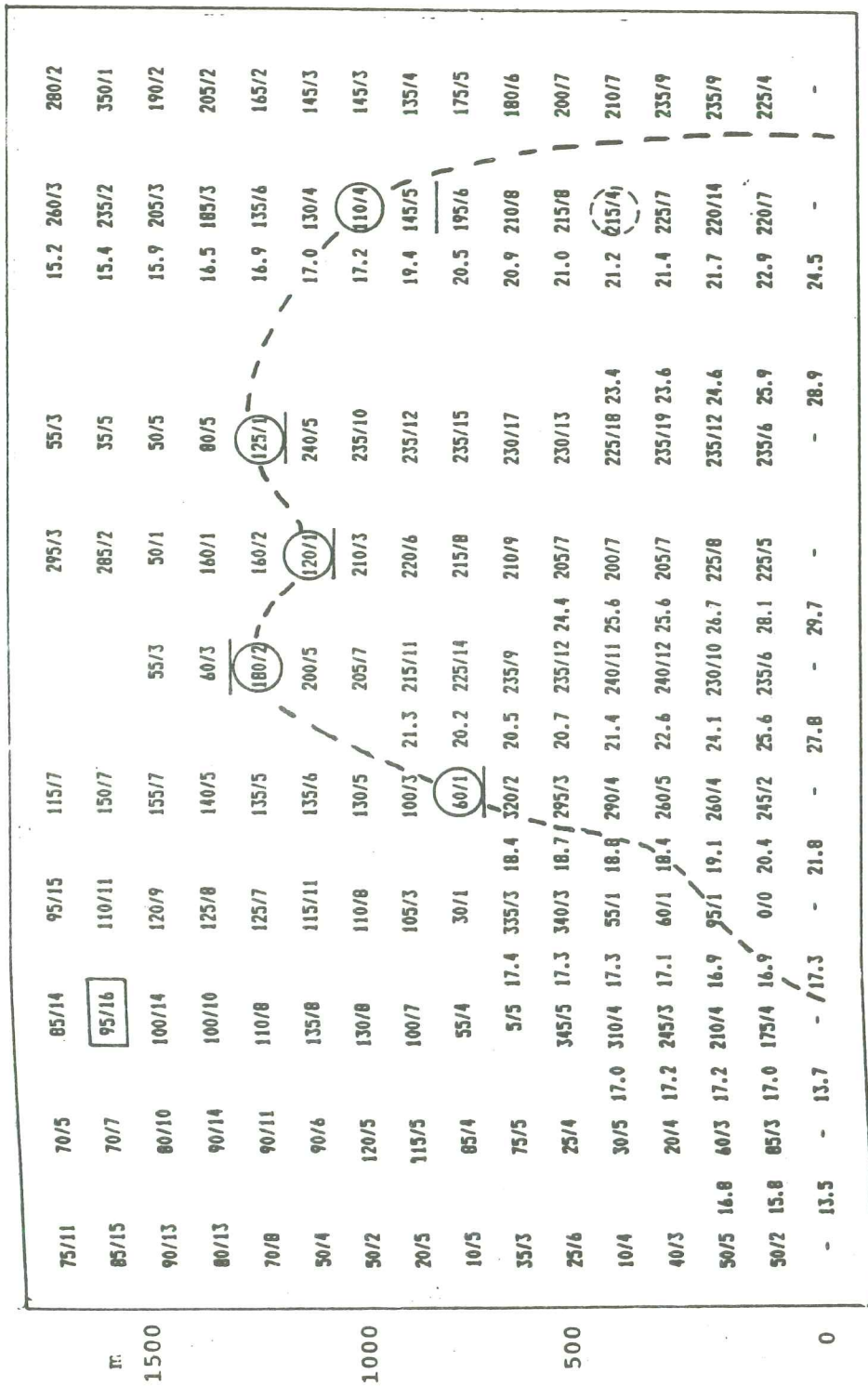


Fig. 11 Perfiles verticales de dirección/velocidad del viento (nudos) y temperatura (°C) para el 21 de noviembre de 1976. Se indican mínimos significativos en velocidad del viento (círculos); cambios en la dirección (trazos horizontales) y velocidades relativas máximas en flujo del E en recuadros. Línea de segmentos muestra tope tentativo de la capa de mezcla.

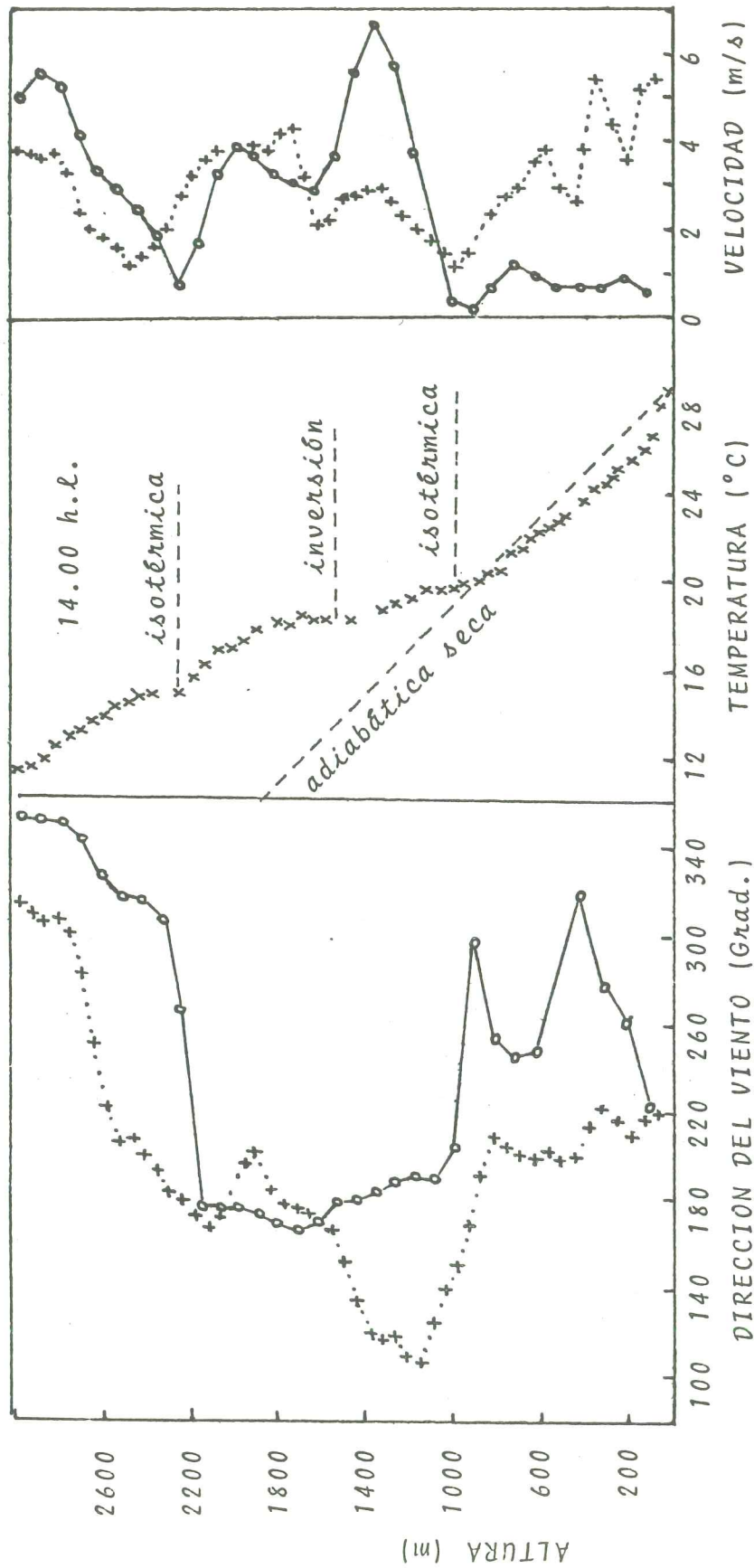


Fig. 12 Perfiles simultáneos de viento y temperatura en Santiago el 13 de diciembre de 1983 a las 14 horas (local). Viento solo a las 10:30 horas en línea continua.

A pesar de que la zona estable que limitaba la capa de mezcla era sólo un delgado estrato isotérmico a 1000 m sobre la superficie, se observa una buena correspondencia con los indicadores del perfil de vientos (mínimo en la velocidad y máxima diferencia de dirección). De la Figura 12 es también posible inferir que a las 10.30 (hora oficial de verano) la capa de mezcla no se encuentra aún desarrollada, aunque a 900 m se inician los mismos rasgos que definen la base de la capa isotérmica a las 14 horas.

Parece interesante destacar, además, que la base de la inversión térmica detectada más arriba se ve también representada por un mínimo relativo en la velocidad del viento acompañado de un cambio importante en la dirección, y que, de algún modo, la zona estable comprendida entre 1000 y 1800 m sobre la superficie coincide con una zona de flujo intenso de componente E.

## 5. DETERMINACION DEL FACTOR DE VENTILACION EN SANTIAGO MEDIANTE PERFILES VERTICALES DE VIENTO

El seguimiento óptico de globos piloto se utiliza normalmente para determinar alturas de techos nubosos o perfiles de viento con cielos desprovistos de nubosidad baja. La velocidad ascensional del globo se fija en 180 m por minuto. Al registrarse el acimut y la elevación del globo cada minuto se obtiene el viento medio en capas de 180 m de espesor, resolución que resulta pobre si se está pensando en espesores de la capa mezclada del mismo orden.

La utilización de globos con menor poder ascensional, por ejemplo del orden de 100 m por minuto, y un registro de posición cada 20 segundos permitiría obtener una resolución del orden de 30 m, que es compatible con la constante de distancia en un radiosondeo libre. Este método parece particularmente ventajoso en condiciones asociadas a bajos factores de ventilación.

Para lograr la resolución deseada se ha utilizado un teodolito meteorológico de registro automático, junto a una señal de tiempo a intervalos variables predefinidos, grabada en cinta magnética.

Este método, además de permitir un registro de posición tan rápido como se desee, hace posible la obtención de una resolución variable con la altura utilizando distintos intervalos en las señales de tiempo.

La Figura 13 muestra el resultado de este procedimiento en tres sondeos de viento realizados los días 23, 24 y 25 de agosto de 1983 en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. En ella se representa cada componente del viento separadamente, la velocidad resultante y el cizalle del viento interpolados en niveles cada 50 m, obteniéndose espesores para la capa de mezcla de 450, 350 y 400 m respectivamente.

La actual forma de presentación del cálculo del factor de ventilación, que se ha aplicado en forma rutinaria entre abril y agosto del presente año, se presenta en la Tabla 1. Las posiciones del globo registradas por el teodolito se ingresan en un microcomputador que, además de calcular los parámetros representados en la Figura 13, va obteniendo el factor de ventilación a través de la integral definida en el apartado 2.

Una vez identificada la posición del tope de la capa de mezcla, considerando el primer mínimo en la velocidad del viento que coincide o está próximo a un salto significativo en la dirección, se lee al final de la línea el factor de ventilación asociado.

Debido a que la altura del tope de la capa de mezcla interviene sólo como límite de integración, una pequeña imprecisión en su valor implica un error mínimo en el cálculo del factor de ventilación ya que las contribuciones a la integral son cada vez más pequeñas a medida que nos acercamos al mínimo relativo en la velocidad del viento.

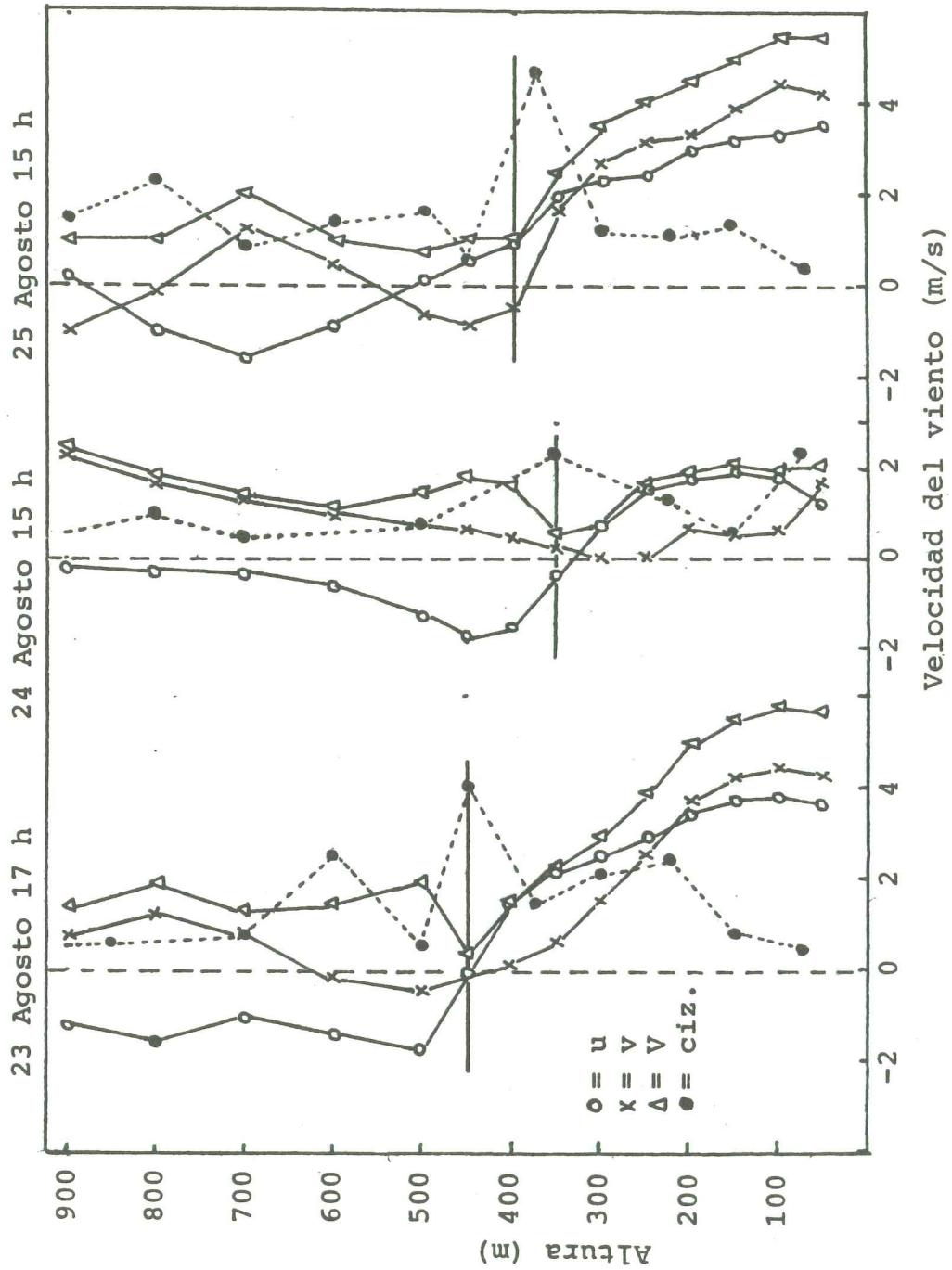


Fig.13 Perfiles verticales de viento en agosto de 1983. Se indican las componentes zonales (u), meridionales (v), la magnitud (V) y el cizalle entre capas. Las líneas horizontales indican el tope probable de la capa de mezcla.

## VIENTO EN ALTURA

GEOFISICA U. DE CHILE      FECHA 84-07-27 HORA 14.05

I	ALT m	FZA m/s	DIR g.sex	CIZ 1/h	FVT m/s	DVT g.sex	ADV gr/h	U m/s	V m/s	FV m <sup>2</sup> /s
1	36	2.2	204 SW	38	0.4	174 S	0.1	0.9	2.0	79
2	72	2.5	206 SW	47	0.5	261 W	-0.3	1.1	2.3	169
3	108	2.6	218 SW	73	0.7	311 NW	-0.5	1.6	2.1	259
4	141	2.5	223 SW	31	0.3	95 E	0.1	1.7	1.9	341
5	174	2.5	221 SW	11	0.1	299 NW	-0.2	1.6	1.9	424
6	207	2.0	221 SW	104	1.0	48 NE	0.1	1.3	1.5	490
7	240	1.6	226 SW	44	0.4	293 NW	-0.2	1.1	1.1	543
8	273	1.6	231 SW	16	0.1	69 E	0.0	1.3	1.0	596
9	306	1.5	235 SW	27	0.2	342 N	-0.2	1.2	0.9	644
10	338	1.4	245 SW	39	0.3	360 N	-0.2	1.3	0.6	688
11	369	0.8	245 SW	115	1.0	84 E	0.1	0.8	0.4	713
12	401	0.3	105 E	132	1.2	66 NE	0.0	-0.3	0.1	723
13	432	0.9	74 E	29	0.3	48 NE	0.0	-0.9	-0.2	751
14	464	0.8	67 NE	56	0.5	265 W	0.0	-0.7	-0.3	776
15	495	0.5	45 NE	34	0.6	312 NW	0.0	-0.4	-0.4	807
16	585	0.8	281 W	83	2.1	240 SW	0.1	0.8	-0.2	879
17	675	2.2	213 SW	125	3.1	160 S	0.5	1.2	1.8	1,077
18	765	3.8	188 S	36	0.9	166 S	0.1	0.6	3.7	1,419
19	855	4.1	186 S	8	0.2	30 NE	0.0	0.4	4.1	1,788
20	945	3.9	189 S	23	0.6	305 NW	-0.3	0.6	3.8	2,139
21	1035	3.6	195 S	14	0.4	316 NW	-0.2	0.9	3.5	2,463
22	1125	3.4	193 S	23	0.6	77 E	0.2	0.8	3.3	2,769
23	1215	2.7	186 S	50	1.3	23 NE	0.1	0.3	2.7	3,012
24	1305	1.6	189 S	45	1.1	337 NW	-0.2	0.2	1.6	3,156
25	1395	0.9	198 S	20	0.5	45 NE	0.0	0.3	0.9	3,237
26	1485	0.8	203 SW	15	0.4	266 W	-0.1	0.3	0.7	3,309
27	1575	0.8	231 SW	21	0.5	327 NW	-0.1	0.6	0.5	3,381
28	1665	1.0	257 W	18	0.4	288 W	-0.1	1.0	0.2	3,471
29	1755	1.0	308 NW	71	1.8	28 NE	-0.3	0.8	-0.6	3,561
30	1845	1.3	308 NW	71	1.8	224 SW	0.2	1.0	-0.8	3,678
31	1935	1.6	299 NW	52	1.3	21 N	-0.3	1.4	-0.8	3,822
32	2025	2.0	325 NW	24	0.6	353 N	-0.2	1.2	-1.7	4,002
33	2115	3.1	338 N	70	1.8	3 N	-0.3	1.2	-2.8	4,281
34	2205	4.3	341 N	32	0.8	322 NW	0.1	1.4	-4.0	4,668
35	2295	4.5	337 NW	21	0.5	226 SW	0.2	1.8	-4.2	5,073
36	2385	4.6	337 NW	22	0.6	38 NE	-0.3	1.8	-4.2	5,487
37	2475	4.9	338 N	22	0.6	301 NW	0.1	1.9	-4.6	5,928
38	2565	5.4	334 NW	22	0.6	296 NW	0.2	2.4	-4.8	6,414
39	2655	5.5	328 NW	33	0.8	222 SW	0.4	2.9	-4.6	6,909

Tabla 1 Cálculo del perfil vertical del viento con alta resolución en los primeros 500 m. La capa de mezcla muestra un espesor aproximado de 400 m, con un factor de ventilación de 720 m<sup>2</sup>/s. Otros parámetros según Salinas (1984)



## 6. CONCLUSIONES

Del estudio comparativo realizado entre perfiles verticales de viento y temperatura en Santiago durante días con malas condiciones de difusión atmosférica, generalmente asociados a la ocurrencia de depresiones costeras de núcleo cálido, se puede concluir que la base de la capa estable que limita la capa de mezcla diurna se ubica próxima al primer mínimo en la velocidad del viento a partir de la superficie. Este mínimo está generalmente inmerso en una zona con un claro contraste en la dirección del viento, desde una dirección SW, típica del flujo superficial diurno, a una con componente del E, asociada a un calentamiento advectivo por subsidencia en la madrugada y mañana precedentes. Este cambio de dirección permite seleccionar el nivel adecuado cuando el mínimo en la velocidad del viento no está bien definido.

La transición señalada en la dirección del viento, en particular cuando se trata de un cambio de SW a NE, parece consistente con un esquema de vientos de barrera, que se generan por efecto de la cordillera al penetrar una dorsal cálida en la tropósfera media desde el poniente (Rutllant, 1983 b). El síntoma más característico de este modelo está en la aparición de un chorro de dirección NNW a unos 3000 m sobre el nivel del mar.

Los casos de transición desde el SW a SE, en particular cuando esta última dirección se presenta hasta más allá de la altura media de los Andes, pueden asociarse a un efecto Foehn que se podría generar al establecerse una vaguada profunda de eje NW-SE sobre el cono sur de América (Rutllant, 1981) o cuando ocurre una baja segregada sobre la zona central de Chile en la tropósfera media.

Las consecuencias prácticas de la propiedad del campo de vientos que se ha analizado a través de este estudio, se traducen en la posibilidad de medir el factor de ventilación en Santiago en torno a mediodía. Para esto se ha utilizado la técnica de medición del perfil vertical de vientos mediante un globo piloto seguido con un teodolito de registro automático a intervalos de tiempo variables y previamente definidos. Una velocidad ascensional de 100 m/min e intervalos temporales de 20 s producen una resolución espacial comparable a la constante de distancia del sensor térmico de la radiosonda.

El factor de ventilación se obtiene integrando la velocidad del viento con la altura hasta el tope de la capa de mezcla que, a su vez, se determina usando los indicadores del campo de vientos definidos en este estudio.

La bondad de esta técnica será tanto mejor mientras mejor se encuentre desarrollada la turbulencia en el seno de la capa de mezcla, incluyendo un borde superior bien definido.

La capa estable elevada que limita la capa de mezcla se encuentra generalmente asociada a una advección cálida originada en un flujo subsidente del E, a veces con estructura de chorro. El carácter más o menos organizado que podría presentar este flujo permitiría establecer un elemento de pronóstico en la evolución de la inversión térmica elevada.

## 7. PARTICIPANTES

Los programas y el procesamiento en microcomputador estuvieron a cargo de Hugo Salinas, quien participó además, junto al autor, en las mediciones de perfiles de viento.

El radiosondeo de diciembre de 1983 fue posible gracias a la cooperación de Sergio Giglio de la Escuela Técnica Aeronáutica.

Tomás Unwin participó como memorista asociado a este estudio.

El financiamiento de este trabajo fue en parte posible a través del Departamento de Investigación y Bibliotecas de la Universidad de Chile, Proyecto N° E 1486 84/33 y el Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Proyecto N° 782/82.

## 8. REFERENCIAS

- MILLER, A., 1968: "Wind Profiles in West Coast Temperature Inversions". Report N° 4 Dep. of Meteor., San Jose State College. California.
- RUTLLANT, J., 1973: "Factores Meteorológicos en la Contaminación Atmosférica de Santiago. Resultados de las Mediciones 1971-72". Public. N° 164 Dep. Geofísica, U. de Chile.
- RUTLLANT, J., 1981: "Subsistencia Forzada sobre Ladera Andina Occidental y su Relación con un Episodio de Contaminación Atmosférica en Santiago". Tralka. Vol. 2 N° 1, pp. 57-76.
- RUTLLANT, J. Y H. SALINAS, 1982a: "Frecuencia de Ocurrencia de una Condición Meteorológica Desfavorable para la Difusión de Contaminantes en la Zona Central de Chile". Tralka. Vol. 2 N° 2, pp. 147-160.
- RUTLLANT, J. Y H. SALINAS, 1982b: "Caracterización Meteorológica de Situaciones de Alto Potencial de Contaminación Atmosférica en Chile Central". CONGREGMET IV, Bs. As., septiembre 1982.
- RUTLLANT, J., 1983a: "Coastal Lows in Central Chile". Preprints First Int. Conf. on Southern Hemisphere Meteorology. AMS. Sao Jose dos Campos. Agosto 1983. pp. 344-346.
- RUTLLANT, J., 1983b: "Vientos de Barrera en los Andes de Chile Central". Frontera. Jorn. de Física. Temuco, pp. 49-52.
- SALINAS, H., 1984: "Software para el Cálculo del Viento en Altura". Tesis de Título.
- ULRIKSEN, P. Y J. RUTLLANT, 1977: "Campaña de Mediciones Meteorológicas en Santiago". Noviembre 1976. Informe para INTEC - CORFO. Julio 1977.