

# FRECUENCIA DE OCURRENCIA DE UNA CONDICION METEOROLOGICA DESFAVORABLE PARA LA DIFUSION DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE.

José Rutllant y Hugo Salinas

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

## RESUMEN

Los bajos factores de ventilación que resultan de la presencia de vaguadas o bajas barométricas no asociadas al frente polar en la zona Central de Chile, han sido recientemente puestos en evidencia, así como la manifestación del fenómeno en términos del descenso y aumento en intensidad de la inversión térmica en Quintero.

Con el objeto de estudiar la ocurrencia de estos episodios a lo largo del año se procesó 22 años de radiosondeos diarios en Quintero obteniéndose una máxima ocurrencia de casos con incrementos térmicos superiores a 10°C en el período Abril-Agosto; un máximo relativo en Abril-Mayo y un mínimo relativo en Junio-Julio.

De la totalidad de las inversiones superficiales intensas, un 24% se agrupó en dos días consecutivos; un 7% y un 2% en tres y cuatro días consecutivos respectivamente.

## ABSTRACT

### FREQUENCY DISTRIBUTION OF A METEOROLOGICAL CONDITION UNFAVORABLE FOR ATMOSPHERIC DISPERSION OF POLLUTANTS IN CENTRAL CHILE

The low ventilation factors arising from the presence of troughs or barometric lows not associated to the polar front in Central Chile have been recently evidenced, as well as the resulting lowering and increase in intensity of the thermal inversion at Quintero.

Aiming to the study of occurrence of those events throughout the year, 22 years of daily radiosonde data at Quintero were processed, indicating maximum occurrence with temperature increments larger than 10°C in the period April-August; a relative maximum in April-May and a relative minimum in June-July.

From the total number of strong surface inversions analyzed, 24% were grouped into two consecutive days, 7% and 2% in three and four consecutive days respectively.

## 1. INTRODUCCIÓN.

La importancia de las condiciones meteorológicas asociadas a vaguadas o depresiones "térmicas" intensas en Chile Central, en relación a la ocu-

rencia de eventos de contaminación atmosférica en Santiago, ha sido recientemente puesta de manifiesto (Rutllant, 1981). En ese trabajo se postula un modelo que relaciona la presencia de una vaguada superficial resultante de la migración hacia el oriente de un anticiclón frío, con la profunda vaguada de altura que gobierna la invasión de aire polar hacia la parte oriental del continente, en condiciones de bajo índice de circulación zonal.

La vaguada de altura presentaría una orientación favorable a la presencia de una componente del este en el flujo de aire superior. Al cruzar la cordillera, el aire descendería por la pendiente andina occidental forzado por la convergencia superficial producida por la baja barométrica en superficie.

Los movimientos atmosféricos descritos resultan en una advección seca y cálida desde el este en la parte sur del sistema depresionario superficial. Esta advección genera una inversión térmica intensa cerca del suelo y vientos muy débiles en la capa de mezcla, produciéndose factores de ventilación extraordinariamente bajos. El sistema descrito parece autoalimentarse y profundizarse propagándose hacia el sur por un efecto térmico que podría asociarse al balance de energía de la delgada capa de mezcla superficial en el sector sudoriental de la perturbación.

Del estudio de episodios presentado en el trabajo citado se desprende una clara incidencia del fenómeno meteorológico en los radiosondeos de Quintero. La Fig. 1 representa tres radiosondeos sucesivos en los que se advierte la evolución del fenómeno descrito, desde el comienzo de la advección cálida hasta el "llenado" del sistema por advección de aire oceánico en su zona norponiente.

La inversión térmica superficial resultante de la advección cálida se presenta como un descenso de la base de la habitual inversión de subsidencia asociada al anticiclón subtropical, con un pronunciado aumento de la presión del punto de rocío con la altura debido a la característica sequedad del flujo catabático.

El análisis de la ocurrencia de radiosondeos como los representados en la Fig. 1 constituye la parte esencial del presente trabajo, que se enmarca dentro del tema "potencial de contaminación atmosférica".

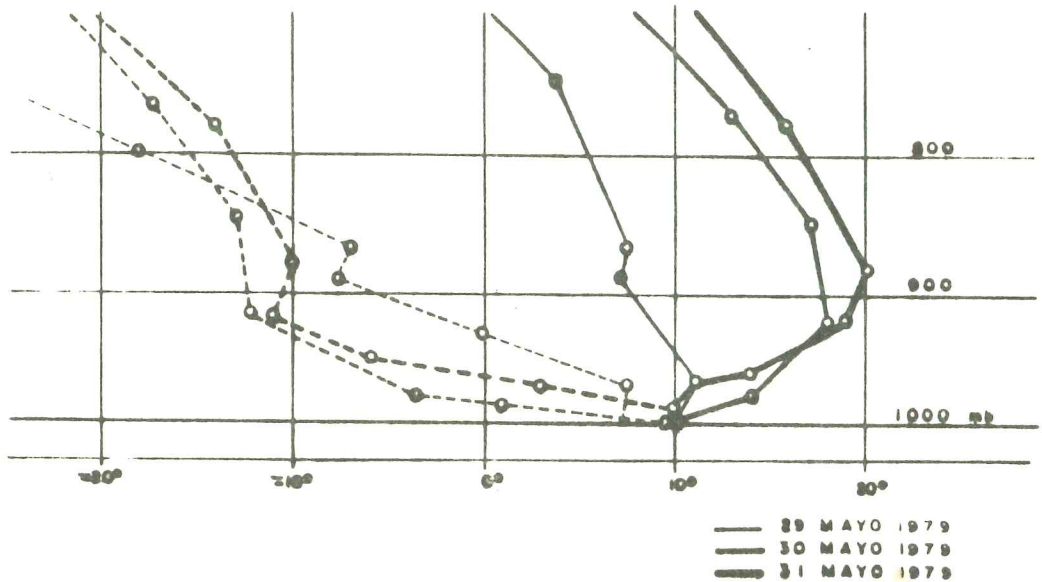


Fig. 1. Perfiles verticales de temperatura y temperatura del punto de rocío para los días 29, 30 y 31 de Mayo de 1979 en Quintero a las 12Z.

## 2. POTENCIAL DE CONTAMINACION ATMOSFERICA.

El Potencial de Contaminación Atmosférica (PCA) expresa el grado de inhabilidad de la atmósfera para dispersar y diluir contaminantes que pudieran ser introducidos en ella. (Stern et al., 1973). Así, es posible que exista un alto PCA aun en ausencia de contaminantes.

Definido de esta manera, el PCA representa una medida puramente meteorológica de estados atmosféricos que podrían producir problemas en conjunción con emisiones excesivas.

En áreas caracterizadas climáticamente por el predominio de inversiones de subsidencia, el potencial de contaminación atmosférica puede representarse cuantitativamente por una combinación de parámetros relativos a la inversión, como altura de la base, espesor e incremento térmico. Por ejemplo, el índice de Stanford (IS), (Robinson, 1952) se ha definido como:

$$IS = (\Delta\theta)^2 / (H \Delta z + 3)$$

en que  $(\Delta\theta)$  es el incremento de temperatura potencial ( $^{\circ}C$ ),  $\Delta z$  el espesor

(hm) y H la altura de la base de la inversión térmica (hm). Este índice ha sido utilizado como herramienta de análisis climatológico y como predictor de la calidad del aire en Los Angeles, California, USA (Stern et al., 1973).

Otra forma de definir un PCA es mediante valores de concentración relativa media de un contaminante contenido a través de un modelo simple de dispersión que se alimenta con parámetros meteorológicos y geométricos. Por ejemplo, si consideramos la atmósfera urbana como una "caja" de longitud D (en la dirección del viento dominante) y altura H, que corresponde aproximadamente a la altura de la base de la inversión térmica, es posible calcular la concentración media  $\bar{c}$  de un contaminante emitido con una intensidad  $Q$  ( $g/m^2s$ ) si se supone condiciones estacionarias y una mezcla uniforme en la vertical, mediante:

$$c = Q D / \bar{u} H \quad ; \quad \bar{u} = \frac{1}{H} \int_0^H u \, dz$$

en que  $u$  es la velocidad del viento, y  $z$  la coordenada vertical.

El producto de los parámetros meteorológicos  $\bar{u}$  y H se conoce como factor de ventilación y resulta inversamente proporcional a la concentración relativa media  $\bar{c}/Q$  en modelos estacionarios simples como el gaussiano y el de tipo "caja". Miller y Holzworth (1967) han utilizado esta técnica para un análisis climatológico del PCA en todo el territorio norteamericano.

La suposición de mezcla uniforme en la vertical, que caracteriza los modelos simples señalados, resulta especialmente adecuada para vientos débiles y capas de mezcla poco profundas con turbulencia de origen térmico. Todas estas características están de algún modo presentes en las condiciones meteorológicas, objeto del presente trabajo.

El análisis climatológico de la ocurrencia de eventos asociados a un alto PCA en la zona Central de Chile se ha efectuado estudiando la presencia de un determinado tipo de inversión térmica en 22 años de radiosondeos diarios en Quintero. Como veremos más adelante, los límites que definen el tipo de inversión seleccionada podrían asociarse a un límite inferior para un índice del PCA como el de Stanford.

- El Potencial de Contaminación Atmosférica y su pronóstico.

Además del análisis climatológico del PCA, asociado o no a determinados índices, es posible incorporar al pronóstico meteorológico de rutina, un pronóstico de PCA. Una descripción compacta de un programa existente en EE.UU. desde hace casi 20 años puede encontrarse en Dobbins (1979).

Un elemento básico de la metodología del pronóstico del PCA consiste en la detección anticipada de sistemas meteorológicos a los que se asocia en general vientos débiles, lento desplazamiento y movimientos de subsidencia. En climas de latitudes medias, como los que caracterizan gran parte de Norteamérica y Europa, son los anticiclones de bloqueo o sistemas de alta presión relativa de muy lento desplazamiento los que normalmente reúnen las características señaladas. Así, Korshover (1971) ha estudiado la climatología de estos sistemas meteorológicos al este de los Rocallosos, definiendo las peores épocas del año para la difusión atmosférica de contaminantes.

A partir de estudios de este tipo y del análisis de las condiciones meteorológicas reinantes durante episodios notables de contaminación atmosférica real (CAR), es posible definir límites en parámetros como altura de la capa de mezcla, velocidad de ventilación, y combinarlos con ausencia de precipitaciones significativas y persistencia de las condiciones meteorológicas adversas. Esto permite implementar métodos de pronóstico objetivo de condiciones críticas de PCA.

Desde este punto de vista el trabajo que aquí se presenta constituye también una primera etapa hacia una metodología de previsión adecuada a nuestras latitudes por cuanto además de identificarse un sistema meteorológico susceptible de pronóstico, se plantean valores límites de parámetros asociados a la existencia de inversiones térmicas en Quintero y la persistencia de estas condiciones durante algunos días.

- El Potencial de Contaminación Atmosférica versus niveles reales de contaminación atmosférica.

Dentro de la zona Central de Chile, es, sin lugar a dudas, Santiago la ciudad que presenta los mayores problemas reales y también potenciales de contaminación atmosférica, si se compara con ciudades costeras como Valparaíso y Concepción (Rutllant, 1979). Como producto de esta situación, las úni-

cas mediciones sistemáticas de niveles de contaminación atmosférica real (CAR) se encuentran en Santiago.

Al intentarse una comparación entre niveles de CAR y el PCA surgen de inmediato varias dificultades. La primera se refiere al principio de continuidad de masa, en el sentido que un cierto nivel de CAR en un período dado depende no sólo de la capacidad atmosférica de dispersión y dilución sino también del nivel existente al comienzo del período, de las características y tasas de emisión de las fuentes y de las tasas de recombinación, deposición y lavado (sumideros) en el período considerado.

En el caso de Santiago, aun si hipotéticamente pudiésemos considerar sólo como variable el poder difusivo de la atmósfera, sería difícil disponer de un índice general representativo del nivel de CAR en toda el área ya que las mediciones disponibles no son continuas ni los valores medidos muestran una aceptable correlación entre sí (Ulriksen et al., 1982).

Una alternativa posible en la comparación del PCA con la CAR es mediante un análisis de episodios en los que se disponga de mediciones, tal como se presenta en Rutllant (1981). Aun en estas circunstancias es posible visualizar elementos de meso y microescala que diferencian Santiago de Quintero, en particular el grado de influencia de los flujos catabáticos, la influencia del relieve sobre los vientos dominantes, la intensidad del enfriamiento nocturno por radiación y el efecto de isla calórica en la ciudad relativa a su entorno rural.

### 3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION.

El archivo básico utilizado consistió en 22 años de radiosondeos atmosféricos diarios a las 00Z y 12Z para Quintero (NOAA, USA). De este conjunto de datos, que comprende 14301 radiosondeos, para el período 1957-1979, se extrajo aquellos casos en que se cumplían los siguientes requisitos en relación a la existencia de inversiones térmicas:

$$\begin{array}{lll} \Delta p > 20 \text{ mb} ; & \Delta T > 0.5^{\circ}\text{C} ; & h_B < 2000 \text{ m} \\ \text{(espesor mínimo)} & \text{(incremento térmico mínimo)} & \text{(máxima altura de Base)} \end{array}$$

en que  $\Delta p = p_B - p_T$  representa la diferencia de presión entre la base y el to

pe de la inversión térmica (Fig. 2);  $\Delta T$  corresponde al incremento de temperatura  $T_T - T_B$  y  $h_B$  la altura de la base de la capa que presenta la inversión térmica. El límite superior para  $h_B$  se ha elegido considerando un valor medio anual incrementado en dos veces la desviación standard según un estudio anterior (Rutilant y Sippa, 1971).

Las inversiones térmicas que satisfacen los requisitos indicados representan mayoritariamente inversiones de subsidencia asociadas al anticiclón subtropical. La Tabla I muestra que el 77% de todos los radiosondeos analizados cumple dichos requisitos. Sin embargo, además de los fenómenos de subsidencia de gran escala que corresponden a una característica general del clima de la zona Central de Chile, este conjunto de inversiones incluye otras de tipo superficial que responden a fenómenos de enfriamiento radiativo y subsidencia regional forzada por advección desde el oriente, siendo estas últimas las que se desea identificar, en particular las más intensas.

El criterio utilizado para separar las inversiones debidas a la subsidencia forzada del resto consistió en tomar aquellas cuya altura de base no excede los 250 m sobre la superficie y cuyo incremento térmico es al menos de  $10^{\circ}\text{C}$ . Por razones de simplicidad se omitió en el análisis la condición de aumento de la depresión del punto de rocío con la altura, característica esencial de todas las inversiones térmicas que reflejan fenómenos de subsidencia.

La Tabla I muestra, para cada estación del año y para cada hora de observación, el número total de radiosondeos analizados, el número de casos con inversión térmica significativa bajo los 2000 m de altura (inversiones tipo A) y el número de inversiones intensas cercanas a la superficie que están supuestamente asociadas a subsidencia forzada (inversiones tipo B). El subíndice que acompaña este último grupo indica el incremento térmico mínimo aceptado. De la Tabla resulta aparente que el período del año que ostenta máxima ocurrencia de inversiones tipo B<sub>10</sub> está comprendido entre los meses de Abril y Septiembre y se reflejan mayoritariamente en los radiosondeos de las 12Z (08 hora local). Este resultado podría estar reflejando en parte el hecho de que, en el período que va de Octubre a Marzo a las 12Z, la radiación solar en días despejados es suficiente como para erosionar la inversión térmica desde abajo, más allá de los límites impuestos por la selección efectuada.

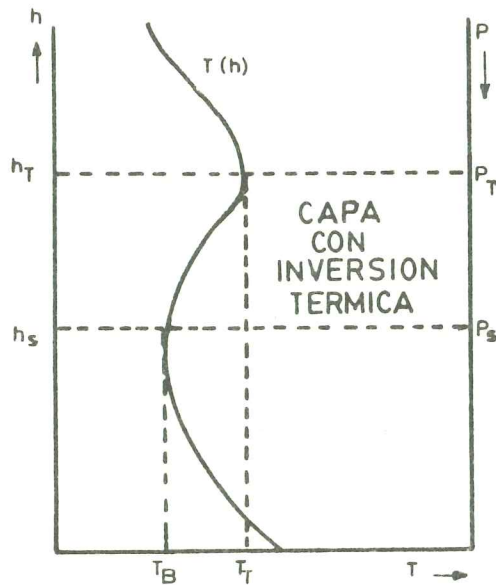


Fig. 2. Parámetros que definen características básicas de una capa con inversión térmica.

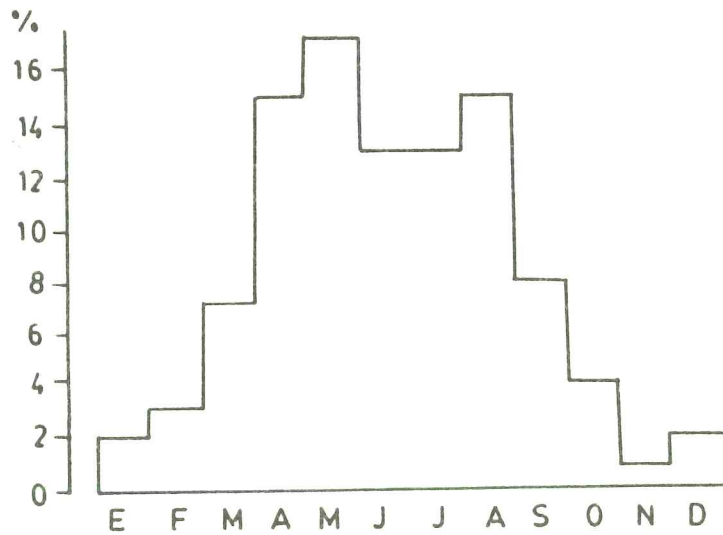


Fig. 3. Frecuencia porcentual de ocurrencia de inversiones superficiales con incremento térmico igual o superior a  $10^\circ\text{C}$  a lo largo del año (Quintero, 1957-1979).



TABLA 1  
QUINTERO (1957 - 1979)

	00Z		12Z		TOTAL	
	número	%	número	%	número	%
VERANO (E, F, M)						
Radiosondeo	1671	100	1739	100	3410	100
Inversión A	1374	82	1616	93	2990	88
Inversión B <sub>10</sub>	3	--	81	5	84	2
OTONO OTONO (A, M, J)						
Radiosondeo	1701	100	1763	100	3464	100
Inversión A	1166	69	1414	80	2580	74
Inversión B <sub>10</sub>	39	2	278	16	317	9
INVIERNO (J, A, S)						
Radiosondeo	1858	100	1856	100	3714	100
Inversión A	1126	61	1432	77	2558	69
Inversión B <sub>10</sub>	33	2	216	12	249	7
PRIMAVERA (O, N, D)						
Radiosondeo	1819	100	1894	100	3713	100
Inversión A	1309	72	1638	86	2947	79
Inversión B <sub>10</sub>	7	--	42	2	49	1
TOTAL						
Radiosondeo	7049	100	7252	100	14301	100
Inversión A	4975	71	6100	84	11075	77
Inversión B <sub>10</sub>	82	1	617	8	699	5

TABLA 2

ARO MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	TOTAL
1958		4		5	5	1	5	4	2	2			28
1959		2	5	7	13	8	1	4	3	2			45
1960				12	6	3	1	5	3	1	1		32
1961	4		1	3	5	6	2	5	2	5	1		34
1962	1				2	5	3	7		1			19
1963				8	5	6	3	2	2		1		27
1964			3	3	5	4	2	5	4	1			27
1965	4		1	3	6	1	2	3	4		2		26
1966	1		2	1	9	2	5	4	2	1			27
1967			2	7		8	9	5	1		1	2	35
1968	1		4	1	8	3	10	5	2			1	35
1969			2	5	3	3	10	5	8	1			37
1970			1	5	7	3	1	4	6	4	1		32
1971	1				7		4	3	1	3	2		21
1972			3	3	8	3	2	3	4	1	1		29
1973	3		2	1	6	4	4	3		1	1		21
1974	1		4	6	4	7	7	11	4				44
1975			2	3	6	2	5	7	2	4	2		34
1976			1	2	3	6	10	6	3	1		2	35
1977	3		1	3	10	7	2	3	3	3	1		46
1978			2	2	5	6	1	8		1	2		27
1979			4	1	9	6	8	5	2	2		1	38
S	13	24	47	107	117	93	94	102	53	27	7	15	699
Σ	2	3	7	15	17	13	13	15	8	4	1	2	100

#### 4. ANALISIS DE RESULTADOS.

La repartición mensual de la ocurrencia de inversiones térmicas de tipo  $B_{10}$  durante el período en que se dispone de datos está indicada en la Tabla 2, obteniéndose de allí una distribución porcentual mes a mes que se ilustra en la Fig. 3. Ella muestra que en el período comprendido entre Abril y Septiembre la mayor ocurrencia de inversiones superficiales fuertes se concentra en los meses de Abril y Mayo con un mínimo relativo en los meses de Junio y Julio, en que la actividad frontal alcanza en promedio su máxima expresión. El mínimo porcentaje de ocurrencia se da en Noviembre, lo que en parte podría corresponder a la fuerte influencia anticiclónica que aun se manifiesta en este mes al observar el ciclo medio anual de la presión atmosférica en Quinta Normal (Fig. 4). Por otra parte, durante este mes la actividad frontal es casi inexistente, la vaguada continental transandina aun no se extiende hasta las latitudes de Chile Central y la radiación solar presenta valores elevados.

Con el objeto de estudiar la repartición porcentual de ocurrencias de incrementos térmicos mínimos mayores que  $10^{\circ}\text{C}$  se incluye en la Fig. 5 los porcentajes de ocurrencia de inversiones con valores de  $\Delta T$  iguales o superiores a  $11^{\circ}\text{C}$ ,  $12^{\circ}\text{C}$  hasta  $17^{\circ}\text{C}$  referidas al total de los casos en que  $\Delta T > 10^{\circ}\text{C}$ . Así, las inversiones de tipo  $B_{17}$  representan un 50% del total del tipo  $B_{10}$ , con una repartición de frecuencia porcentual aproximadamente exponencial entre ambos tipos.

Otro aspecto importante de este estudio, además de la intensidad de la inversión térmica, es la duración de las condiciones meteorológicas que las producen, en la medida que esa duración se refleja en el número de días consecutivos en que se presentan en Quintero inversiones térmicas de tipo  $B_{10}$ . La Fig. 6 muestra el número de casos para cada mes en que estas condiciones se dieron durante dos, tres y cuatro días consecutivos. De la totalidad de casos con inversiones térmicas superficiales de tipo  $B_{10}$ , el 24% se agrupa en dos días consecutivos, el 7% en tres y el 2% en cuatro días sucesivos.

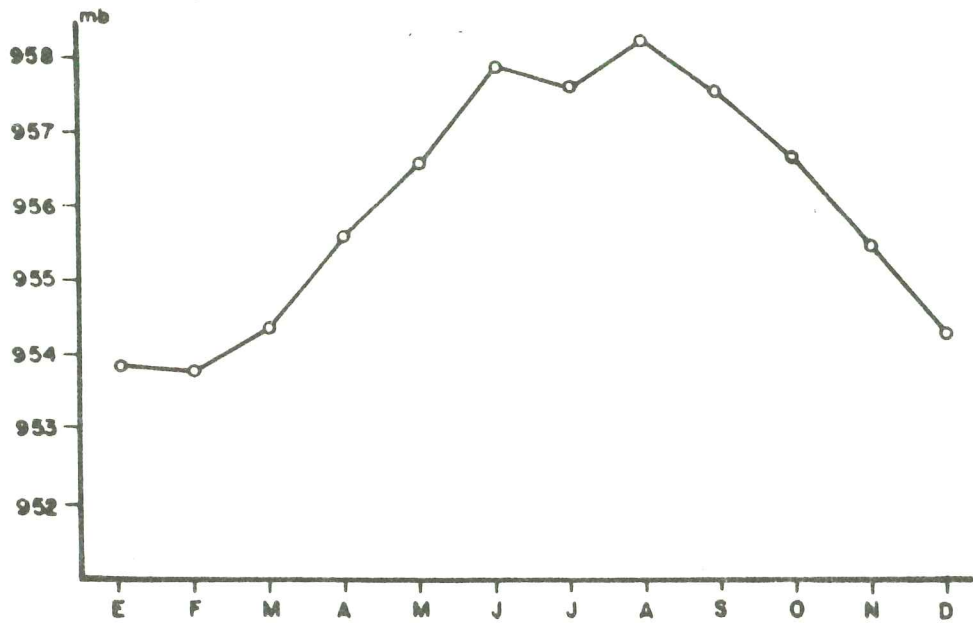


Fig. 4. Variación anual media de la presión atmosférica en Quinta Normal (520 m.s.n.m.) en el período 1957-1971.

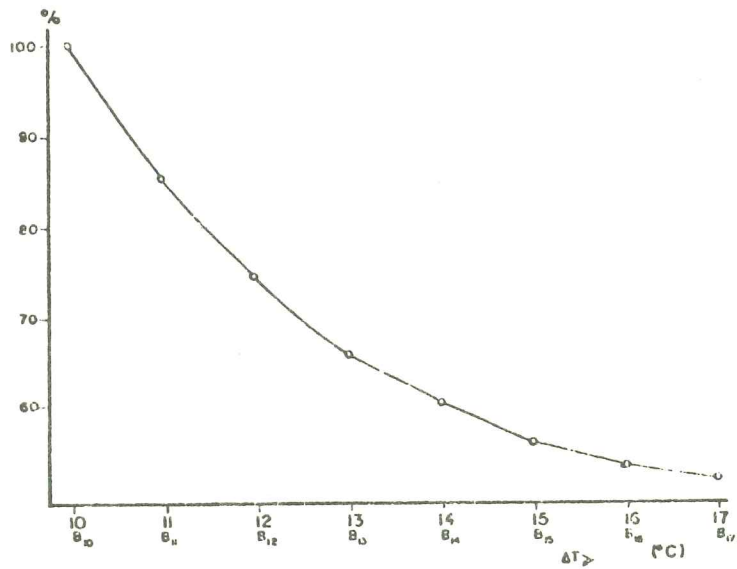


Fig. 5. Porcentaje de inversiones superficiales cuyo incremento térmico excede el valor de la abscisa. Porcentajes referidos al número total de inversiones en que  $\Delta T > 10^\circ\text{C}$ .

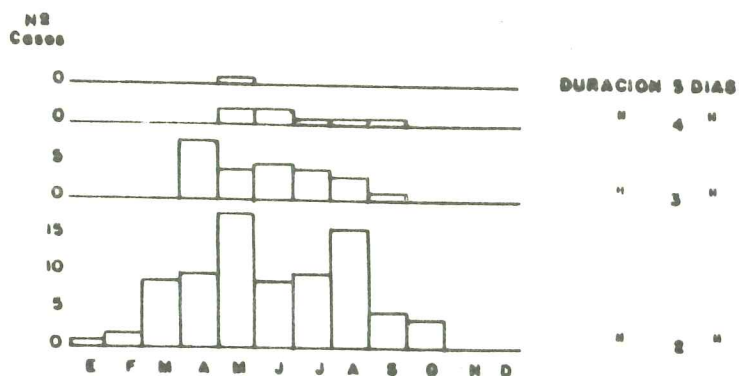


Fig. 6. Número total de casos por mes con inversiones de tipo  $B_{10}$  en que estas condiciones se mantuvieron durante 2, 3, 4 ó 5 días consecutivos.

##### 5. CONCLUSIONES.

Partiendo de la base que la presencia de vaguadas o bajas barométricas no asociadas al frente polar (bajas "térmicas") en la zona Central de Chile producen muy bajos factores de ventilación y que la ocurrencia de los eventos más intensos de este tipo se reflejan en un descenso y aumento de la intensidad de la inversión de subsidencia en Quintero (Rutllant, 1981), se ha estudiado la frecuencia de ocurrencia de inversiones superficiales en que el incremento térmico es mayor o igual a  $10^{\circ}\text{C}$  analizando 22 años de radiosondeos diarios.

El resultado de este análisis permite formular las siguientes conclusiones:

a) En promedio, las Inversiones superficiales fuertes se presentan en uno de cada 20 días en el año, alcanzándose una probabilidad doble en el otoño que aparece como la estación más propicia a la ocurrencia de este tipo de fenómenos.

b) La máxima ocurrencia de inversiones superficiales fuertes se presenta en el período comprendido entre Abril y Agosto, con un ligero decremento en los meses de Junio y Julio.

c) Del total de ocasiones en que se presentan inversiones superficiales con incremento térmico superior a  $10^{\circ}\text{C}$ , en una de cada veinte se alcanza  $\Delta T > 17^{\circ}\text{C}$ , con una probabilidad de ocurrencia de incrementos térmicos intermedios aproximadamente exponencial.

d) De la totalidad de casos con inversiones superficiales con incremento térmico superior a  $10^{\circ}\text{C}$ , el 24% se agrupa en dos días consecutivos mientras el 7% y el 2% lo hacen en tres y cuatro días sucesivos respectivamente.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- DOBBINS, R., 1979: "Atmospheric Motion and Air Pollution". John Wiley.
- KORSHOVER, J., 1971: "Climatology of Stagnating Anticyclones East of the Rocky Mountains: 1936-1970". NOAA Tech. Mem. ERL ARL - 34.
- MILLER, M. y G. HOLZWORTH, 1967: "An Atmospheric Diffusion Model for Metropolitan Areas". J. of Air Poll. Contr. Assoc. 17 (1), pp. 46-50.
- ROBINSON, E., 1952: "Some Air Pollution Aspects of the Los Angeles Temperature Inversion". Bull. of the A.M.S., Vol. 33, N° 6, pp. 247-250.
- RUTLLANT, J. y G. SIPPA, 1971: "Algunas Características de la Inversión de Subsistencia del Anticiclón Subtropical". Ier. Seminario Nacional de Meteorología. Santiago, Marzo 1971.
- RUTLLANT, J., 1979: "Meteorología de Mesoescala en Problemas de Contaminación Atmosférica Urbana: Comparación entre Condiciones Potenciales de Santiago y Concepción". Traika, Vol. 1, N° 1, pp. 10-22.
- RUTLLANT, J., 1981: "Subsistencia Forzada sobre Ladera Andina Occidental y su Relación con un Episodio de Contaminación Atmosférica en Santiago". Traika, Vol. 2, N° 1, pp. 57-76.
- STERN, A., R. WOHLERS, R. BOUBEL y W. LOWRY, 1973: "Fundamentals of Air Pollution". Academic Press.
- ULRIKSEN, P., H. SANDOVAL y L. SANCHEZ, 1982: "Contaminación Atmosférica de Santiago. Parte I: Análisis Estadístico de Concentraciones Medidas". XIII Jornadas Chilenas de Química, La Serena, Enero 1982.