

SUBSIDENCIA FORZADA SOBRE LADERA ANDINA OCCIDENTAL Y SU RELACION CON UN EPISODIO DE CONTAMINACION ATMOSFERICA EN SANTIAGO.

José Rutllant C.

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

RESUMEN

En el marco de un esquema en que se combinan consideraciones teóricas y observacionales, se estudian dos situaciones meteorológicas similares que producen coeficientes de ventilación muy bajos en la zona central de Chile.

Estas situaciones se caracterizan por aire descendente sobre la ladera andina occidental forzado por convergencia superficial. El proceso se intensificaría por un flujo con componente del este sobre la cordillera asociado a una vaguada en altura de gran amplitud.

Además de la intensificación diurna adicional de origen radiativo en la porción sudoriental de la vaguada o baja superficial cerrada, se insinúa un mecanismo ondulatorio de propagación hacia el sur por analogía con un fenómeno similar en las bajas costeras de Sud Africa y en las bajas de sotavento argentinas.

Se incluye además posibles beneficios que se derivarían de un completo conocimiento de este fenómeno, trabajos que se están realizando en este sentido y se plantean algunas investigaciones que sería necesario realizar.

ABSTRACT

FORCED SUBSIDENCE DOWN THE WESTERN ANDEAN SLOPE AND ITS RELATIONSHIP WITH AN AIR POLLUTION EPISODE IN SANTIAGO, CHILE

By means of combining theoretical and observational facts, two similar weather patterns that produce very low ventilation coefficients in central Chile are studied.

These weather patterns are characterized by air descending down the Andean slope which is forced by surface convergence. This process would be enhanced in connection with easterly flow above the Andes range associated to a large amplitude upper trough.

Besides the diurnal radiative enhancement in the southeastern portion of the surface low or trough, a wave-like southward propagation mechanism by analogy with the South African coastal lows and the Argentinian lee trough seems to be applicable.

Possible benefits of a complete knowledge of this process, together with present efforts to understand aspects of the problem and future research work are also presented.

1. INTRODUCCION.-

El fenómeno conocido en meteorología como subsidencia se refiere al movimiento descendente del aire que cubre usualmente un área extensa. Este tipo de movimiento se asocia en general a centros de alta presión o anticiclones en que el descenso se produce por convergencia de aire en la mitad superior del sistema y divergencia en la inferior.

La capa de aire descendente sufre una compresión adiabática generándose una inversión térmica que limita verticalmente la extensión de la capa de mezcla superficial, con las consiguientes limitaciones en la difusión vertical de contaminantes atmosféricos (Rutllant, 1979). El aire caliente que queda sobre la base de la inversión es además seco, contrastando en temperatura y humedad con el aire confinado en la capa superficial mezclada.

El predominio del anticiclón subtropical del Pacífico en el clima de las zonas norte y central de Chile es conocido. La Figura 1 muestra la frecuencia de ocurrencia de inversiones de subsidencia en Antofagasta y Quintero a las 00Z y 12Z para meses representativos de las cuatro estaciones del año. Adicionalmente se incluye en Tabla 1 valores medios anuales de los parámetros que caracterizan la posición e intensidad de la inversión: espesor, altura de base, incremento térmico y diferencia de razón de mezcla, junto a sus intervalos de variación representados por las respectivas desviaciones standard (Rutllant y Sippa, 1971).

Los fenómenos de subsidencia no se restringen solo a las escalas planetaria y sinóptica de los movimientos atmosféricos. También están presentes en las escalas regional y local. Por ejemplo, cuando una brisa de tierra llega al mar se produce una divergencia local causada por la disminución de fricción superficial que es compensada por un descenso del aire sobre la zona de discontinuidad.

Un ejemplo de subsidencia de escala regional lo constituye la divergencia de flujo en superficie que se produce a cierta distancia de la costa norte de Chile en que la dirección de los alisios comienza a ser modificada por la influencia térmica del continente.

El descenso del aire por una ladera montañosa puede considerarse como subsidencia forzada por el relieve si a sotavento del flujo de aire sobre la cadena montañosa se produce convergencia superficial. En estas condiciones el descenso forzado produce calentamiento y disminución de la humedad relativa, al igual que en el caso anticiclónico. Dependiendo de la intensidad de la convergencia superficial de sotavento, el aire caliente se depositará sobre el aire frío del valle o lo reemplazará completamente. Los vientos de tipo foehn como el terral y el zonda serían manifestaciones particularmente violentas de este fenómeno en que la configuración del relieve jugaría un papel primordial.

El análisis de los factores meteorológicos en la contaminación atmosférica de Santiago sobre la base de mediciones directas revela la importancia de condiciones meteorológicas especiales que tendrían asociadas inversiones térmicas particularmente bajas e intensas

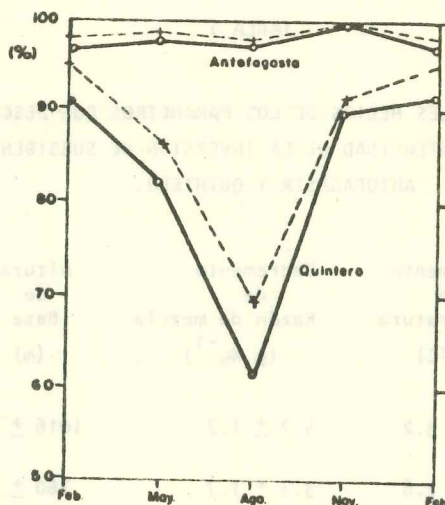


Fig. 1 Frecuencia de ocurrencia de inversiones de subsidencia para Antofagasta y Quintero a las 00Z (+---+) y 12Z (o---o) para cuatro meses representativos de las estaciones del año (adaptado de Rutllant y Sippa, 1971).

con vientos débiles. Estas situaciones, que se manifiestan asociadas a vaguadas o bajas barométricas cerradas con núcleo cálido en la zona central de Chile (Rutllant, 1973) son objeto de particular atención en este trabajo, presentándose evidencias de subsidencia forzada sobre la ladera andina occidental

A pesar de que la zona en estudio queda en altura inmersa en la corriente general de los oestes, se analizará aspectos teóricos que permitirían explicar la ocurrencia ocasional de flujos con componentes del E sobre la cordillera simultáneamente con una convergencia horizontal de flujo a sotavento cerca de la superficie. En este trabajo se mostrará que estos eventos pueden asociarse a profundas invasiones de aire polar que fácilmente alcanzan el sur de Brasil, como los ocurridos alrededor del 17 de Julio de 1975 y entre el 30 y 31 de Mayo de 1979 en que se registró un notable episodio de contaminación atmosférica en Santiago.

2. FLUJO DE AIRE SUPERIOR Y EFECTO DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES EN CHILE CENTRAL.

En la zona central de Chile comprendida entre los 30 y 40 grados de latitud, el flujo zonal medio en la mitad superior de la tropósfera cruza sobre la Cordillera de los Andes con una dirección oeste durante todas las estaciones del año (Schwerdtfeger y Martin, 1964). La componente meridional del flujo es consistente con ondulaciones más o menos pronunciadas de las líneas de corriente que en promedio llevan aire polar hacia el norte y aire tropical hacia el sur, permitiendo así el necesario intercambio de calor entre ambas zonas.

Un rasgo fundamental de estas ondulaciones en el flujo de los oestes es la inclinación de los ejes de vaguadas y dorsales en dirección NW a SE (Figura 2), configuración que

TABLA 1

VALORES ANUALES MEDIOS DE LOS PARAMETROS QUE DESCRIBEN LA POSICION E INTENSIDAD DE LA INVERSION DE SUBSIDENCIA PARA ANTOFAGASTA Y QUINTERO.

	Incremento de Temperatura (°C)	Decremento de Razón de mezcla (g Kg ⁻¹)	Altura de Base (m)	Espesor (m)
ANTOFAGASTA	6.0 ± 3.2	4.2 ± 1.7	1016 ± 274	324 ± 201
QUINTERO	3.6 ± 2.8	3.3 ± 1.7	760 ± 469	412 ± 234

permite en el Hemisferio Sur un transporte neto de cantidad de movimiento desde latitudes bajas a latitudes medias, manteniendo los oestes superficiales (ver por ej. Holton, 1972). Según Fuenzalida y Rosenbluth (1977) las ondas de longitud media (números de onda entre 5 y 8) son las responsables fundamentales de la transferencia latitudinal de cantidad de movimiento, longitud que es compatible con las configuraciones meteorológicas de altura descritas más adelante para el cono sudamericano.

Estas ondas de aire superior, que en buena medida controlan la evolución y desplazamiento de los sistemas de tiempo característicos de las latitudes medias, sufren variaciones de amplitud y longitud de onda en períodos muy variables. La escasa información de aire superior en grandes extensiones del Hemisferio hace difícil un diagnóstico completo sobre la frecuencia y características de esas fluctuaciones.

Taljaard (1972) ha resumido la información existente sobre diferentes maneras de estimar la intensidad de las fluctuaciones del flujo zonal en la corriente de los oestes para el Hemisferio Sur, incluyendo fenómenos de bloqueo anticiclónico y bajas segregadas frías. Del estudio de Taljaard y de resultados de otros trabajos de naturaleza empírica, puede extraerse las siguientes características :

- a) El carácter zonal del flujo de los oestes sería más permanente en el Hemisferio Sur que en el Hemisferio Norte, debido probablemente al carácter esencialmente oceánico del primero.
- b) En el Hemisferio Sur no existiría una correlación negativa definida entre la intensidad de las componentes zonal y meridional, por lo que la intensidad de uno de estos flujos no podría inferirse necesariamente de la intensidad del otro.

- c) Las mayores intensidades del flujo meridional ocurrirían de preferencia en invierno en las latitudes de nuestro interés y estarían asociadas a irrupciones de aire polar que alcanzarían con frecuencia el sur de Brasil; una extensión del anticiclón subtropical del Pacífico en forma de cuña hacia el SE, muchas veces con carácter prefrontal; una vaguada o baja cerrada con núcleo cálido en la zona central de Chile y una circulación en 500 mb con ondas de gran amplitud que ocasionalmente muestran bajas segregadas frías alrededor de los 30 S, pudiendo detectarse su ocurrencia a ambos lados de la cordillera.
- d) Los períodos con circulación zonal intensa podrían caracterizarse en superficie por los anticiclones subtropicales oceánicos bien desarrollados, la vaguada continental en la región del Chaco y el rápido desplazamiento de las perturbaciones móviles en el flujo de los oestes al S de los 45 grados de latitud. El carácter dominante zonal de este flujo queda bien caracterizado por las isohipsas de 500 mb.

Teóricamente, la amplificación de las ondas de los oestes que se observan en el campo de las alturas geopotenciales de 500 mb. se produciría cuando el campo térmico se atrasa con respecto al anterior. El ascenso delante de la vaguada, correspondiente a la divergencia que se produce en la tropósfera alta, es de aire cálido. Este proceso, unido al correspondiente descenso de aire frío al W del eje de la vaguada, libera energía potencial que se transforma en energía cinética de las perturbaciones, es decir, en un aumento de la intensidad del flujo meridional (amplitud de las ondulaciones del flujo zonal).

Siguiendo el campo de divergencia de flujo en las ondulaciones de la alta tropósfera, se alinean familias de depresiones móviles superficiales con sus característicos sistemas frontales. A cada una de estas perturbaciones se asocia una "onda corta" que se superpone a la de escala planetaria. El anticiclón frío en superficie correspondiente al último miembro de una familia se asocia a irrupciones de aire polar, como a las que se ha hecho referencia. Estos centros de alta presión son normalmente de desplazamiento más lento que los que separan dos depresiones de la misma familia y se manifiestan de preferencia sobre los continentes (ver por ej. Palmén y Newton, 1969).

Las cadenas montañosas orientadas en sentido meridional ejercen en general una influencia desviadora sobre el flujo zonal. Esta influencia puede atribuirse a razones de tipo mecánico, térmico, o una combinación de ambas.

Considerando las primeras, la teoría de la conservación de la vorticidad potencial en un flujo del oeste isentrópico y sin roce con líneas de corriente que se estrechan en la vertical al pasar sobre una cadena montañosa, predice la inducción de curvatura anticiclónica sobre la ladera de barlovento y una vaguada a sotavento.

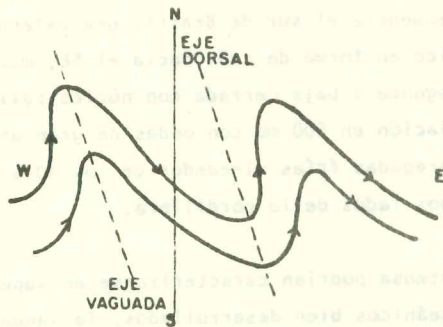


Fig. 2

Fig. 2 Configuración de las ondas de aire superior que permite una transferencia neta de cantidad de movimiento de N a S en latitudes subtropicales del Hemisferio Sur.

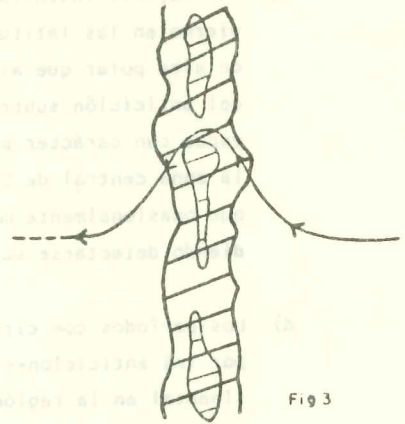


Fig. 3

Fig. 3 Cruce de una cadena montañosa orientada meridionalmente en el Hemisferio Sur por un flujo inicialmente del E (adaptado de Holton, 1972).

La existencia de vaguadas orográficas de sotavento en las grandes cadenas montañosas del Hemisferio Norte es un hecho bien comprobado. Palmén y Newton (1969) atribuyen a la escasa anchura transversal de la Cordillera de los Andes la supuesta ausencia de ese fenómeno en las latitudes medias de Sud América. Sin embargo Chung (1980), a partir del análisis de más de un centenar de ciclones de sotavento para el año 1973, muestra una ciclogénesis frecuente alrededor de los 31 S y 67 W, cerca de La Rioja, Argentina.

Según Chung, la ciclogénesis comienza bajo el borde delantero de un flujo difluente perpendicular a la barrera montañosa que se superpone a una zona de convergencia de bajo nivel y descenso orográfico. La causa básica de la iniciación de la ciclogénesis de sotavento la atribuye a una divergencia de masa neta en aire superior que sería inducida por la montaña. La etapa de intensificación comienza, según el autor, con la llegada de una vaguada en altura que pierde intensidad al cruzar sobre la cordillera. La mayoría de los ciclones formados en ese lugar son relativamente poco profundos y migran muy lentamente hacia el norte en una etapa inmediatamente posterior a su formación.

Estas depresiones de sotavento han sido también estudiadas por Lichtenstein (1980) encontrando una buena correlación entre la profundidad de la depresión y el espesor 1000-500 mb, lo que justifica la virtual desaparición del fenómeno sobre los 700 mb (850 mb en invierno). La depresión culminaría unas 16 horas antes del paso de una vaguada en 500 mb y dura en total del orden de cinco días con una rápida desaparición generalmente asociada al paso de un frente frío. Según Lichtenstein, el día de la culminación de la baja hay una probabilidad mínima de precipitación, lo que estaría asociado al descenso orográfico de sotavento.

La posibilidad de que un flujo del este cruce la cordillera es bastante limitada si suponemos la vigencia de la teoría de la conservación de la vorticidad potencial. Si no hay cambio en el cizalle horizontal del viento durante el cruce de la cordillera, las variaciones de la vorticidad relativa impuestas por el estrechamiento vertical de las líneas de corriente sólo deben reflejarse en cambios de curvatura. En estas circunstancias, que serían las más desfavorables, la única alternativa para que el aire cruce la barrera orográfica, considerando la variación latitudinal del parámetro de Coriolis, se da si el flujo adquiere previamente una curvatura ciclónica como la indicada en Figura 3. Esta configuración parece compatible con la inclinación de las vaguadas en altura que, en cierta posición sobre la cordillera, permitirían un flujo del SE con la necesaria curvatura ciclónica.

Satyamurty et al. (1980), mediante un modelo barotrópico con ecuaciones primitivas, muestran la generación de una vaguada inducida por los Andes cerca de la costa oriental de Sud América con una inclinación de eje NW - SE, que explicaría el máximo de precipitación asociado a frentes que se tornarían estacionarios hacia el NE de la vaguada. Esta zona de precipitación máxima coincide con la posición climatológica del frente polar dada por Taljaard (1972).

En cuanto a posibles influencias de tipo térmico cabe señalar que en verano se forma un anticiclón cálido en la alta tropósfera sobre la región del Altiplano Andino que se generaría por liberación de calor latente en las grandes tormentas que caracterizan en esa región el llamado "invierno boliviano" (Gutman y Schwerdtfeger, 1965).

3. VAGUADAS O BAJAS CERRADAS CON NUCLEO CALIDO EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE.-

Las condiciones meteorológicas con flujo meridional intenso acompañadas de una irrupción de aire polar desplazándose hacia el NE por territorio argentino, muestran con frecuencia una vaguada superficial o baja cerrada en las zonas norte y central de Chile. Esta configuración de baja presión, que parece estar relacionada con la vaguada continental transandina, alcanza en ocasiones hasta la isla Juan Fernandez por el poniente.

La Figura 4 ilustra un caso en que la invasión de aire frío afectó seriamente las plantaciones de café en el sur de Brasil (Parmenter, 1976). La carta de superficie muestra el intenso anticiclón frío con una presión central de 1045 mb y temperaturas bajo cero hasta unos 25 S sobre el territorio argentino. La vaguada sobre la zona central de Chile, que produce cielos despejados al S de los 30, está asociada a una zona de aire cálido que se puede apreciar como una zona oscura que afecta tanto el mar como el continente entre 30 y 35 S en la fotografía infrarroja correspondiente a la carta sinóptica de superficie.

Con el objeto de ilustrar el flujo de aire superior que acompañó esta situación, la Tabla 2 muestra la velocidad y dirección del viento a diferentes niveles de presión para Quintero y Mendoza, observándose componentes del E hasta más de 7000 m de altura en Mendoza (9

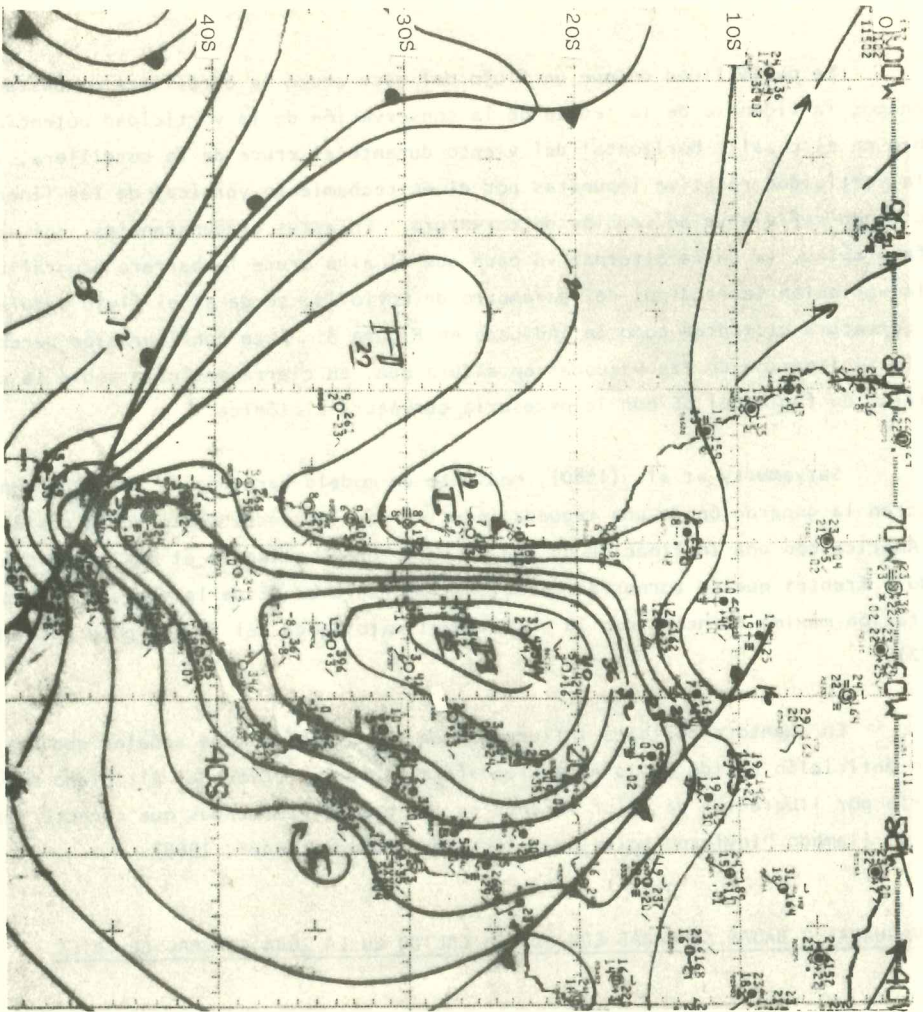


Fig. 4 Análisis de superficie del NMC (USA) para las 12Z del 17 de Julio de 1975 junto a la correspondiente foto en infrarrojo del satélite SMS - 1. Nótese la zona de aire caliente en la porción sur de la vaguada (adaptado de Parmenter, 1976)

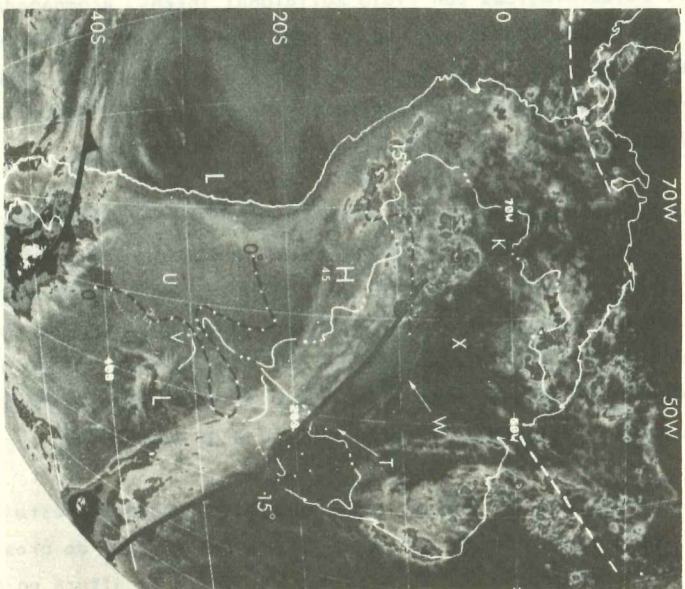


TABLA 2 DATOS DE VIENTO EN ALTURA PARA MENCOZA Y RADIOSENDEROS COMPLETOS PARA QUINTERO DURANTE UNA IRUPCIÓN DE AIRE POLAR EN EL SE DE BRASIL.

17/07/75 A LAS 00 Z										18/07/75 A LAS 00 Z										18/07/75 A LAS 12 Z									
N	PRESSION	ALTURA	TEMP	HUMED	VEL	DIR	PRESSION	ALTURA	TEMP	HUMED	VEL	DIR	PRESSION	ALTURA	TEMP	HUMED	VEL	DIR	PRESSION	ALTURA	TEMP	HUMED	VEL	DIR					
1	1020.0	7	10.0	85	0	128	1015.3	7	11.0	89	0	137	1012.7	7	2.9	85	0	137	1012.7	7	2.9	85	0	137	1012.7				
2	1000.0	172	11.5	69	1	128	1020.0	134	13.2	48	1	137	1000.0	111	13.6	62	1	137	1000.0	111	13.6	62	1	137	1000.0				
3	983.0	273	10.6	70	2	128	974.0	358	20.0	42	3	140	991.0	188	17.7	44	3	140	991.0	188	17.7	44	3	140	991.0				
4	950.0	600	13.6	44	4	159	931.0	565	22.9	32	4	144	972.0	355	22.8	37	3	144	972.0	355	22.8	37	3	144	972.0				
5	927.0	655	14.1	39	4	161	930.0	574	22.9	32	4	144	950.0	555	24.3	37	3	144	950.0	555	24.3	37	3	144	950.0				
6	930.0	745	15.5	36	3	160	926.0	797	23.0	28	5	148	949.0	564	24.4	37	5	126	949.0	564	24.4	37	5	126	949.0				
7	930.0	1055	14.6	36	3	127	930.0	1044	21.5	28	5	150	900.0	1026	22.0	37	8	145	900.0	1026	22.0	37	8	145	900.0				
8	800.0	1541	13.2	35	4	85	800.0	1536	18.4	30	4	148	850.0	1520	19.3	36	11	140	850.0	1520	19.3	36	11	140	850.0				
9	762.0	2039	11.3	35	4	144	760.0	2052	15.2	30	4	155	800.0	2038	15.4	36	10	137	800.0	2038	15.4	36	10	137	800.0				
10	762.0	2454	9.6	36	5	182	791.0	2148	14.5	31	4	157	750.0	2581	11.2	36	9	134	750.0	2581	11.2	36	9	134	750.0				
11	750.0	2556	8.7	36	4	182	750.0	2555	10.5	31	5	170	700.0	3152	6.6	37	5	131	700.0	3152	6.6	37	5	131	700.0				
12	700.0	3152	4.7	36	6	139	700.0	3163	5.3	33	3	162	650.0	3755	1.2	37	6	129	650.0	3755	1.2	37	6	129	650.0				
13	650.0	3751	0.3	36	9	123	650.0	3764	1.0	33	3	143	600.0	4392	-4.6	37	8	143	600.0	4392	-4.6	37	8	143	600.0				
14	600.0	4388	-1.4	36	17	143	600.0	4402	-3.7	33	3	195	550.0	4643	-9.8	37	4	158	550.0	4643	-9.8	37	4	158	550.0				
15	575.0	4667	-6.6	35	19	152	575.0	5310	-10.6	32	8	227	500.0	5066	-10.6	37	4	167	500.0	5066	-10.6	37	4	167	500.0				
16	550.0	5067	-8.5	35	20	152	550.0	5812	-15.4	34	11	231	450.0	5795	-15.5	37	12	221	450.0	5795	-15.5	37	12	221	450.0				
17	546.0	5124	-8.8	35	20	152	546.0	6599	-21.0	34	13	231	400.0	6583	-20.6	37	15	230	400.0	6583	-20.6	37	15	230	400.0				
18	500.0	5795	-14.3	35	23	164	500.0	7458	-27.4	34	17	236	350.0	7444	-26.5	36	18	236	350.0	7444	-26.5	36	18	236	350.0				
19	450.0	6386	-21.0	35	24	171	450.0	8230	-31.6	32	24	241	300.0	8161	-29.6	35	23	235	300.0	8161	-29.6	35	23	235	300.0				
20	400.0	7445	-28.5	35	25	173	400.0	8412	-32.8	32	25	241	250.0	8403	-31.6	35	25	235	250.0	8403	-31.6	35	25	235	250.0				
21	350.0	8390	-36.1	35	27	165	350.0	8409	-40.0	33	31	237	200.0	8614	-35.1	36	31	235	200.0	8614	-35.1	36	31	235	200.0				
22	320.0	8735	-39.5	35	30	174	320.0	9409	-40.3	33	31	237	150.0	9611	-40.0	36	28	233	150.0	9611	-40.0	36	28	233	150.0				
23	300.0	9433	-43.4	35	30	174	300.0	9477	-40.3	33	31	237	100.0	10657	-48.9	35	37	243	100.0	10657	-48.9	35	37	243	100.0				
24	250.0	10628	-55.0	35	24	176	250.0	10655	-50.0	33	45	230	50.0	12123	-59.5	35	47	246	50.0	12123	-59.5	35	47	246	50.0				
25	235.0	11019	-59.3	35	34	182	235.0	11116	-61.7	33	55	233	25	12916	-65.8	35	51	246	25	12916	-65.8	35	51	246	25				
26	200.0	12022	-62.4	35	37	188	200.0	12931	-67.9	33	55	229	26	12951	-65.8	35	51	246	26	12951	-65.8	35	51	246	26				
27	160.0	12668	-65.4	35	37	188	160.0	13175	-68.9	33	54	229	27	175.0	-65.8	35	51	246	27	175.0	-65.8	35	51	246	27				
28	175.0	12840	-65.1	35	51	192	175.0	13618	-68.3	33	43	227	28	163.0	-65.3	35	51	245	28	163.0	-65.3	35	51	245	28				
29	167.0	13125	-64.6	35	51	196	167.0	13853	-68.9	33	41	227	29	154.0	-66.7	35	51	243	29	154.0	-66.7	35	51	243	29				
30	157.0	13507	-59.4	35	51	188	157.0	14098	-67.6	33	44	227	30	13888	-65.3	35	51	243	30	13888	-65.3	35	51	243	30				
31	150.0	13792	-60.4	35	51	204	150.0	14268	-65.5	33	49	228	31	150.0	-63.4	35	51	243	31	150.0	-63.4	35	51	243	31				
32	130.0	14308	-63.9	35	49	206	130.0	14624	-67.4	33	50	228	32	125.0	-63.4	35	51	243	32	125.0	-63.4	35	51	243	32				
33	125.0	14518	-61.2	35	40	208	125.0	14953	-66.2	33	47	228	33	100.0	-62.6	35	51	243	33	100.0	-62.6	35	51	243	33				
34	121.0	15121	-60.2	35	38	208	121.0	15569	-63.8	33	42	228	34	80.0	-62.7	35	51	243	34	80.0	-62.7	35	51	243	34				
35	101.0	16235	-65.0	35	30	201	101.0	16316	-65.5	33	32	228	35	70.0	-62.8	35	51	243	35	70.0	-62.8	35	51	243	35				
36	100.0	16396	-64.5	35	29	202	100.0	16777	-64.3	33	35	228	36	60.0	-61.4	35	51	243	36	60.0	-61.4	35	51	243	36				
37	91.0	16870	-66.1	35	21	220	91.0	18496	-63.5	33	23	232	37	50.0	-59.6	35	51	243	37	50.0	-59.6	35	51	243	37				
38	80.0	17657	-62.8	35	21	231	80.0	19444	-63.2	33	15	218	38	40.0	-58.7	35	51	243	38	40.0	-58.7	35	51	243	38				

MENCOZA 16 de Julio de 1975 12Z

Presión	mb	850	700	500	400	300
Dirreción		140	160	150	120	220
ve ocidad	ms-1	5	5	17	27	30

horas del 16 de Julio) y en Quintero a las 20 horas del mismo día (17 de Julio a las 00Z). Este flujo se presenta solo hasta unos 4000 m de altura en los radiosondeos siguientes para Quintero conjuntamente con un fuerte calentamiento entre los niveles de 1000 y 500 mb y un descenso de más de 7 mb en la presión superficial. El calentamiento en la tropósfera baja alcanza su culminación en 950 mb llegando a unos 9°C en el período. Esto genera una fuerte inversión superficial que alcanza su máxima expresión el día 18, junto a un brusco descenso de humedad relativa con la altura.

En la vaguada o baja barométrica cerrada superficial que separa el anticiclón subtropical del Pacífico del anticiclón frío al E de la cordillera, podemos diferenciar esquemáticamente entre las condiciones meteorológicas asociadas a sus porciones NW y SE. En el seno de esta última la convergencia de flujo producida por el roce superficial induce vientos con componentes del E, mientras que en la mitad NW dominan las componentes del W y, para el caso de una configuración cerrada, las del norte (Figura 5).

La subsidencia forzada y la correspondiente advección cálida en la porción SE de la configuración bérica descrita produce un marcado descenso de la base de la inversión térmica que en la práctica no puede distinguirse de una inversión de subsidencia.

Comenzando este proceso, la intensificación de la baja superficial puede explicarse fácilmente por efecto térmico. La reducción del espesor de la capa de mezcla por advección cálida unida a los cielos despejados y a la sequedad del aire permite que la radiación solar produzca elevadas temperaturas superficiales. El calentamiento del aire adyacente así producido genera una convexidad adicional en el campo bérico que intensifica la divergencia en el seno de la inversión térmica ocasionando una disminución de la presión superficial. Por otra parte, la advección cálida refuerza la dorsal que naturalmente debe existir al oeste de la vaguada fría en la tropósfera media.

Mientras tanto en el sector noroccidental de la vaguada o baja cerrada superficial domina la advección de aire marino observándose al mismo tiempo una elevación de la base de la inversión de subsidencia por encima del promedio. Este proceso da origen a la frecuente penetración de densas capas de estratocúmulos hacia el interior cruzando la Cordillera de la Costa.

Dado que la baja barométrica se propaga normalmente hacia el sur, la secuencia de fenómenos asociada a los dos sectores de la baja puede experimentarse en diversos puntos de la zona central. Al respecto cabe hacer notar que las peores condiciones en cuanto a contaminación atmosférica se producen cuando el tiempo brumoso sigue a la acumulación de contaminantes en la delgada capa de mezcla asociada al sector SE de la baja.

La duración media del fenómeno descrito, desde la aparición de la vaguada y su intensificación hasta su disolución, muchas veces asociada a una entrada de aire frío, es de cinco a seis días. La propagación de la baja barométrica hacia el sur podría interpretarse como un proceso ondulatorio en que la energía de la perturbación queda atrapada entre la in-

versión de subsidencia y el relieve andino por el este. Esta teoría, planteada inicialmente por Gill (1977), trata de explicar un fenómeno aparentemente muy similar que se da en la costa occidental de Sud Africa en que las "bajas costeras" se propagan hacia el sur circundando incluso el borde austral del continente. Las características de este fenómeno han sido descritas por Preston-White (1975) de quien adaptamos el esquema representado en Figura 6 que tipifica el descenso de la base de la inversión durante la ocurrencia de este fenómeno. Recientemente Bannon (1980) ha presentado resultados de un modelo de generación de "bajas costeras" en Sud Africa en que la función forzante es un campo zonal de vientos. La perturbación resultante tiene características muy similares a las ondas de Kelvin propuestas por Gill.

Los vientos débiles asociados a estas situaciones meteorológicas pueden explicarse considerando que en el centro de la baja barométrica dominan las componentes verticales y que en su periferia el viento térmico tiene la dirección opuesta al viento superficial. Por lo demás, la fuerte inversión térmica es muy efectiva en aislar la capa mezclada de la tropósfera media

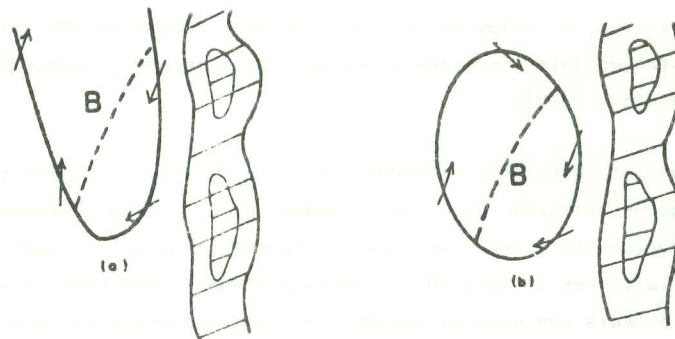


Fig. 5 Configuración esquemática de vaguada (a) y baja cerrada (b) mostrando el campo de vientos en superficie y la separación de una zona de advección cálida y seca al SE de otra con advección de aire marino al NW.

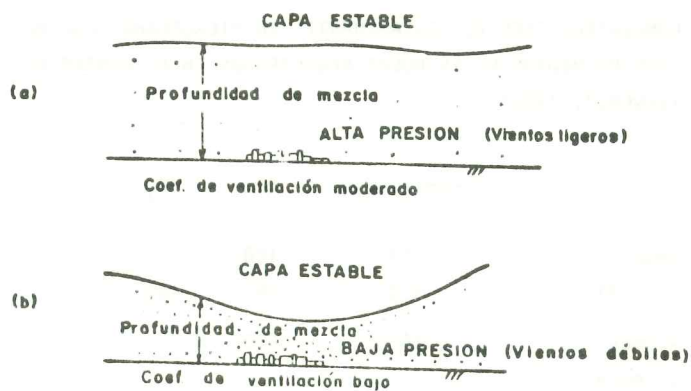


Fig. 6 Diagrama esquemático que muestra la transición entre una configuración anticiclónica (a) y una de baja barométrica con núcleo cálido mostrando la acumulación de contaminantes por bajo coeficiente de ventilación (b). (Adaptada de Preston-White, 1975)

4. UN EPISODIO DE CONTAMINACION ATMOSFERICA EN SANTIAGO.-

Durante los días 30 y 31 de Mayo de 1979, Santiago registró un episodio de alta contaminación atmosférica que mereció un lugar destacado en toda la prensa santiaguina. Desde tenebrosos titulares de primera plana hasta alarmantes editoriales, huídas del público en el centro de la ciudad hasta lugares más aireados (La Tercera, 31 de Mayo) y anuncios de drásticas medidas por parte de las autoridades en el control de emisiones y circulación de vehículos; retrataron en forma vehemente la alta dosis de contaminantes que se acumuló durante esos días en la atmósfera santiaguina.

Para los efectos de mostrar la magnitud del problema general así como la gravedad del episodio que analizamos desde un punto de vista meteorológico, la Tabla 3 muestra valores de concentración de partículas, anhídrido sulfuroso y óxidos de nitrógeno como promedios de 24 horas registrados en el centro de Santiago durante los días 29 y 31 de Mayo. Adicionalmente se incluye valores máximos tolerados por las normas nacionales y, para el caso de las partículas en suspensión, el valor medio y desviación standard de 200 valores medios diarios obtenidos en la estación antes indicada en el período comprendido entre Noviembre de 1976 y Julio de 1980 (Sánchez, 1980).

A modo de introducción se presenta en Figura 7 una fotografía tomada por el satélite meteorológico geoestacionario SMS 1 en la banda infrarroja que muestra una invasión de aire frío en el sudeste brasilero y un área con temperaturas relativamente altas sobre Chile Central entre las latitudes de 28 y 40 S. De esta imagen puede también inferirse una vaguada en la tropósfera media con orientación NW - SE cuyo eje cruza la cordillera alrededor de los 25 S.

TABLA 3

CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES EN MICROGRAMOS POR METRO CUBICO COMO PROMEDIOS DE 24 HORAS REGISTRADOS EN EL CENTRO DE SANTIAGO (SANCHEZ, 1980).

	PARTICULAS	SO ₂	NO _x
Mayo 29	213	108	53
Mayo 31	358	193	183
Normas 24 horas	260	420	
Promedio 24 horas	243		
Desv. Std. 24 horas	116		

↑ 00:01 30MY79 12A-Z 0006-1640 FULL DISC IR

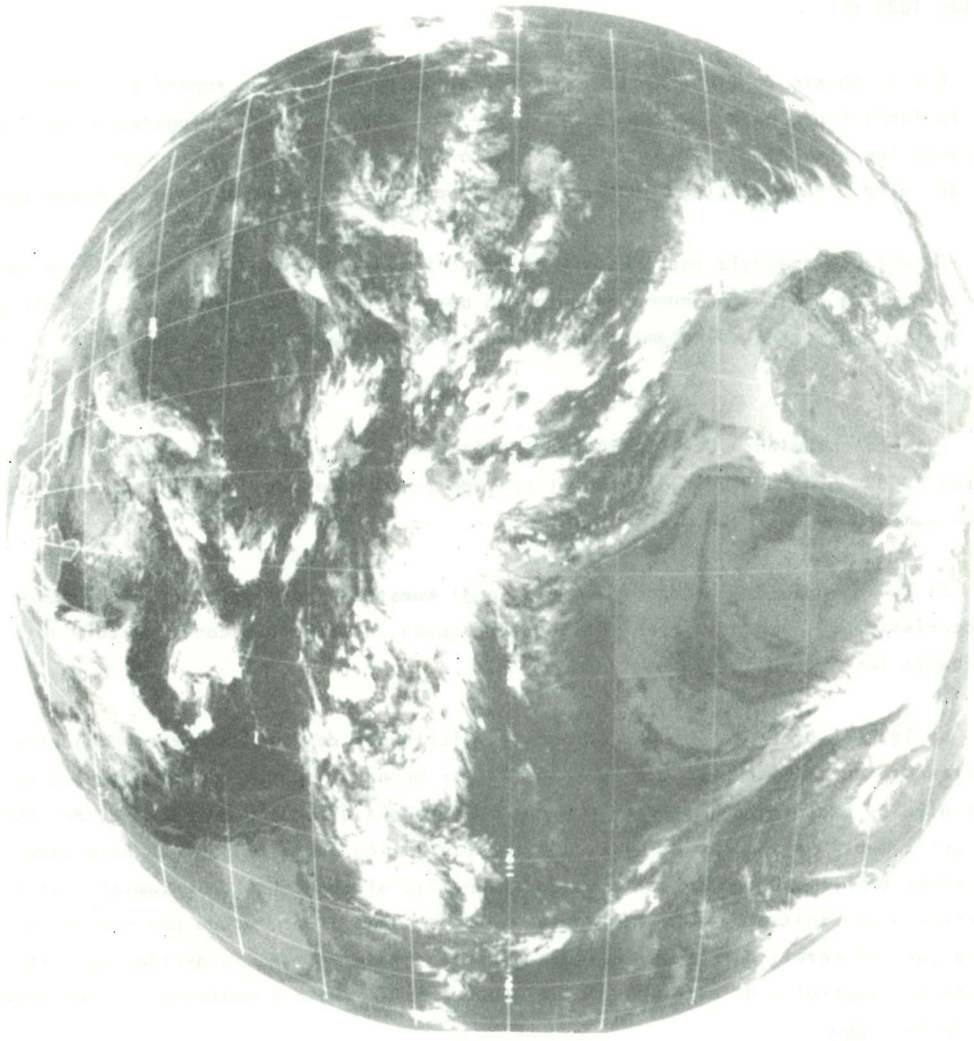


Fig. 7 · Fotografía Infrarroja tomada a las 00Z del día 30 de Mayo de 1979 por satélite meteorológico geostacionario SMS 1.

La carta sinóptica correspondiente a las 12Z del día 30 se presenta en la Figura 8, destacándose la vaguada superficial en etapa de profundización. Los vientos sobre el océano, que han sido obtenidos mediante fotografías de satélites a partir del desplazamiento de nubes bajas, muestran una inequívoca componente del E mientras las presiones sobre el NW argentino superan los 1028 mb.

Con el objeto de ilustrar la intensificación de la vaguada superficial sobre Chile central, la Tabla 4 presenta las presiones a nivel del mar en diversos lugares a las 8 horas (12Z) durante los días 29, 30 y 31 de Mayo. Junto a los valores de presión se incluye la temperatura del aire. Para Santiago aparecen las temperaturas extremas durante el mismo período.

La notable analogía entre esta configuración y la representada en Figura 4 se hace también extensiva a los radiosondeos de Quintero durante el período estudiado. En efecto, la Figura 9 muestra un fuerte calentamiento similar al comentado para la situación del 17 de Julio de 1975.

Este calentamiento de la atmósfera se hace aun más evidente al analizar la evolución del espesor 1000 - 500 mb (Tabla 5). En el período de 60 horas que se analiza, el espesor de dicha capa aumentó en casi 200 m.

El radiosondeo de Quintero para el día 31 muestra el comienzo de la advección húmeda, característica del sector norponiente de la vaguada superficial, con cobertura total de estratos hasta los 990 mb.

La Tabla 5 presenta las direcciones y velocidades del viento correspondientes a los niveles standard de presión. El día 30 a las 12Z se observa vientos con componentes del E en todos los niveles exceptuando el de 850 mb que muestra una dirección del NW y el de 1000 mb en que prácticamente se observa calma. Esta característica de la tropósfera baja parece típica de la etapa de profundización de la vaguada superficial en que al calentamiento producido por el descenso generalizado sobre la ladera andina se suma el producido por radiación sobre la delgada capa de mezcla durante el período diurno. El aumento en la oscilación térmica diaria durante el desarrollo de este proceso se ilustra en la Tabla 4 mediante las temperaturas extremas de Santiago.

En altura, la evolución del viento es hacia el cuadrante del SW a medida que la vaguada de altura se desplaza hacia el oriente.

Otro aspecto importante de destacar consiste en que las componentes del E parecen comenzar a aparecer primeramente cerca de la superficie sugiriendo que la convergencia superficial se establece con antelación a la posición favorable de la vaguada en altura.

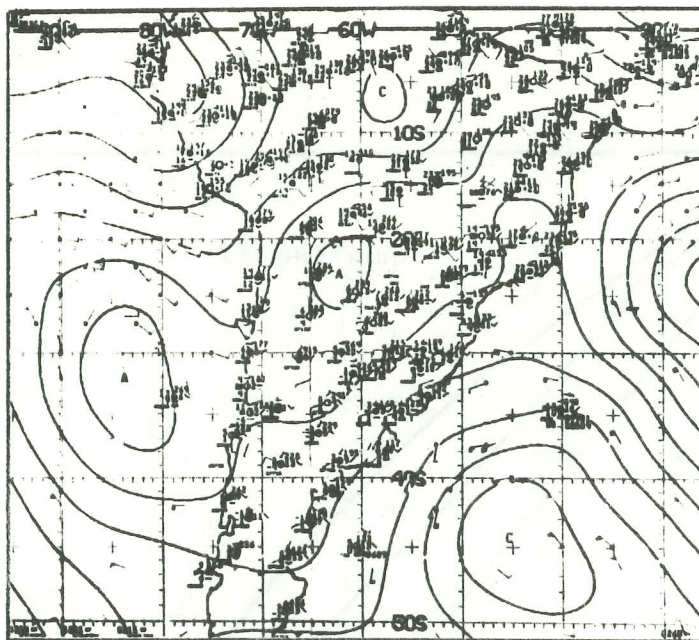


Fig. 8 Análisis meteorológico de superficie del NMC (USA) para el 30 de Mayo de 1979 a las 12Z.

TABLA 4

PRESIONES A NIVEL DEL MAR Y TEMPERATURAS A LAS 8 HORAS (LOCAL) EN DIVERSOS LUGARES PARA LOS DIAS 29, 30 Y 31 DE MAYO DE 1979. PARA ESOS DIAS APARECEN TEMPERATURAS EXTREMAS EN SANTIAGO.

		29	30	31
Antofagasta (23°26' S; 70°26' W)	Presión (mb)	1016.3	1017.7	1016.1
	Temper. (°C)	12	14	14
Chañaral (26°21' S; 70°41' W)	Presión	1019.1	1019.9	1019.7
	Temper.	12	13	13
Coquimbo (29°57' S; 71°22' W)	Presión	1017.8	1017.7	1016.3
	Temper.	9	6	7
Quintero (32°47' S; 71°32' W)	Presión	1020.1	1018.0	1015.4
	Temper.	7	4	3
I. Juan Fdez. (33°37' S; 78°50' W)	Presión	1030.1	1026.9	1021.8
	Temper.	14	13	10
Concepción (36°46' S; 73°04' W)	Presión	1027.4	1022.8	1017.7
	Temper.	4	5	4
Santiago (33°26' S; 70°41' W)	T. Max. (°C)	15.4	22.9	24.9
	T. Min (°C)	3.0	0.9	1.5

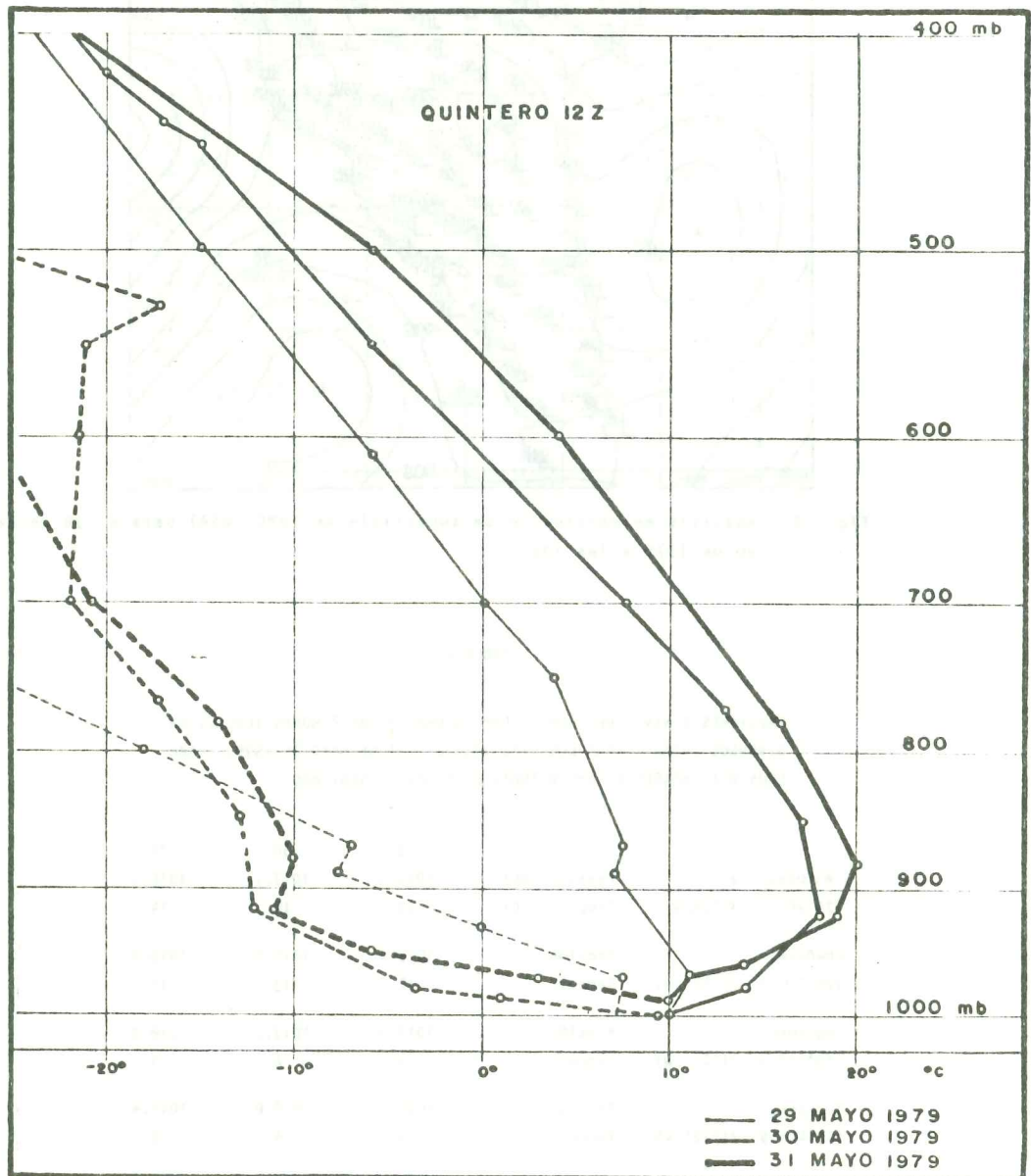


Fig. 9 Perfiles verticales de temperatura y punto de rocío a las 12Z para los días 29, 30 y 31 de Mayo de 1979 en Quintero.

TABLA 5

DIRECCIONES (GRADOS) Y VELOCIDADES (NUDOS) DEL VIENTO EN QUINTERO PARA LOS NIVELES STANDARD DE PRESION. SE INCLUYE ADEMAS LA COBERTURA DE NUBOSIDAD BAJA Y EL ESPESOR 1000 - 500 mb. PERIODO : DEL 29 AL 31 DE MAYO DE 1979.

Día	Hora Z	NIVEL DE PRESION (mb)					NUB. BAJA	1000 - 500 mb (mgp)
		1000	850	700	500	300		
29	00	175/12	170/6	200/10	200/77	200/80	⊙	5532
29	12	155/3	160/17	170/12	185/54	180/73	○	5558
30	00	175/12	150/11	145/14	270/45	-	○	5638
30	12	110/1	335/14	160/18	170/38	170/50	○	5682
31	00	310/1	350/8	80/4	205/27	205/28	○	5700
31	12	100/2	335/3	320/7	250/18	245/38	●	5727

5. CONCLUSIONES.

El estudio de dos situaciones sinópticas muy similares complementado con consideraciones teóricas que permiten por una parte representar un cuadro físico coherente y por otra suplir en parte la falta crónica de datos meteorológicos de escala sinóptica y mesoescala, nos lleva a identificar configuraciones meteorológicas que estarían asociadas a las peores condiciones de ventilación en la zona central de Chile.

Estas configuraciones podrían caracterizarse por un descenso de aire en la vertiente andina occidental que sería inicialmente forzado por convergencia superficial. Esta, a su vez, se produciría en relación a la formación de una zona de baja presión entre el anticiclón del Pacífico y un anticiclón frío de fin de familia que se desplaza por territorio argentino en dirección al NE.

La intensificación del fenómeno se desencadenaría cuando la vaguada en altura asociada a la alta fría superficial se ubica en posición favorable para que el flujo de aire cruce la cordillera desde el E, produciéndose así un descenso generalizado. El calentamiento diurno por radiación sería una contribución adicional en este proceso de intensificación.

La propagación de este fenómeno hacia el sur parece desarrollarse en forma ondulatoria quedando la energía del sistema confinada entre la inversión térmica y la vertiente andina. En este sentido, la propagación hacia el norte de las bajas de sotavento argentinas y la trayectoria de las bajas costeras sudafricanas que circundan el extremo austral del continente parecen ser fenómenos similares.

Al margen de la evidente importancia de este fenómeno en la climatología y pronóstico de condiciones adversas a la difusión de contaminantes atmosféricos en la zona central de Chile entre Serena y Concepción, hay otros aspectos importantes como las entradas de nubosidad baja, ocurrencia de períodos con mala visibilidad y vientos de tipo foehn como el terral del norte chico, que obedecerían a manifestaciones del mismo fenómeno.

Por otra parte, un estudio del clima para la región del Bío-Bío realizado por Devynck (1970) señala las condiciones de vaguada en la zona central de Chile como características de buen tiempo invernal en esa región.

Un estudio preliminar para evaluar la frecuencia de ocurrencia de estas condiciones meteorológicas en Chile Central para distintas épocas del año se ha iniciado recientemente. Para ello se está analizando 20 años de radiosondeos diarios en Quintero con el fin de detectar la ocurrencia de inversiones de subsidencia que comienzan a partir de los 1000 mb. Paralelamente se está realizando mediciones con microbarógrafo y determinación de vientos en altura con globos piloto, simultáneamente en Santiago y Concepción, para situaciones meteorológicas escogidas. Estos trabajos corresponden a una etapa preliminar de un Proyecto a desarrollarse próximamente entre las Universidades de Chile y Concepción.

Otro aspecto que merece un estudio detallado es el de la circulación a través de la Cordillera de los Andes mediante seguimiento de globos de nivel constante que permitan definir trayectorias en diferentes condiciones meteorológicas y verificar así suposiciones en las que se basa el esquema presentado. Este aspecto debería ser objeto de un programa cooperativo internacional.

Un esfuerzo en este sentido, utilizando datos de una sección aerológica transversal alrededor de los 33 S, se comenzó mediante la realización de una campaña de mediciones con radiosondas en El Monte y Farellones en Abril de 1980, trabajo en el que participan las Universidades de Chile y Concepción.

Finalmente, y volviendo al aspecto de contaminación atmosférica, el conocimiento de cada una de las fases y mecanismos del fenómeno que aquí se ha comentado permitiría desarrollar técnicas de pronóstico objetivo de situaciones potencialmente peligrosas. Un esquema de este tipo podría implementarse en combinación con un monitoreo permanente de la profundidad de la capa de mezcla en Santiago, por ejemplo mediante un sondaador acústico.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.-

- BANNON, P.R., 1980 : Synoptic Scale forcing of coastal lows.
Preprints Second Conference on Coastal Meteorology
Los Angeles, California, Jan., 30 - Feb. 1, 1980
- CHUNG, YONG-SEUNG, 1980 : An investigation of lee cyclogenesis and behaviour of upper
airflows in large scale mountains. Occasional Papers # 1. Inst. of Geosciences.
The University of Tsukuba, Japan.
- DEVYNCK, J.L., 1970 : Contribución al estudio de la circulación atmosférica en Chile y el
clima de la Región del Bío-Bío.
Departamento de Geofísica. Universidad de Concepción
- FUENZALIDA, H. y B. ROSENBLUTH, 1977 : Análisis espectral de los transportes de calor y
momento angular en la atmósfera del Hemisferio Sur.
Rev. Geofísica IPGH N°6 pp 133-153.
- GILL, A.E., 1977 : Coastally trapped waves in the atmosphere.
Quart. J. Roy. Met. Soc. 103, 431-440
- GUTMAN, G.J. and SCHWERDTFEGER W., 1965 : The role of latent and sensible heat for the
development of a high pressure system over the subtropical Andes, in the summer.
Meteorol. Rundsch. 18 (3) 69-75.
- HOLTON, J.R., 1972 : An Introduction to Dynamic Meteorology. Academic Press.
- LICHTENSTEIN, E., 1980 : La depresión del noroeste argentino en relación a las ondas de
los oestes.
XI Reunión Científica. Asoc. Argentina de Geofísicos y Geodestas.
Tucuman. 13 al 18 de Octubre 1980.
- PALMEN E. and C.W. NEWTON, 1969 : Atmospheric Circulation Systems. Academic Press.
- PARMENTER, F. 1976 : A Southern Hemisphere cold front passage at the equator.
Bull. Amer. Met. Soc. 17 (12) 1435-1440.
- PRESTON-WHITE, R.A., 1975 : A note on some bioclimatic consequences of coastal lows.
S. Afric. Geogr. J. 57, 17-25.

- RUTLLANT, J. y J. SIPPA, 1971 : Algunas características de la inversión de subsidencia del anticiclón subtropical.
I Seminario de Meteorología. Santiago. 18 al 20 Marzo, 1971.
- RUTLLANT, J., 1973 : Factores meteorológicos en la contaminación atmosférica de Santiago : Resultados de las mediciones 71-72.
Publ. 164. Depto. Geofísica. Universidad de Chile. Mayo 1973.
- RUTLLANT, J., 1979 : Meteorología de mesoescala en problemas de contaminación atmosférica urbana. Comparación entre condiciones potenciales en Santiago y Concepción.
Tralka 1(1) 10-22.
- SANCHEZ, L., 1980 : Comunicación Personal.
- SATYAMURTY, P., DOS SANTOS, R.P., LEMES, M.A.M., 1980 : On the stationary trough generated by the Andes.
Mon. Weather Rev. 108, 510-520.
- SCHWERDTFEGER, W. and D.W. MARTIN, 1964 : The zonal flow of the free atmosphere between 10 N and 80 S, in the South American sector.
J. of Applied Met. Vol. 3 Dec. 1964. 726-733.
- TALJAARD, J.J., 1972 : Synoptic Meteorology of the Southern Hemisphere, in Meteorology of the Southern Hemisphere (C.W. Newton, ed.). Meteorological Monographs. 13 (35).