

FACTORES METEOROLOGICOS QUE INFLUYEN EN LA CONTAMINACION ATMOSFERICA Y CONDICIONES EXISTENTES EN SANTIAGO.

Pablo Ulriksen

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

RESUMEN

Se presenta el modelo gaussiano de dispersión de contaminantes en la atmósfera y se analiza la influencia de la estabilidad vertical de la atmósfera, inversiones de temperatura, obstáculos y ciertos procesos que afectan las concentraciones de contaminantes.

Las condiciones meteorológicas de Santiago son caracterizadas con los resultados de un análisis estadístico de direcciones y velocidades de viento y categorías de estabilidad atmosférica y con algunas mediciones del perfil vertical de temperatura mediante radiosondas.

Los niveles de contaminación medidos en Santiago indican la gravedad del problema, que debe ser resuelto a través de un estudio del efecto de los diferentes factores que influyen en la contaminación atmosférica.

ABSTRACT

METEOROLOGICAL FACTORS OF AIR POLLUTION AND CONDITIONS EXISTING IN SANTIAGO.

A general description of the gaussian air pollution dispersion model is given and the effects of atmospheric stability, temperature inversion layers, topography and other processes affecting pollutant concentration are presented.

Meteorological conditions in Santiago are characterized by a statistical analysis of wind direction and velocity, atmospheric stability categories and by some vertical temperature profiles obtained with radiosondes.

Air pollution concentrations measured in Santiago show a serious problem which must be studied on an interdisciplinary approach.

-
- (1) Una parte de este trabajo fué presentada en las "Conferencias sobre Contaminación Atmosférica de Santiago", organizadas por el Centro de Alumnos del Depto. de Mecánica, Auditorium de IDIEM, Facultad de Cs. Fs. y Mat. U. de Chile. 22 de junio de 1979.

1. FACTORES METEOROLOGICOS QUE INFLUYEN EN LA DISPERSION DE CONTAMINANTES.

1.1 Modelo básico de difusión.

Los contaminantes atmosféricos son emitidos por una gran variedad de fuentes, entre las cuales se pueden mencionar las chimeneas industriales, los vehículos, las emisiones residenciales (calefacción y cocina), los incineradores y calderas de edificios, procesos de molienda de minerales, movimiento de tierra, etc. Las fuentes pueden ser fijas o móviles; puntuales (chimeneas), lineales (carreteras y avenidas muy transitadas) o extendidas.

En una ciudad se dan todos estos tipos de fuentes emisoras. Para tratar en forma analítica el problema, las fuentes extendidas se suelen reducir a una colección de fuentes puntuales. Las emisiones residenciales y vehiculares se consideran proporcionales a la densidad de población y a la densidad de tránsito respectivamente y se tratan en forma puntual dividiendo el área en una malla regular, en que cada cuadrícula está representada por una fuente ubicada en su centro. El paso de la malla varía según el detalle con que se desea tratar el problema y usualmente está comprendida entre 1 y 5 km. Las emisiones industriales más importantes se tratan como fuentes puntuales y el resto se incorpora a las fuentes extendidas. Las avenidas muy transitadas pueden tratarse separadamente del resto del tránsito vehicular.

El modelo básico de difusión de contaminantes desde una fuente puntual supone que las propiedades de la atmósfera no cambian en el tiempo, la velocidad del aire es constante y las características turbulentas de la atmósfera se conservan a lo largo de la dimensión horizontal y de la dimensión vertical. Bajo estas suposiciones, el penacho producido por una chimenea tiene una distribución gaussiana de concentraciones en torno a su eje, disminuyendo éstas desde el centro hacia los bordes (Fig. 1). La distribución espacial de concentraciones queda dada por:

$$X = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \left[e^{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}} \right]$$

en que $X(x,y,z)$ son las concentraciones (por ej. , en g/m³).

Q es la tasa de emisión de contaminantes por la chimenea (g/s).

u es la velocidad del aire (m/s), paralela al eje X de coordenadas.

σ_y y σ_z son parámetros de dispersión (en m) que dependen de las características turbulentas de la atmósfera y la distancia a la fuente.

H es la altura del eje del penacho sobre la superficie (m).

El valor de los parámetros de dispersión σ_y y σ_z aumenta con la distancia a la fuente emisora y determinan el ancho del penacho según el eje Y (coordenada horizontal transversal) y según el eje Z (coordenada vertical) respectivamente. La exponencial en términos de " y " define la disminución lateral de concentraciones, mientras que las exponenciales en " z " representan la dispersión vertical del penacho emitido por la fuente y el efecto de la reflexión en el suelo respectivamente.

Para este modelo básico los factores meteorológicos que interesan en la dispersión de contaminantes son la dirección del viento, que determina el sector hacia el cual se dirige el penacho, la velocidad del viento (u) de la cual dependen las concentraciones en forma inversamente proporcional y los parámetros de dispersión (σ_y y σ_z). La influencia de otros factores meteorológicos sobre la contaminación atmosférica se verá más adelante.

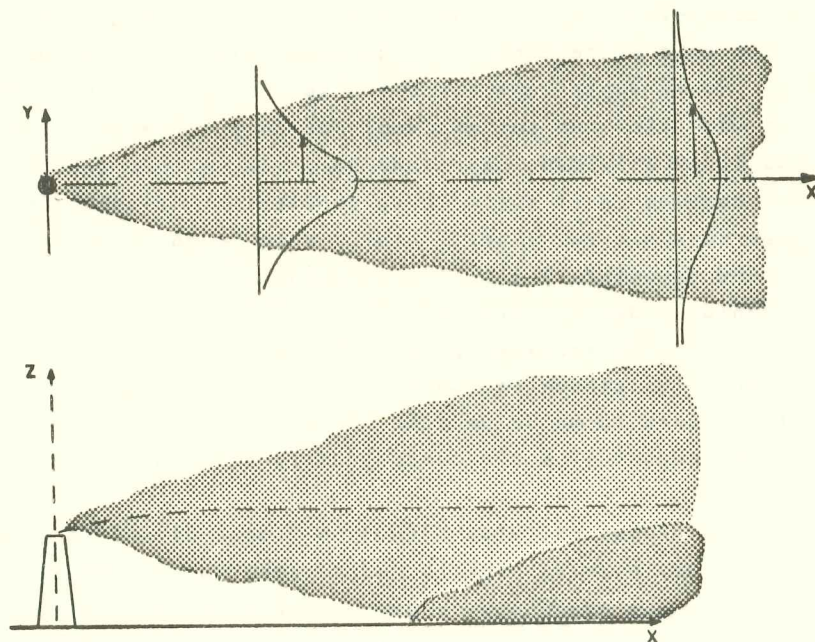


FIG. 1 Esquema del modelo de difusión de un penacho.

1.2 Estabilidad vertical de la atmósfera y parámetros de dispersión.

La estabilidad vertical de la atmósfera puede analizarse a través de las propiedades que adquiere un elemento de aire que es forzado a ascender. El aire es un gas que se comporta en forma casi ideal y al ascender disminuye su temperatura por la disminución de la presión. Si la temperatura que adquiere el elemento de aire a ese nuevo nivel es igual a la temperatura de su entorno, la atmósfera tiene una condición neutra de estabilidad. Si la temperatura del elemento de aire es mayor que la del entorno, aparece una fuerza de empuje por la diferencia de densidades que tiende a separarlo más aún de su nivel inicial. En este caso, la atmósfera es inestable, pues cualquier pequeña perturbación que desplace a los elementos de aire de sus niveles originales hará que ellos se alejen indefinidamente de éstos. Por otra parte, si la temperatura que adquiere el elemento de aire al ascender es menor que la de su entorno, aparecerá una fuerza por la diferencia de densidades que tenderá a restituir al elemento a su nivel original. En este caso, la atmósfera es estable. En la Fig. 2 se muestran estas tres condiciones de estabilidad vertical de la atmósfera.

Las condiciones de inestabilidad de la atmósfera pueden mantenerse sólo si el suelo está entregando continuamente calor a través de un proceso de convección. En la superficie terrestre se producen sectores más calientes y sectores más fríos que sus entornos debido a variaciones de las propiedades térmicas (conductividad, capacidad calórica, absorción de radiación solar, etc.) por cambios en el suelo en su pendiente y orientación o por cambios en la cobertura natural y artificial. A lo largo de la trayectoria de un penacho en una atmósfera inestable, se establecen sucesivamente corrientes de aire ascendentes y descendentes que lo hacen subir y bajar (Fig. 2). De este modo, la dispersión vertical para períodos largos de tiempo es bastante grande, aún cuando las concentraciones instantáneas en las cercanías del penacho son altas. Esta forma de penacho es característica de las horas de mayor insolación, cuando el suelo puede transferir calor a la atmósfera.

Las condiciones estables tienden a frenar el intercambio de partículas entre distintos niveles, por lo que el penacho de humo se dispersa muy poco verticalmente. La atmósfera es generalmente estable durante las noches despejadas y calmas en que el enfriamiento del suelo por radiación hace descender su temperatura y la de las capas cercanas a él.

Las condiciones de neutralidad se producen por la mezcla vigorosa del aire a distintos niveles. Esto ocurre cuando la velocidad del viento es

grande, generandose turbulencia de origen mecánico. En este caso, el penacho tiene una forma cónica característica y la dispersión es intermedia entre la de atmósfera estable y la de atmósfera inestable. Estas condiciones se dan con viento fuerte o con cielo cubierto por una capa de nubes que impida el calentamiento del suelo durante el día o el enfriamiento durante la noche.

Las condiciones de estabilidad de la atmósfera influyen en forma similar sobre la dispersión vertical y la dispersión lateral. La excepción a la similitud de los comportamientos de σ_y y σ_z se produce en condiciones de viento muy débil y gran estabilidad. En este caso la dispersión vertical es muy pequeña, pero el aire tiende a fluir horizontalmente en forma de meandros, lo que aumenta la dispersión lateral.

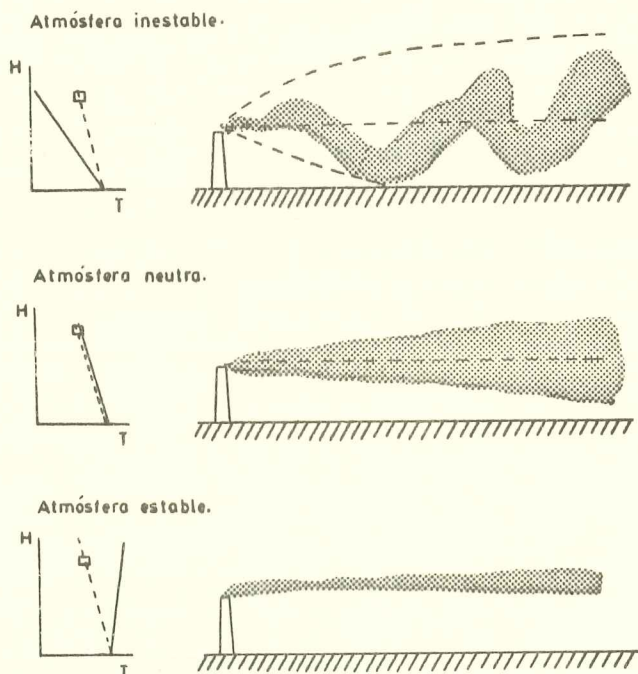


FIG. 2 Formas características de penachos y relación con el perfil vertical de temperatura.

1.3 Límites a la dispersión vertical y horizontal.

La superficie de la tierra es el límite inferior a la dispersión vertical de contaminantes. También puede existir un límite superior, en presencia de una capa de aire estable cuya base se ubica a cierta altura sobre la superficie. Este caso está representado por un aumento de la temperatura con la altura en una capa denominada de "inversión de temperatura" (Fig. 3), en la cual el aumento brusco de la estabilidad atmosférica que se produce en su base impide el paso de partículas hacia arriba. El penacho queda así atrapado bajo la capa de inversión de temperatura. El peor caso se produce cuando la capa de inversión se ubica justo por encima de la chimenea, reduciendo al mínimo el espesor de la capa donde se produce la dispersión.

Las inversiones de temperatura pueden producirse por diversos mecanismos (ver p. ej. Rutllant, 1979). Ellas representan una transición entre dos masas de aire: una más fría por debajo de la inversión y otra más cálida por encima. Algunos sistemas meteorológicos como los anticiclones subtropicales presentan asociados a ellos inversiones de temperatura bien marcadas.

Una inversión en altura también puede producirse por destrucción desde abajo de una inversión superficial. En una noche despejada, la pérdida de calor del suelo por radiación puede llegar a producir una capa de inversión que se extienda desde la superficie hasta algunos cientos de metros sobre ella. A la salida del sol, el suelo empieza a calentarse y el aire cerca de él va transformándose, destruyendo la inversión desde abajo hacia arriba. Para una chimenea dada, hay un momento en este proceso en que se produ-

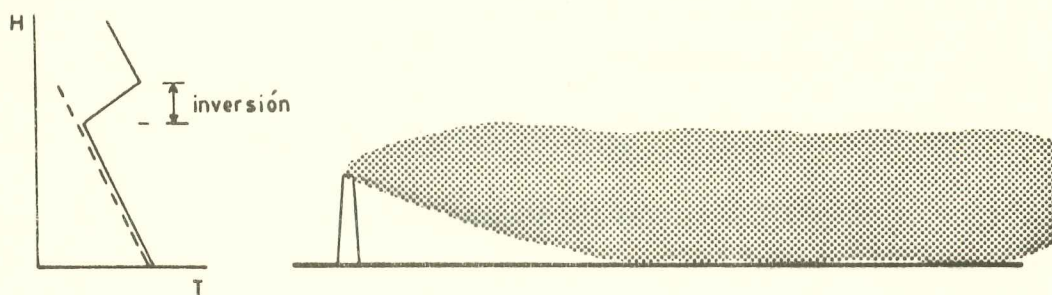


FIG. 3 Atrapamiento de un penacho bajo una capa de inversión de temperatura.

cen las peores condiciones de dispersión, cuando la base de la inversión llega a la altura de la chimenea y el contaminante es dispersado vigorosamente hacia el suelo.

Las limitaciones a la dispersión horizontal se producen en presencia de cerros u otros obstáculos. El comportamiento de un penacho cerca de un cerro es diferente bajo condiciones estables o inestables. (Fig. 4). Durante el día, el penacho puede sobrepasar el cerro ayudado por los procesos de convección. En la noche, las condiciones de estabilidad hacen que el penacho se mantenga a un nivel constante y rodee el cerro.

Dentro de un valle, el eje del penacho suele orientarse a lo largo de él y la dispersión lateral queda limitada por las laderas. Una condición muy desfavorable puede producirse cuando ocurre una inversión elevada que limita además la dispersión vertical.

1.4 Efecto de la altura de las chimeneas y ascenso de los penachos.

Las concentraciones de contaminantes a nivel del suelo pueden reducirse aumentando la altura de la fuente emisora (Fig. 5). Para chimeneas más altas, el máximo de concentraciones a nivel del suelo se produce más lejos y es menor que los máximos producidos por fuentes más bajas de igual intensidad.

Un efecto adicional se consigue con el ascenso de penachos calientes, por empuje térmico. La altura efectiva del eje del penacho puede ser bastante mayor que la altura de la chimenea. El ascenso de penachos calientes depende de la temperatura y cantidad de gases emitidos, según la relación (Briggs, 1969):

$$\Delta H \propto \left[\frac{T_o - T_a}{T_o} V_o \right]^{1/3}$$

en que ΔH es el ascenso del penacho

T_o es la temperatura de los gases a la salida de la chimenea.

T_a es la temperatura de la atmósfera y

V_o es el flujo de salida de gases

Por lo tanto conviene tener chimeneas altas y además aumentar la altura efectiva de los penachos emitiendo los gases por una sola chimenea (mayor flujo) a la mayor temperatura posible.

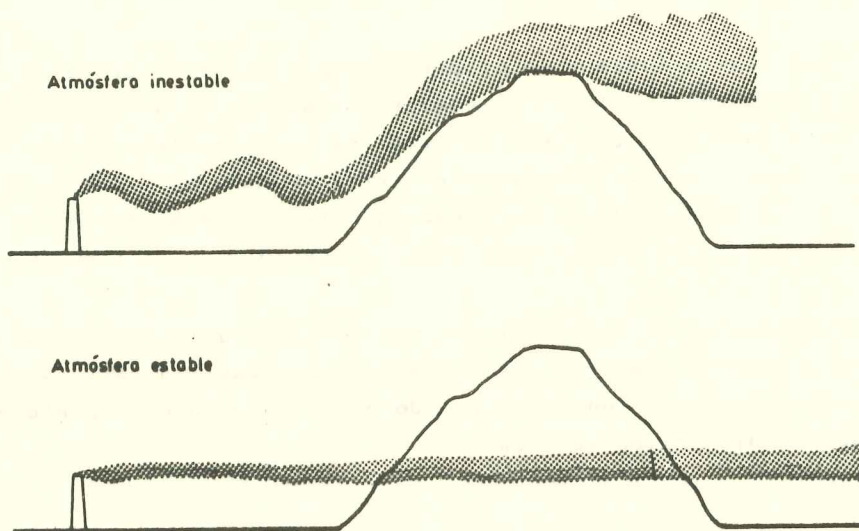


FIG. 4 Comportamiento de un penacho en presencia de un obstáculo para atmósfera inestable (sobrepasa) y atmósfera estable (rodea).

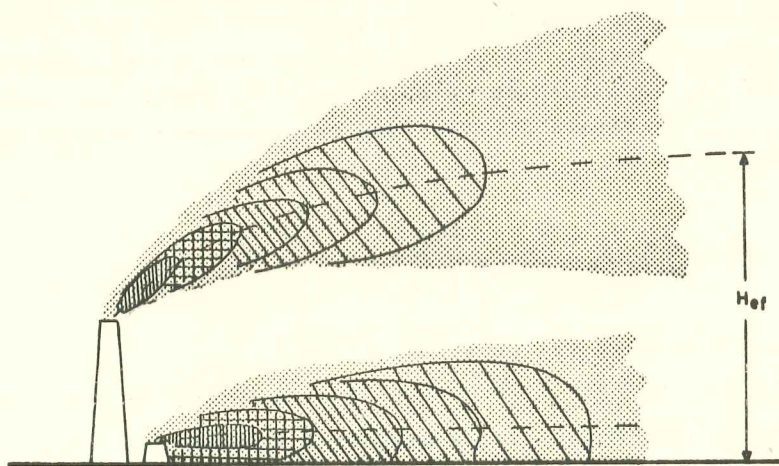


FIG. 5 Efecto de la altura del penacho sobre las concentraciones en superficie. H_{ef} : altura efectiva.

1.5 Procesos que disminuyen las concentraciones de contaminantes.

El modelo básico presentado en la primera sección supone que el contaminante emitido por la fuente puntual se comporta como un gas inerte que no reacciona químicamente ni presenta diferencias físicas con el aire.

Cuando se emiten partículas por una chimenea, no pueden despreciarse en general los efectos gravitatorios. Las partículas que posean una velocidad de caída del orden de 1 cm/s o más (diámetro superior a 20 μm) decantarán por efecto de la gravedad y seguirán una trayectoria descendente hasta depositarse en la superficie. Las más grandes caerán cerca de la chimenea, mientras que las partículas más pequeñas permanecerán en suspensión y se comportarán como un gas. La deposición gravitatoria produce concentraciones mayores cerca de la chimenea, pero reduce los niveles a distancias grandes de ella.

Los fluidos más pesados que el aire también decantan. El derrame accidental de gases pesados o líquidos que sean combustibles o tóxicos significa un alto riesgo para las personas ubicadas cerca del lugar, pues la decantación gravitatoria tiende a mantener las concentraciones altas a nivel de la superficie, frenando los procesos de dispersión en la atmósfera.

Otro efecto que disminuye las concentraciones de contaminantes es la llamada deposición seca, en la cual se incluyen todos los procesos que fijan a la superficie gases y partículas livianas: impacto, adsorción, atracción electrostática, reacción química con la superficie, etc. La acción de la cobertura vegetal sobre los contaminantes atmosféricos está incluida en este efecto.

El lavado de la atmósfera por las precipitaciones, o deposición húmeda, es otro proceso que disminuye las concentraciones de contaminantes. Su efectividad depende de la intensidad de la precipitación, su duración, el grado de solubilidad del contaminante en el agua y posiblemente también de la distribución estadística de tamaños y número de gotas por unidad de volumen.

La concentración de un contaminante también puede disminuir por transformaciones físicas o químicas, lo que puede producir otras formas de contaminación que resulten ser más nocivas. Un ejemplo de esto es la formación de contaminantes secundarios a partir de los contaminantes primarios en una atmósfera urbana por reacciones fotoquímicas.

2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS EN SANTIAGO.

Para caracterizar las condiciones que afectan la dispersión de contaminantes en Santiago, se han usado las observaciones meteorológicas realizadas en el Aeropuerto de Los Cerrillos cada 3 horas durante un período de tres años (Ulriksen y Aceituno, 1977).

La distribución estadística de todas las observaciones de velocidad de viento realizadas durante ese período se muestra en la Fig. 6. La gran frecuencia de calmas observada (alrededor de un 30% del total) representa vientos de velocidad reducida que no son detectados por los anemómetros standard usados en la red meteorológica nacional. El umbral de estos instrumentos, de acuerdo con las observaciones, puede estimarse en un valor algo inferior a 2 nudos (1,0 m/s).

El 50% del tiempo la velocidad es inferior a 1,3 m/s (2,5 nudos) y sólo un 20% del tiempo se superan los 2,6 m/s (5 nudos). La velocidad promedio es 1,7 m/s (3,3 nudos), que comparada con los valores de otras ciudades muestra condiciones más desfavorables para la dispersión de contaminantes en Santiago (Tabla 1).

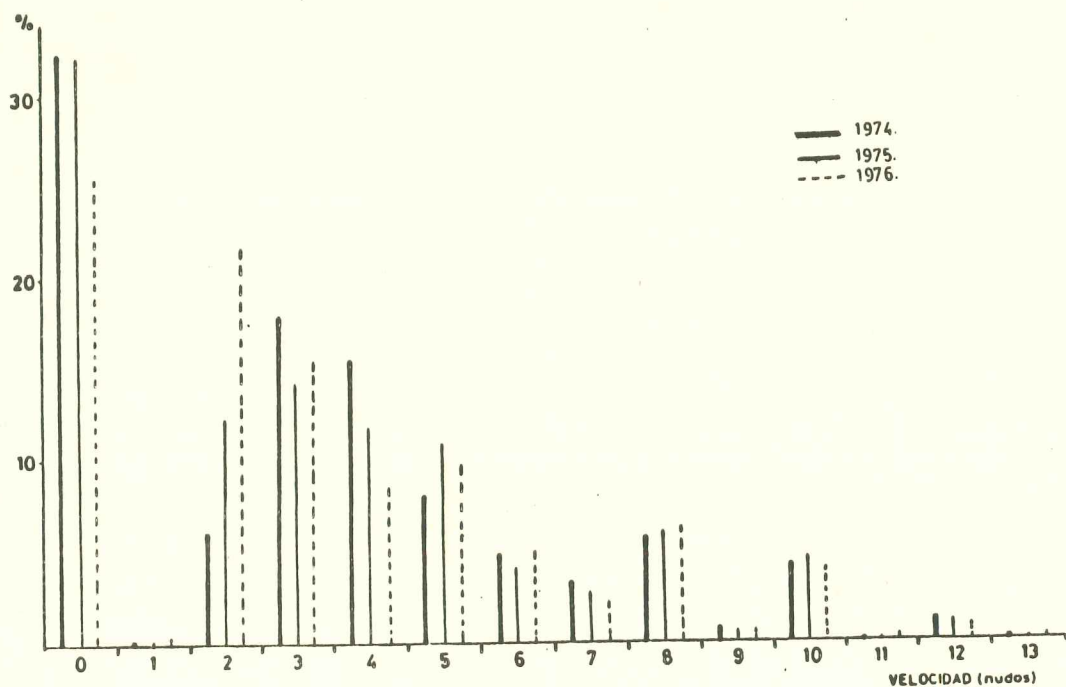


FIG. 6 Frecuencias de velocidades de viento.
Los Cerrillos (Ulriksen y Aceituno, 1977).

La velocidad del viento en Santiago presenta un ciclo diario bien definido. La frecuencia de calmas observadas a lo largo del día para las dos estaciones extremas (Fig. 7) muestra una gran ocurrencia de éstas durante el período nocturno y las primeras horas de la mañana. El ciclo diario de velocidades (Fig. 8) presenta un máximo en la tarde, muy bien definido en la época de verano, lo que muestra la dependencia del viento del calentamiento solar.

Las direcciones predominantes corresponden a vientos desde el sector S a SW (Fig. 9). Sin embargo, debido a que las calmas ocurren preferentemente de noche, esta rosa de vientos refleja sólo las direcciones preferenciales durante el día. La Fig. 10 muestra las direcciones predominantes durante el período invernal en cada hora de observación, apreciándose un ciclo diario con vientos del SW durante la tarde y vientos con componente E durante la noche.

El ciclo diario de velocidades y direcciones de viento muestra que en la cuenca de Santiago predomina un sistema de brisas de valle-montaña, originadas por el calentamiento diferencial de la atmósfera. Durante el día, el aire caliente asciende por las laderas y especialmente por el valle del río Mapocho que actúa como chimenea. El efecto es más predominante durante los meses cálidos. En la noche, el enfriamiento radiativo de la superficie produce una capa delgada de aire frío cerca de ella que se desliza ladera abajo por los contrafuertes cordilleranos y cajones. La brisa nocturna es más débil que el viento de la tarde.

El grado de turbulencia de la atmósfera, que determina los parámetros de dispersión lateral y vertical de un penacho, puede caracterizarse a través de las categorías de estabilidad de Pasquill (1961), Tabla 2. Se definen seis clases de estabilidad, que dependen de la relación entre la generación mecánica de turbulencia representada por la velocidad del viento y la generación o inhibición de la turbulencia por efectos térmicos. Esta última se representa por las condiciones nubosas que existen durante el día o la noche.

La Fig. 11 muestra la frecuencia de ocurrencia de cada una de las categorías de estabilidad en Santiago. Las condiciones estables (categorías E y F de Pasquill) ocurren durante el 50% del tiempo, mientras que las condiciones inestables (categorías A, B y C) sólo ocurren el 30% del tiempo. El resto del tiempo (20%) existen condiciones neutras. Las condiciones estables ocurren durante el período nocturno, mientras que la inestabilidad sólo se da durante el día.

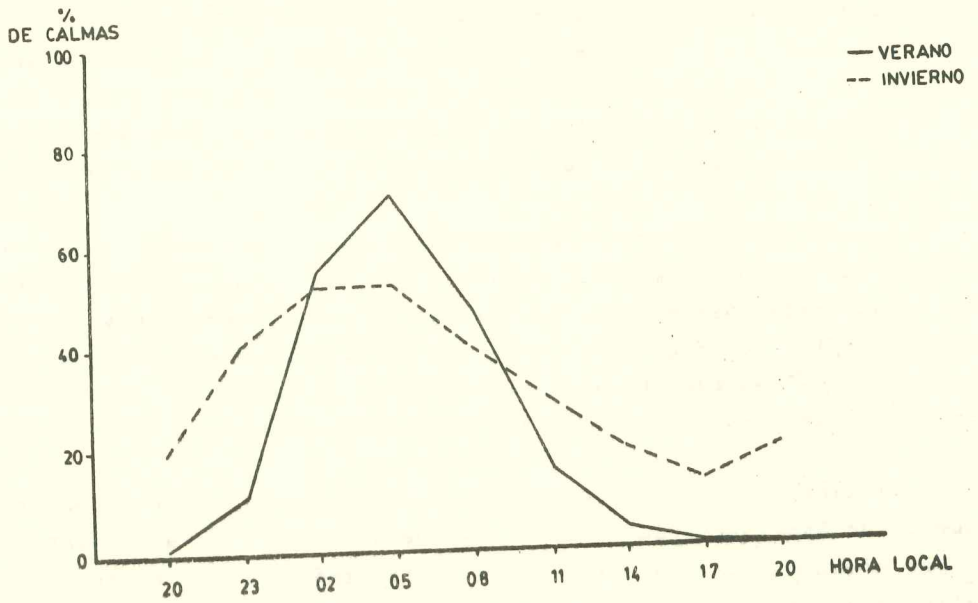


FIG. 7 Porcentaje de Calmas (V < 2 nudos).
Los Cerrillos 1974-1976. (Ulriksen y Aceituno, 1977).

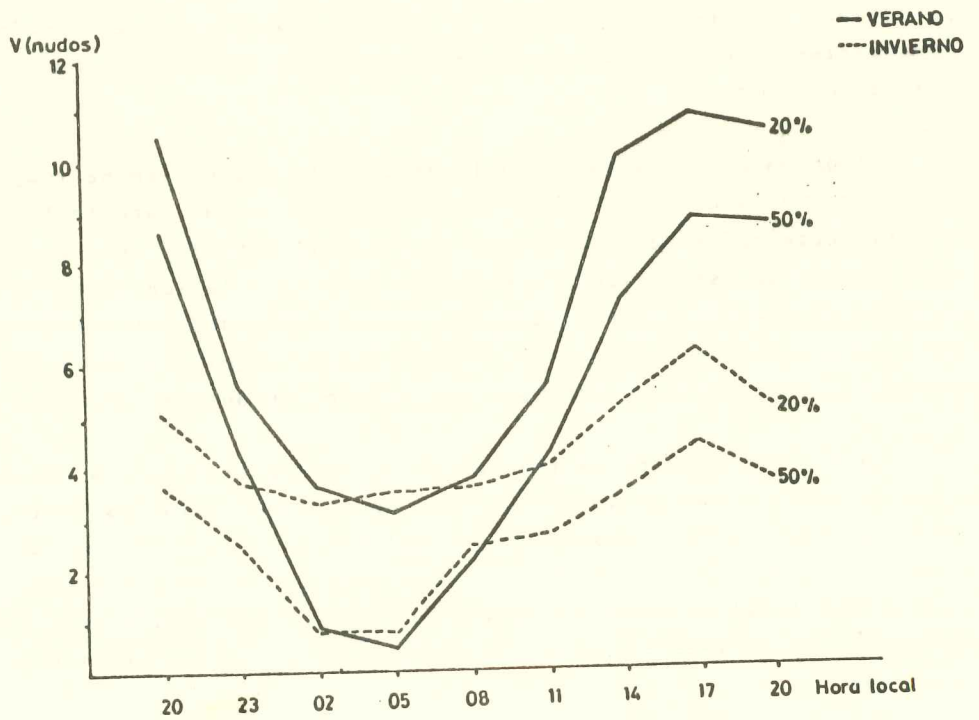


FIG. 8 Ciclo diario de velocidades de viento para las probabilidades de exce-
dencia de 50 y 20%. Los Cerrillos, 1974-1976.
(Ulriksen y Aceituno, 1977).

TABLA 1. Velocidades medias del viento en varias ciudades.

Lugar	nudos	m/seg
Santiago, Chile ⁽¹⁾	3,3	1,7
Los Angeles, USA ⁽²⁾	5,2	2,7
San Francisco, USA ⁽²⁾	7,8	4,0
Chicago, USA ⁽²⁾	8,7	4,5
Nueva York, USA ⁽²⁾	13,0	6,7

Fuente: (1) Ulriksen y Aceituno, 1977.
 (2) Conway et al., 1963.

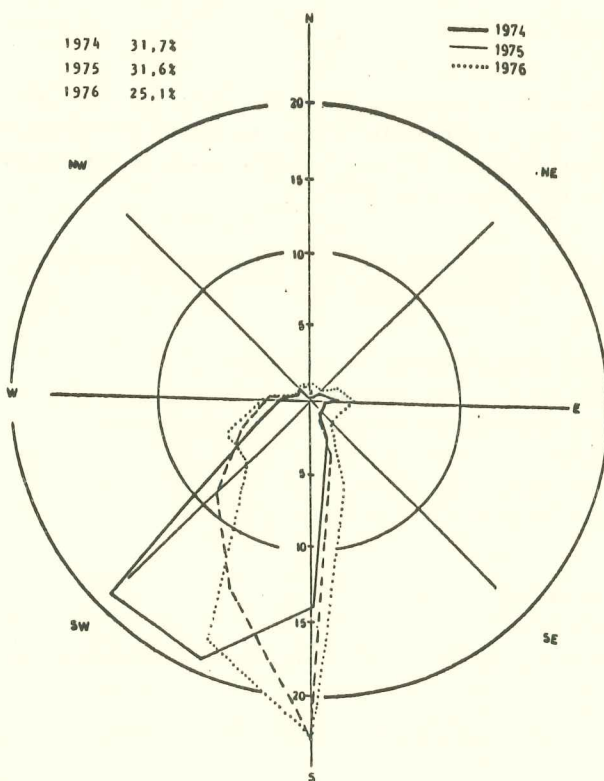


FIG. 9 Rosa de direcciones de viento en Los Cerrillos (% del tiempo que sopla viento desde una direcci3n dada). (Ulriksen y Aceituno, 1977).

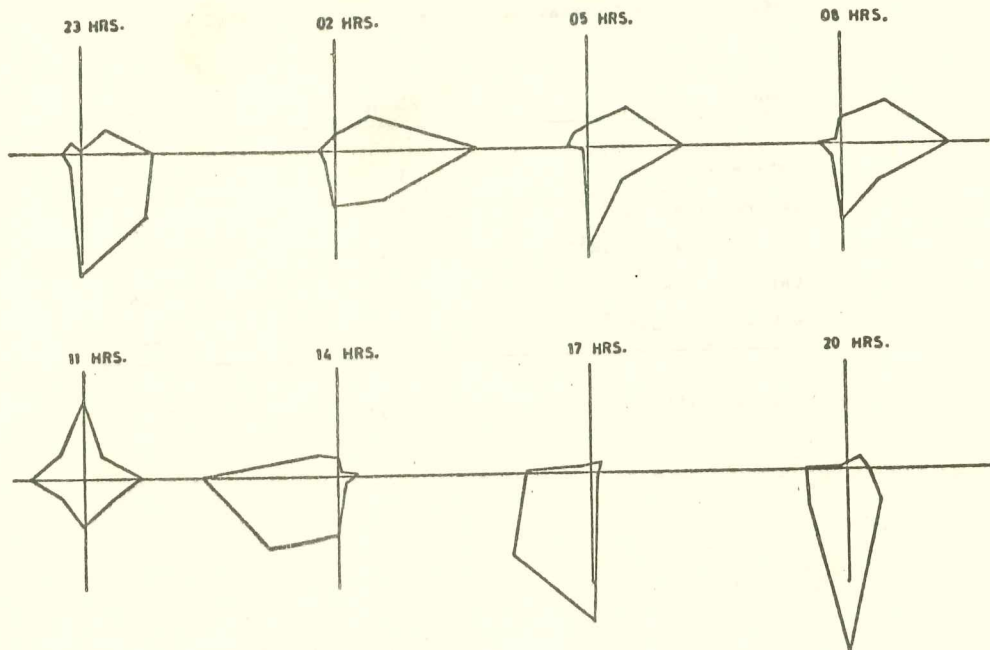


FIG.10 Rosas de direcciones de viento a diferentes horas del día. Los Cerrillos, Mayo, Junio-Julio 1976. Las calmas han sido distribuidas en cada hora según las frecuencias observadas de las direcciones. (Ulriksen y Aceltuno, 1977).

TABLA 2. Categorías de estabilidad atmosférica según Pasquill (1965).

- A: Condiciones muy inestables
- B: Condiciones inestables
- C: Condiciones ligeramente inestables
- D: Condiciones neutras
- E: Condiciones ligeramente estables
- F: Condiciones estables

Velocidad del viento (m/s)	Día Insolación			Día o Noche	Noche Nubosidad	
	Fuerte	Moderada	Débil	Cielo cubierto	>4/8	<3/8
< 2	A	A-B	B	D	(*)	(*)
2	A-B	B	C	D	E	F
4	B	B-C	C	D	D	E
6	C	C-D	D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D	D

(*) Las condiciones muy estables con vientos débiles no fueron caracterizadas por Pasquill.

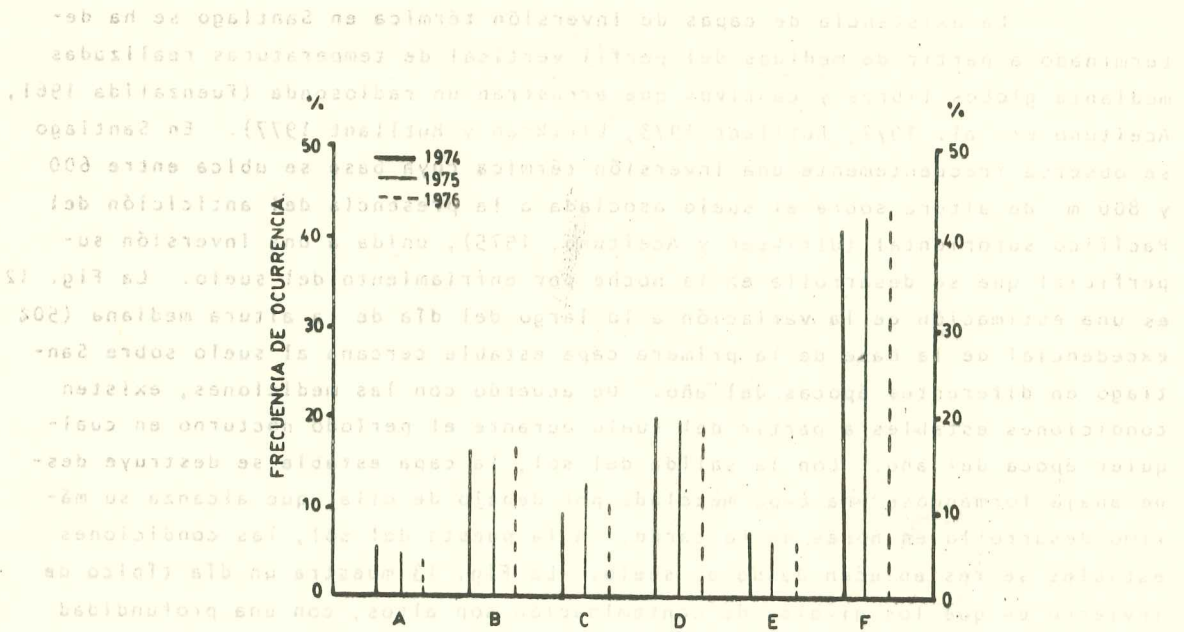


FIG. 11 Frecuencia de ocurrencia de categorías de estabilidad de Pasquill. (Ulriksen y Aceltuno, 1975).

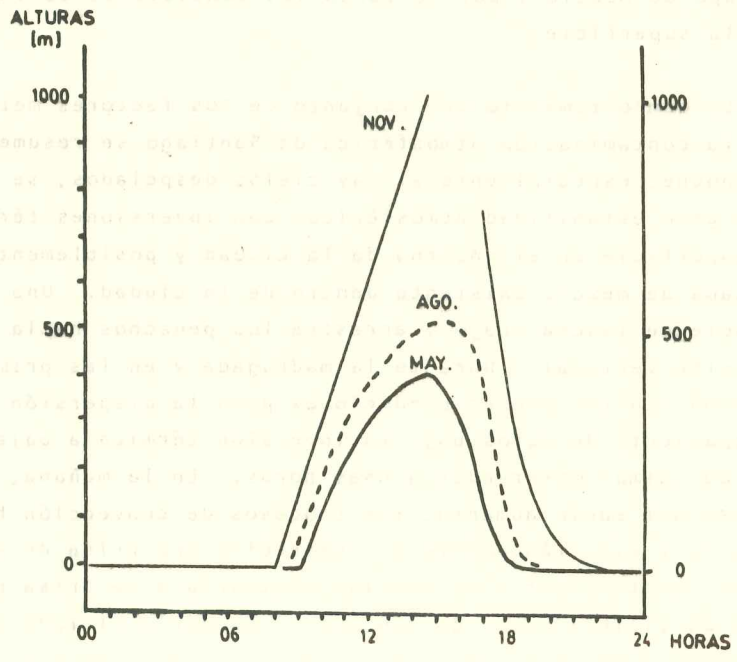


FIG. 12 Estimación de la variación de la altura mediana de la base de la primera capa estable cercana al suelo con la hora del día.

La existencia de capas de inversión térmica en Santiago se ha determinado a partir de medidas del perfil vertical de temperaturas realizadas mediante globos libres y cautivos que arrastran un radiosonda (Fuenzalida 1961, Aceituno et. al. 1972, Rutilant 1973, Ulriksen y Rutilant 1977). En Santiago se observa frecuentemente una inversión térmica cuya base se ubica entre 600 y 800 m de altura sobre el suelo asociada a la presencia del anticiclón del Pacífico suroriental (Ulriksen y Aceituno, 1975), unida a una inversión superficial que se desarrolla en la noche por enfriamiento del suelo. La Fig. 12 es una estimación de la variación a lo largo del día de la altura mediana (50% excedencia) de la base de la primera capa estable cercana al suelo sobre Santiago en diferentes épocas del año. De acuerdo con las mediciones, existen condiciones estables a partir del suelo durante el período nocturno en cualquier época del año. Con la salida del sol, la capa estable se destruye desde abajo formándose una capa mezclada por debajo de ella, que alcanza su máximo desarrollo en horas de la tarde. A la puesta del sol, las condiciones estables se restablecen desde el suelo. La Fig. 13 muestra un día típico de invierno en que los niveles de contaminación son altos, con una profundidad de mezcla que alcanza a las 14 horas sólo a 300 m. Las mediciones se han hecho en un lugar suburbano, donde el enfriamiento nocturno puede ser mayor que en el núcleo cálido de la ciudad. Dentro de ésta, es posible que se mantenga una capa de mezcla y por lo tanto las condiciones de inversión no lleguen hasta la superficie.

El comportamiento del conjunto de los factores meteorológicos que inciden en la contaminación atmosférica de Santiago se resume a continuación. Durante la noche, especialmente si hay cielos despejados, se establecen condiciones de gran estabilidad atmosférica, con inversiones térmicas que comienzan en la superficie en el entorno de la ciudad y posiblemente reducen a un mínimo la capa de mezcla existente dentro de la ciudad. Una brisa fría de montaña desciende ladera abajo y arrastra los penachos hacia el W, con muy poca dispersión vertical. Durante la madrugada y en las primeras horas de la mañana se producen las peores condiciones para la dispersión de contaminantes por el atrapamiento de éstos bajo la inversión térmica a baja altura y la gran frecuencia de calmas observadas a esas horas. En la mañana, a medida que el calentamiento del suelo aumenta, los procesos de convección hacen crecer la capa de mezcla y simultáneamente se desarrolla una brisa de valle desde el SW que mueve los contaminantes en sentido contrario a la brisa nocturna. Las condiciones de visibilidad y de contaminación hacia el lado nororiente de la ciudad empeoran durante el día. Al atardecer, el ciclo vuelve a empezar con el desarrollo de las condiciones nocturnas.

FIG. 13 Variación del perfil vertical de temperatura durante el día 25 de Agosto de 1971, Antumapu (adaptado de Rutilant, 1973).

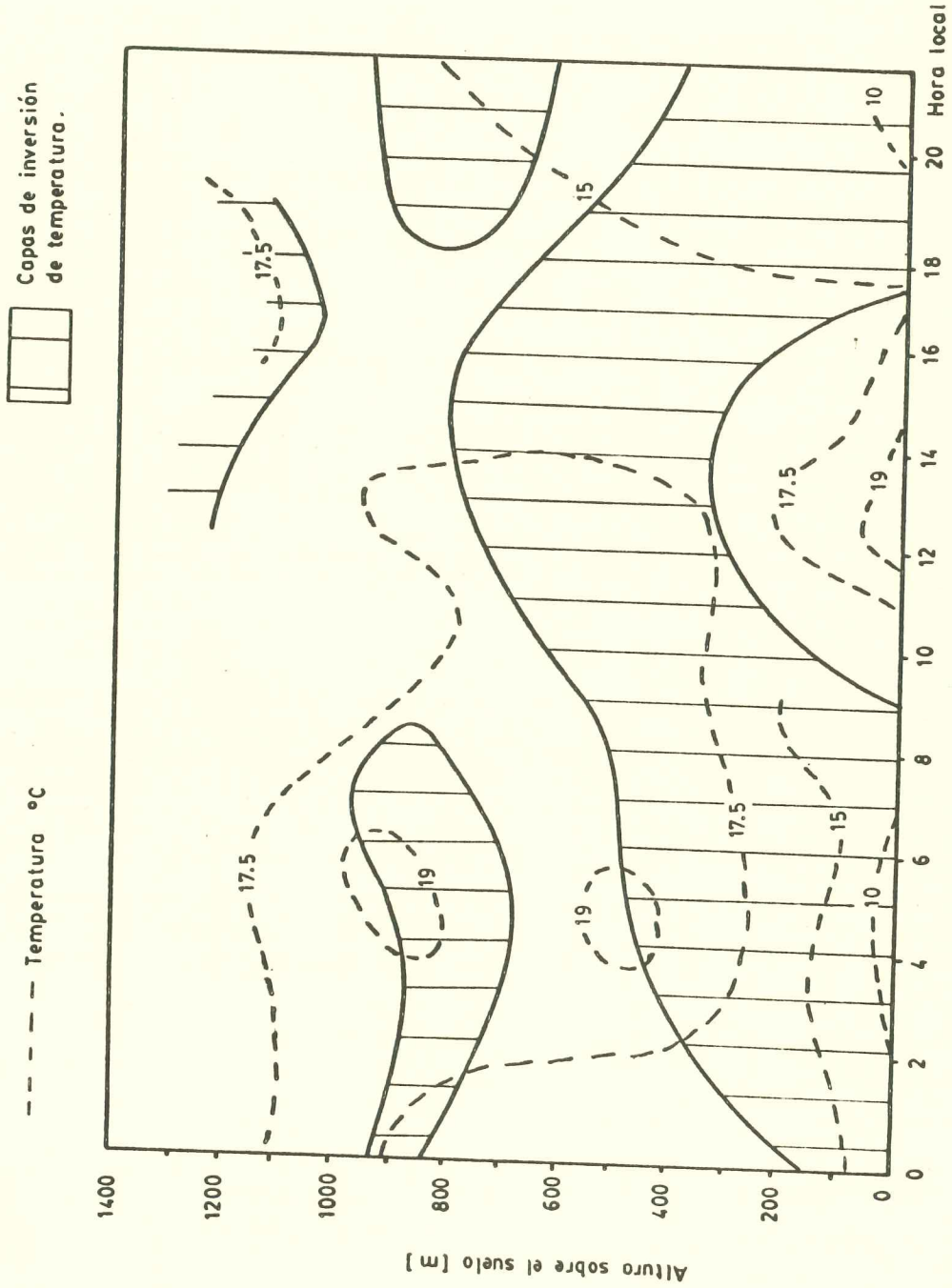
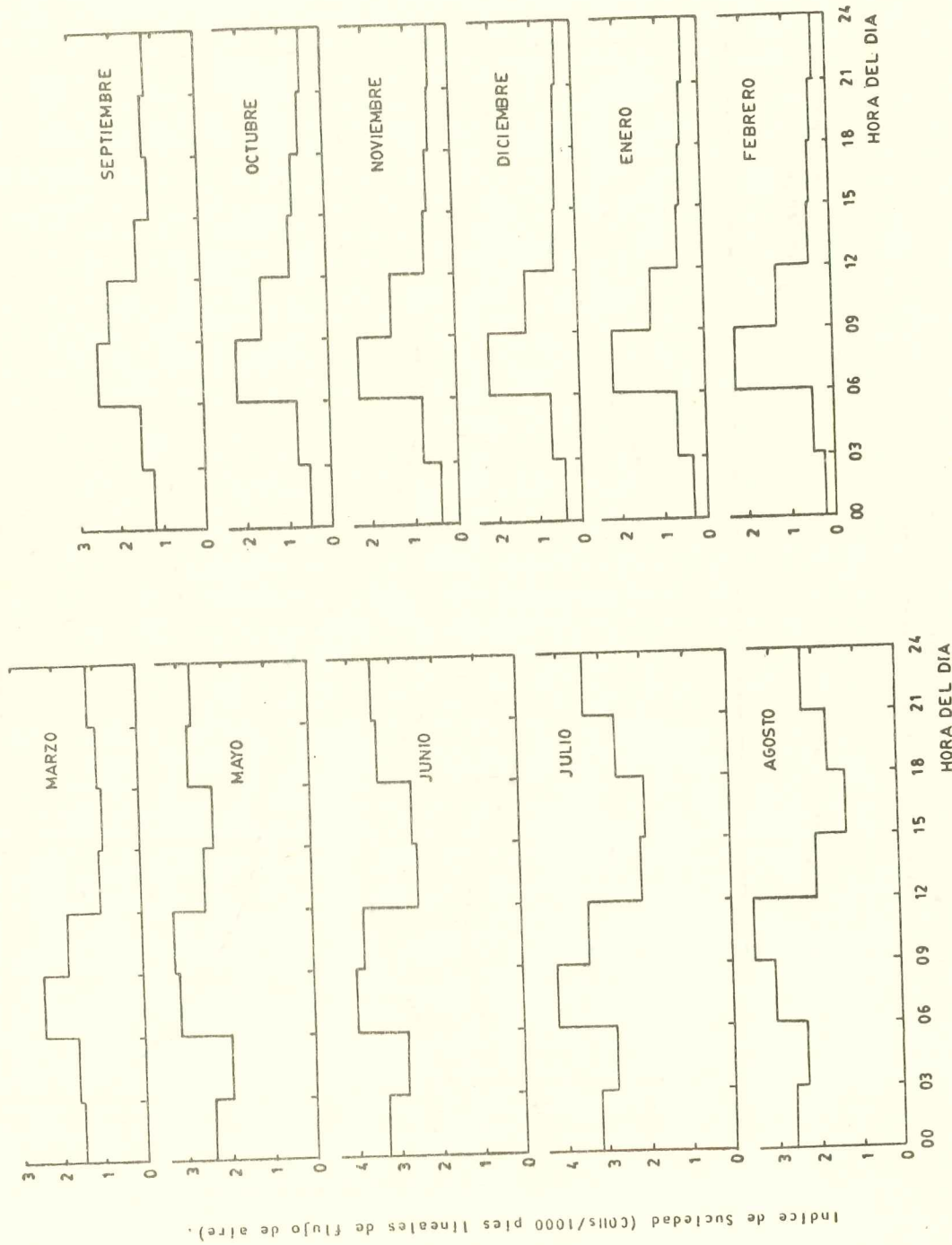


FIG. 14 Variación promedio del índice de Suciedad (partículas en suspensión) a lo largo del día, medido en el local del Depto. de Geofísica de la U. de Chile entre Marzo 1973 y Febrero 1974 (sin datos en Abril 1973).



3. NIVELES DE CONTAMINACION ATMOSFERICA MEDIDOS EN SANTIAGO.

Una gran parte de las emisiones de contaminantes en la ciudad tiene un ciclo diario, lo que unido a la variación diaria de los factores meteorológicos determina un ciclo diario en los niveles de contaminación. Las concentraciones más altas de contaminantes primarios se producen en las primeras horas de la mañana, cuando las actividades tienen un incremento notable (tránsito, comienzo de faenas industriales, etc.) y las condiciones meteorológicas son las más desfavorables para la dispersión de contaminantes. La Fig. 14 muestra los ciclos diarios de partículas en suspensión a lo largo de un año, medidos en el campus occidente de la Universidad de Chile (Escuela de Ingeniería).

El máximo de las primeras horas de la mañana es seguido por una disminución de los niveles de partículas en suspensión, debido al desarrollo de la brisa de valle y de las condiciones inestables que aumentan el espesor de la capa de mezcla en la cuenca de Santiago.

La gravedad de la contaminación atmosférica de Santiago queda caracterizada por las mediciones de concentración que se efectúan en la ciudad. Según un estudio realizado en el área Metropolitana durante 1976-1977 (Matamala 1979), el límite máximo permisible de monóxido de carbono para promedios de 3 horas (9ppm) fué superado 583 veces en el lapso de un año y el límite máximo permisible para promedios de 1 hora (35 ppm) fué superado 34 veces en el mismo período, en el centro de Santiago.

Los niveles de partículas en suspensión medidas en varios lugares de la ciudad durante el mismo período, superaron 120 veces el límite máximo aceptado para tiempos de exposición de 24 horas ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

4. POSIBILIDADES DE ACTUAR SOBRE LOS FACTORES METEOROLOGICOS.

Las posibilidades de modificar las condiciones meteorológicas de Santiago son remotas. A continuación se comentan algunas de las proposiciones que han recibido más publicidad.

La existencia de inversiones de temperatura sobre Santiago es uno de los factores que limita la dispersión de contaminantes. La "destrucción"

de la capa de inversión, especialmente en los meses de invierno, requiere de gran cantidad de energía. Para obtener las condiciones que se producen en forma natural en el verano, habría que entregar a la atmósfera una cantidad similar de calor sensible que en esa época del año puede estimarse en unos 300 W/m^2 . Para una superficie de sólo 1 Km^2 (por ej., el centro de Santiago) se requerirían 300 MW. Aparte de la inmensa cantidad de energía que esto representa, la alteración de las condiciones ambientales (temperatura, humedad) sería importante.

Las bajas velocidades de viento registradas en Santiago llevan a algunas personas a pensar en la necesidad de incrementar la ventilación de la ciudad. La posibilidad de aumentar el flujo por medio de máquinas (ventiladores gigantes) está fuera de las posibilidades técnicas. Otra manera sería aumentar la ventilación natural convectiva existente en las laderas y valles andinos, para lo cual habría que agregar calor a la atmósfera en las magnitudes anotadas antes. La eliminación de los obstáculos naturales del entorno de la ciudad (cerros) no aumentaría el flujo, a no ser que se destruyeran las cadenas montañosas que encierran la cuenca de Santiago.

Por último, se ha mencionado la posibilidad de disminuir las concentraciones de contaminantes mediante lavado por precipitación artificial. La estimulación de precipitación por sembrado de núcleos artificiales produce, en los mejores casos, un aumento de 20% en el total de agua caída. El número de días sin precipitación es muy grande para pensar en "regar" la ciudad desde aviones o con sistemas fijos.

5. CONCLUSIONES.

La única solución posible para disminuir los niveles de concentración de contaminantes en la ciudad es reducir las emisiones. Para ello, debe estudiarse el efecto de los diferentes factores que influyen en la contaminación atmosférica: número y ubicación de fuentes fijas y móviles, tipos y cantidades de contaminantes emitidos, forma como se efectúa la dispersión en la atmósfera, reacciones químicas que ocurren entre los contaminantes y procesos físico-químicos que los afectan.

Las medidas para controlar las emisiones y la planificación del desarrollo de la ciudad sólo podrán realizarse en forma adecuada y a un costo mínimo cuando se logren entender bien todos los procesos que determinan los niveles de contaminación atmosférica de Santiago.

REFERENCIAS.

- ACEITUNO P., SIPPA G. y RUTLLANT J., 1972 Estadística de la inversión de temperatura sobre la ciudad de Santiago.
- CONWAY H. M., MAY S.L., ARMSTRONG E., 1963 The Weather Handbook, Conway Publications, Atlanta, USA, 255 p.
- FUENZALIDA H., 1961 Estudio sobre la contaminación atmosférica de la ciudad de Santiago. Tesis, Escuela de Ingeniería, U. de Chile.
- MATAMALA L., 1979 Referencia al estudio sobre contaminación atmosférica de Santiago realizado conjuntamente por INTEC, el Ministerio de Salud y las Municipalidades del Area Metropolitana. En: "Contaminación Atmosférica, Grave Problema", Noticias, Fac. Cs. Fis. y Mat., U. de Chile, Año 2, N° 10, Julio 1979, pp. 24-38.
- PASQUILL F., 1961 The estimation of the dispersion of windborne material, Meteorol. Mag., 90 (1963): 33-40.
- RUTLLANT J., 1973 Factores meteorológicos en la contaminación atmosférica de Santiago: Resultados de las mediciones 71-72, Publicación N° 164, Depto. de Geofísica, U. de Chile.
- RUTLLANT J., 1979 Meteorología de mesoescala en problemas de contaminación atmosférica. Comparación entre condiciones potenciales de Santiago y Concepción, Tralca Revista de Geofísica y Meteorología, U. de Chile, Santiago, Vol. 1, N° 1.
- ULRIKSEN P. y ACEITUNO P., 1975 Estudios de contaminación atmosférica de Santiago desarrollados en el Departamento de Geofísica de la U. de Chile, Inst. Panam. de Geogr. e Hist., Revista de Geofísica, N° 3, p. 37-42.
- ULRIKSEN P. y ACEITUNO P., 1977 Análisis estadístico de viento y estabilidad atmosférica en Santiago. Informe, Departamento de Geofísica, U. de Chile.
- ULRIKSEN P. y RUTLLANT J., 1977 Campaña de mediciones meteorológicas en Santiago, Noviembre de 1976. Informe, Departamento de Geofísica, U. de Chile.