

ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA

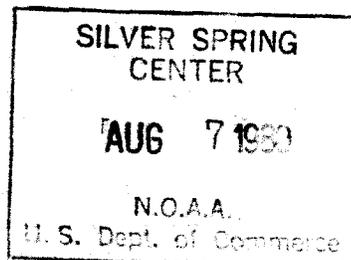
QC
987
.09
15
no.46

INFORME CIENTIFICO-TECNICO

No. 46

FACTORES METEOROLOGICOS EN LA PROPAGACION DE CONTAMINANTES DEL AIRE EN LA CIUDAD DE LA HABANA

INSTITUTO DE METEOROLOGÍA DE LA ACC



C. M. LÓPEZ CABRERA

Departamento de Contaminación de la Atmósfera
Academia de Ciencias de Cuba

DIRECCIÓN DE PUBLICACIONES

La Habana, enero de 1978

National Oceanic and Atmospheric Administration

Climate Database Modernization Program

ERRATA NOTICE

One or more conditions of the original document may affect the quality of the image, such as:

Discolored pages
Faded or light ink
Binding intrudes into the text

This document has been imaged through the NOAA Climate Database Modernization Program. To view the original document, please contact the NOAA Central Library in Silver Spring, MD at (301) 713-2607 x124 or www.reference@nodc.noaa.gov.

LASON
Imaging Subcontractor
12200 Kiln Court
Beltsville, MD 20704-1387
March 28, 2002

FACTORES METEOROLOGICOS EN LA PROPAGACION DE CONTAMINANTES DEL AIRE EN LA CIUDAD DE LA HABANA

CARLOS M. LÓPEZ CABRERA

RESUMEN. Se estudiaron condiciones meteorológicas importantes para la propagación de contaminantes en la atmósfera en la Ciudad de La Habana. Se determinaron las alturas de mezclamiento y la velocidad de transporte del viento. Mediante un modelo "de caja" se calcularon las concentraciones promedio normalizadas. Se estudió la estabilidad. Se hicieron rosas por categorías. Se calculó la frecuencia total de casos con dispersión atmosférica limitada.

ABSTRACT. Meteorological conditions that are important for pollutants' propagation in the atmosphere in Havana city are studied. Mixing heights and wind transport speeds are determined. By means of a "box model", average normalized concentrations are computed. Stability was studied. Stability roses by categories were made. Total frequency of cases with limited atmospheric dispersion was computed.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo contiene el análisis de varias de las condiciones meteorológicas importantes para los estudios sobre contaminación de la atmósfera. El mismo está circunscrito a la Ciudad de la Habana y fueron utilizados datos de cinco años, desde 1970 a 1974.

Como se sabe, la contaminación de la atmósfera ocurre cuando las concentraciones de contaminantes alcanzan niveles capaces de provocar afectaciones al hombre, los animales, la vegetación o al clima. Tales concentraciones se producen cuando la atmósfera es incapaz de dispersar adecuadamente las emisiones que se reciben en el área, ya sea porque estas son excesivas, o porque las condiciones meteorológicas son desfavorables a la dispersión. Si los dos factores anteriores coinciden, el resultado es la ocurrencia de un caso agudo de contaminación.

2. CONTAMINACIÓN POTENCIAL DE LA ATMÓSFERA

Alturas de mezclamiento. El concepto de una capa de mezclamiento está basado en el principio de que cuando la atmósfera es calentada des-

de abajo, ésta se hace inestable, provocando movimientos verticales, mezclamientos y consecuentemente una tendencia para el establecimiento de un gradiente adiabático seco, dentro de la capa, en la ausencia de condensación. Así, la altura de mezclamiento es definida como el tope de una capa con base en superficie, en la cual el mezclamiento vertical es relativamente vigoroso y el gradiente es aproximadamente adiabático seco. En el caso de una inversión con base en superficie, la altura de mezclamiento es cero, pero tal valor para la atmósfera no tiene un significado real. No obstante, el mezclamiento erosiona y puede destruir la capa de inversión, lo que unido a otras características climatológicas urbanas, dificulta la formación de inversiones con base en superficie en las ciudades.

Dentro de la capa de mezclamiento, los contaminantes tienden a estar homogéneamente distribuidos en la vertical. Un conocimiento de esa capa, es además una valiosa información para los modelos de predicción de la contaminación. La altura de la capa de mezclamiento usualmente varía durante el día y durante la tarde. Aunque no medida directamente, puede ser calculada desde mediciones meteorológicas de rutina; pues asumiendo que los cambios en la temperatura del aire ocurren como una consecuencia del calentamiento solar del terreno, la altura de mezclamiento en un tiempo dado del día puede ser realmente estimada desde la temperatura en superficie y el perfil vertical de temperatura. Sin embargo, el método anterior no es aplicable durante la ocurrencia de advecciones fuertes de masa que influyan fuertemente en el cambio de temperatura.

La altura de mezclamiento para la mañana es calculada como la altura encima del terreno donde

la adiabática seca, extendida desde la temperatura mínima en superficie para la mañana más 3°C, intercepta el perfil vertical de temperatura observado a las 07:00 (hora local). La adición de 3°C pretende compensar los efectos de la isla de calor urbana, ya que normalmente las estaciones de radiosondeo están localizadas en un medio rural o suburbano. La literatura consultada recomienda una adición de 3 a 5°C; escogimos 3°C porque en trabajos preliminares desarrollados por Paz (1976), se han encontrado diferencias no pronunciadas entre las temperaturas mínimas en Casablanca, y mediciones de las mismas efectuadas dentro de la ciudad. No obstante, esta corrección, además de incluir los efectos de la isla de calor urbano, incluye los efectos del calentamiento de la superficie un poco después del amanecer. Con esta corrección es más apropiado decir, Holzworth (1974), que lo que se calcula es la altura de mezclamiento urbana para la mañana. Así la hora de la altura de mezclamiento urbana para la mañana, coincide aproximadamente con el máximo típico diurno de concentración de contaminantes en muchas ciudades.

La altura de mezclamiento para la tarde es menos complicada que para la mañana, pero fue calculada en la misma forma, excepto que, en vez de utilizar la temperatura mínima más 3°C, se utilizó solamente la temperatura máxima debido a que las diferencias urbano-rurales de temperatura máxima en superficie, fueron asumidas despreciables. La hora típica de la altura de mezclamiento para la tarde, se puede considerar que coincide aproximadamente con las concentraciones mínimas de contaminantes durante el día.

Debe puntualizarse que este método comprende alturas de mezclamiento diarias que no estuvieron asociadas con la ocurrencia de precipitación. La razón para ese procedimiento se debe a que la asunción de un gradiente adiabático seco en la capa de mezcla es cuestionable para ese caso. También, como fue señalado anteriormente, debido a que se asume que los cambios en el perfil vertical de temperatura ocurren sólo como una consecuencia del calentamiento de la atmósfera desde abajo, cálculos individuales de la altura de mezclamiento pueden ser erróneos a menos que se efectúen análisis adicionales por efectos tales como la advección de temperatura, convergencia, divergencia, etc. No obstante, como ha

señalado Holzworth (1972), en los promedios climatológicos puede asumirse que tales efectos se compensan uno a otro. En la Figura 1 se expone en forma gráfica el método de cálculo de las alturas de mezclamiento para la mañana y la tarde.

En la Tabla 1 se ofrecen los valores de altura de mezclamiento para la mañana y la tarde, considerando el período 1970-1974. En la Figura 2 aparecen en forma gráfica los valores de la Tabla 1. Como puede apreciarse en la Figura 2, los meses con una menor altura media de la capa de mezcla son Febrero y Octubre, al considerar los valores de la tarde que son los más importantes. Para la mañana, los mínimos ocurren

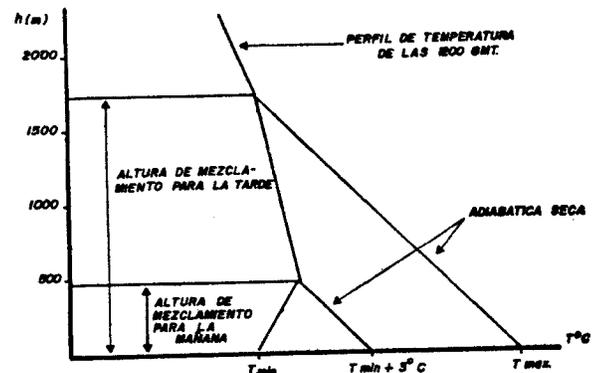


Fig. 1. Cálculo de alturas de mezclamiento para la mañana y la tarde desde el perfil de temperatura de radiosonda para las 1200 GMT.

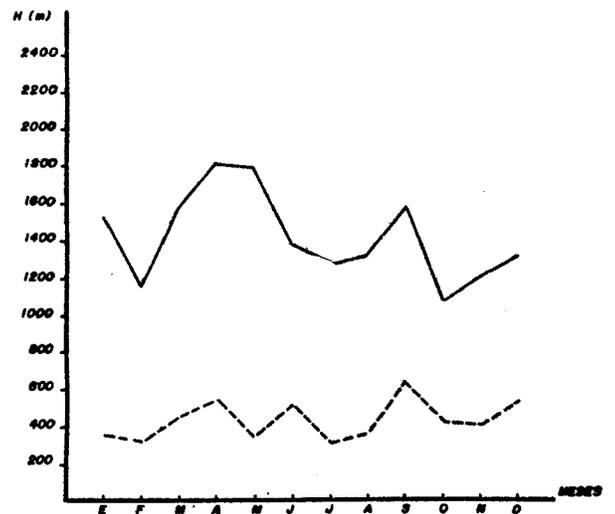


Fig. 2. Variación de la altura de mezclamiento con respecto a los meses (1970-1974 Habana).
 — Tarde. - - - Mañana.

en Febrero y Julio. También debe señalarse como interesantes los descensos en los valores que se observan de Junio a Agosto para la tarde y de Julio a Agosto para la mañana.

En las tablas 2 y 3, se presentan las frecuencias en por cientos de las ocurrencias de alturas de mezclamiento para la mañana y la tarde, en La Habana, considerando los intervalos de 500, 1 000, 1 500, 2 000, 2 500, y más de 2 500 metros. Se destaca, separado del intervalo de 500 metros, el intervalo hasta 250 metros, por ser de interés analizar la variación anual de esta capa de poca dispersión vertical. En las Figuras 3 y 4 se presentan las variaciones anuales de la frecuencia en por cientos de la altura de mezclamiento hasta 250 y 500 metros respectivamente, para la mañana y la tarde.

Rapidez de transporte del viento. Otra de las variables meteorológicas que determina la dilución de contaminantes en la atmósfera sobre áreas urbanas, es la rapidez promedio del viento en la capa de mezcla. Ya que la rapidez del viento varía normalmente con la altura, se ha tomado el promedio de ésta, como una representación conveniente del transporte horizontal de aire dentro de la capa de mezcla.

En nuestro trabajo la rapidez de transporte para la mañana, fue calculada siguiendo el método de Holzworth (1972). Esta se computó como el promedio aritmético de rapidez observada en la superficie desde las 02:00 hasta las

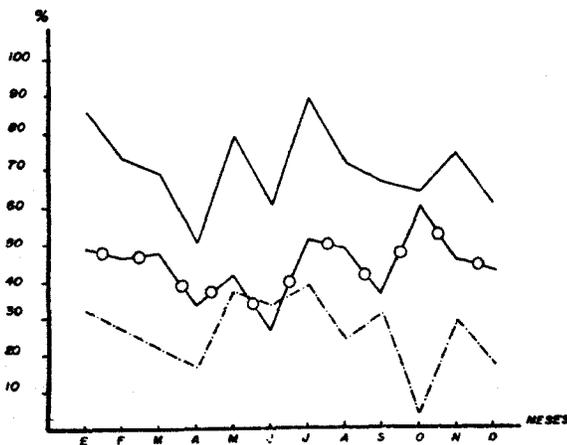


Fig. 3. Variación anual de la frecuencia (%) de alturas de mezclamiento para la mañana. — — — 0-250 m, —○— 251-500 m, — 0-500 m.

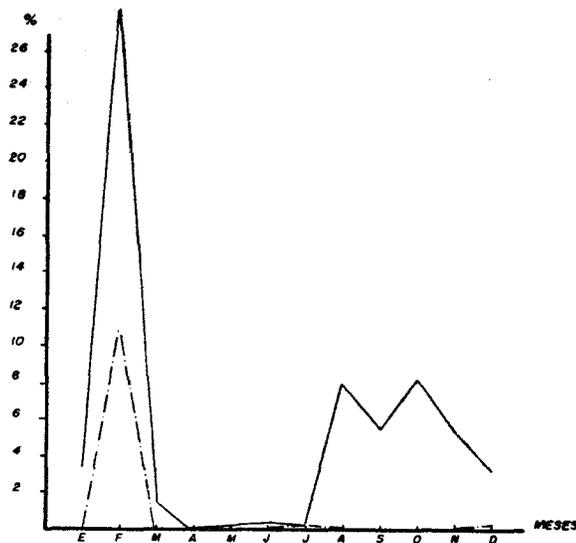


Fig. 4. Variación anual de la frecuencia (%) de alturas de mezclamiento para la tarde. — — — 0-250 m — 0-500 m.

06:00 (hora local), y dentro de la capa de mezcla para la mañana.

Para calcular la rapidez de transporte para la tarde, por el método del autor citado anteriormente, nos vimos en la dificultad de que se propone un sistema similar al utilizado para la mañana, pero que utiliza el sondeo de las 19:00 hora local, y el promedio de rapidez del viento en superficie, desde las 12:00 hasta las 16:00 hora local. Este sistema nos fue imposible de aplicar, pues en el período que se estudia, no se efectuaron sondeos a las 19:00 en la estación Casablanca.

Miller (1967), correlacionó la rapidez promedio del viento en la capa de mezcla del sondeo de las 19:00, con el promedio de rapidez del viento en superficie desde las 12:00 hasta las 16:00 (hora local). Los resultados para todos los puntos dieron coeficientes de correlación superiores a 0,80 en todos los casos. Tomando estos resultados, y con el objetivo de obtener algún índice del comportamiento y la variación anual de la rapidez del viento en la capa de mezcla para la tarde, exponemos, junto a los valores de la mañana obtenidos por el método idóneo, los promedios de rapidez del viento en superficie desde las 12:00 hasta las 16:00 (hora local) en la estación Casablanca, para aminorar la falta de información para estas horas. En las Tablas 4 y 5

ofrecemos los valores de rapidez de transporte del viento media mensual y del período para la mañana y la tarde respectivamente. En la Figura 5, se ofrece la variación según los meses del valor medio mensual de la rapidez de transporte del viento, considerando todo el período. En la misma se exponen los valores para la tarde sólo para comparar la variación anual y no las magnitudes, que son algo inferiores a las reales.

En la Tabla 6 ofrecemos las frecuencias en por cientos de ocurrencia de rapidez de transporte del viento por intervalos, por meses y el período para la mañana.

Concentración promedio normalizada. Los datos ofrecidos anteriormente de alturas de mezclamiento y rapidez de transporte del viento, proporcionan una aproximación cualitativa al potencial meteorológico de la contaminación del aire. No obstante, este valor puede cuantificarse utilizando la altura de mezclamiento L (m) y la rapidez promedio del viento ($m \text{ seg}^{-1}$), como las variables independientes de un simple "modelo de cajas", que da la concentración promedio normalizada X/Q (seg m^{-1}), sobre una ciudad de dimensión lineal promedio C (m), donde, según Mc Cormick (1970), la emisión de contaminantes Q ($g \text{ m}^{-2} \text{ seg}^{-1}$), se asume proporcional a C . Entonces

$$\frac{X}{Q} = \frac{1}{2} \frac{C}{Lu} \quad (1)$$

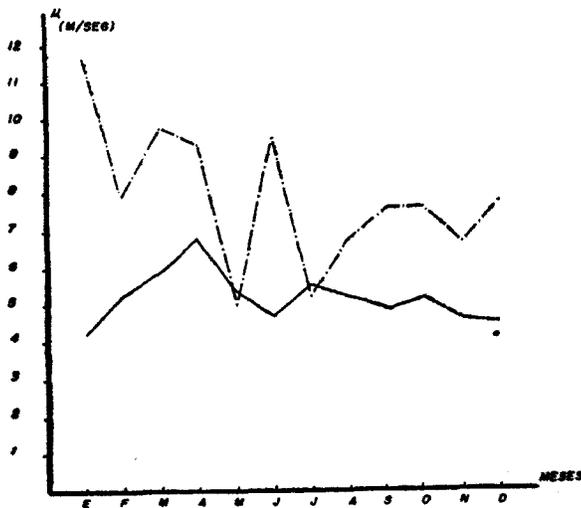


Fig. 5. Variación de la velocidad de transporte con respecto a los meses (1970-1974) ————— Tarde
----- Mañana.

donde X/Q concentración promedio normalizada (seg m^{-1}), es la concentración X promediada sobre una ciudad y normalizada, para una emisión promedio uniforme de área, Q como una función de la altura de mezcla (L), la rapidez del viento (u) y la distancia C a favor del viento.

Esta concentración promedio normalizada, ha sido introducida como un índice que elimina la extraordinaria dificultad de evaluar la emisión total en (unidades/seg) para una ciudad, si se pretendiera calcular directamente la concentración de contaminantes X (unidades/ m^3). Aunque este modelo es simple, en comparación a las grandes complejidades de la dispersión atmosférica y las emisiones de contaminantes en áreas urbanas, proporciona una aproximación cuantitativa al potencial meteorológico de la contaminación del aire.

Para efectuar los cálculos, seleccionamos un área que tiene 25 km de largo en la dirección Este-Oeste y 16 km de ancho en la dirección Norte-Sur. Esto representa un área de 400 km^2 , que comprende las zonas fundamentales en cuanto a la población, industrias y transporte en la Ciudad de La Habana. En la Figura 6 se presentan este modelo y el área escogida. Se decidió utilizar la dirección Este para la orientación del modelo pues además de ser el viento predominante en superficie para el período estudiado, es la dirección predominante anual en las alturas donde se produce y mueve la mezcla de contaminantes.

Entonces, la ecuación (1) toma la forma

$$\frac{X}{Q} = \frac{1}{2} \frac{25000}{Lu} = \frac{12500}{Lu} \text{ segm}^{-1} \quad (2)$$

En las Tablas 7 y 8 se ofrecen los valores media mensual y anual de X/Q en segm^{-1} para la mañana y la tarde respectivamente. En la Figura 7, se expone la variación de X/Q con respecto a los meses. Los períodos con menor dispersión atmosférica, están determinados por la coincidencia de valores altos de X/Q tanto para la mañana como para la tarde. Para nuestro caso, esta situación se manifiesta en los meses de febrero y octubre, coincidiendo en el primero los valores mayores.

Además del análisis de la concentración promedio normalizada, es conveniente señalar la fre-

cuencia de las situaciones con condiciones limitadas en cuanto a la dispersión atmosférica. Estos casos, llamados episodios, se han clasificado de acuerdo a la altura de mezclamiento, la rapidez de transporte del viento y la persistencia de las condiciones. Para nuestro estudio hemos considerado solamente casos donde la situación se mantiene por dos o más días consecutivos sin precipitación. En la Tabla 9 ofrecemos las frecuencias totales para el período 1970-1974, considerando varios intervalos de alturas de mezclamiento y velocidad de transporte, que conducen a situaciones de dispersión atmosférica limitada. Es de interés la condición intermedia, que considera casos que permanecen dos días o más con alturas de mezclamiento $\leq 1\ 500$ m y rapidez de transporte del viento ≤ 4 m/seg pues de acuerdo a Gross (1970) ha sido utilizada en sistemas de pronóstico de la contaminación potencial. En la misma tabla aparecen entre paréntesis la duración total en días de los episodios. Del caso señalado anteriormente de $h \leq 1\ 500$ m y $u \leq$

4 m/seg ocurrieron 19, con un total de 47 días para todo el período analizado.

Estabilidad atmosférica. La estabilidad atmosférica es una de las condiciones meteorológicas que determinan la concentración de contaminantes en las ciudades. Su magnitud en la capa cercana a la superficie depende fundamentalmente de la radiación neta y la velocidad del viento, con la influencia de la nubosidad. A su vez, la insolación relacionada con las magnitudes anteriores depende de la altura solar, que es una función del tiempo, es decir, (hora del día, día del año y tipo de año ya sea bisiesto o no).

La estabilidad puede estimarse corrientemente a través de ascensos de globos sonda o por mediciones en torres meteorológicas, fundamentalmente de temperaturas en varios niveles. También para solucionar la falta de los equipos de sondeo, o las torres, o para complementar la poca frecuencia de observaciones en el día de los primeros, se han elaborado varios métodos indirectos de estimación de la estabilidad cercana al te-

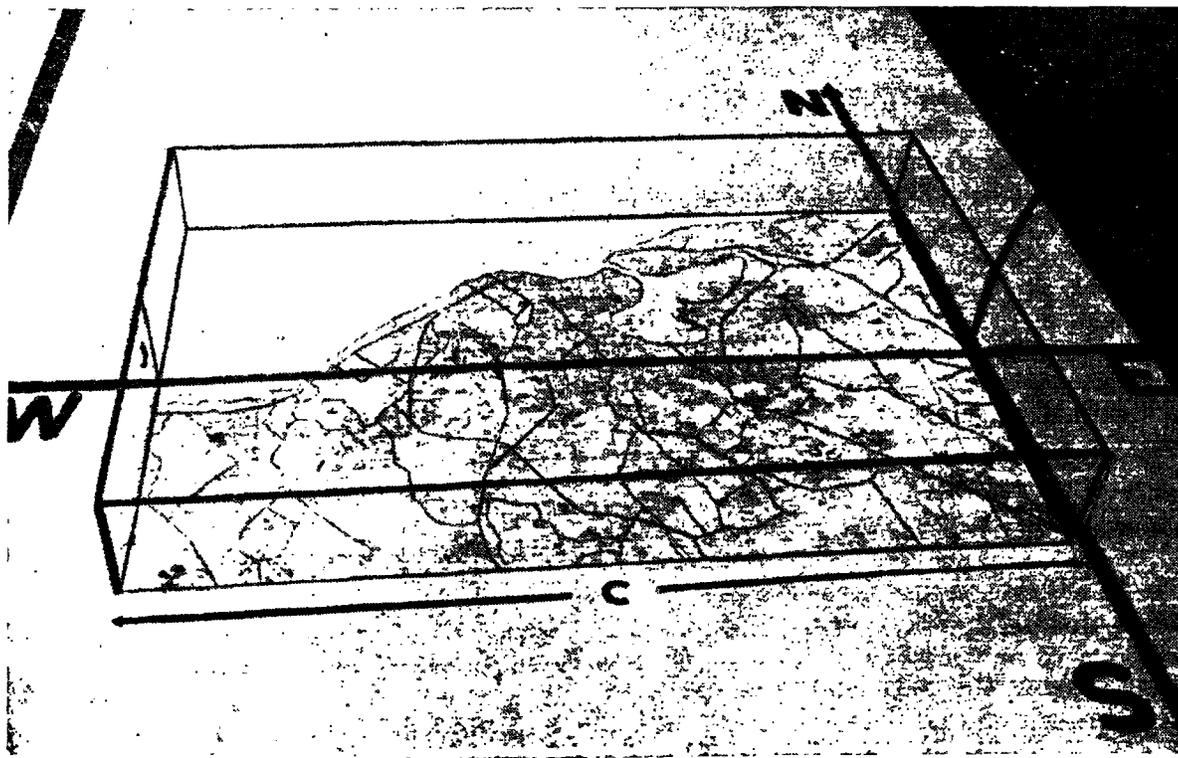


Fig. 6. Modelo de caja para la obtención de la concentración promedio normalizada X/Q en la ciudad de La Habana.

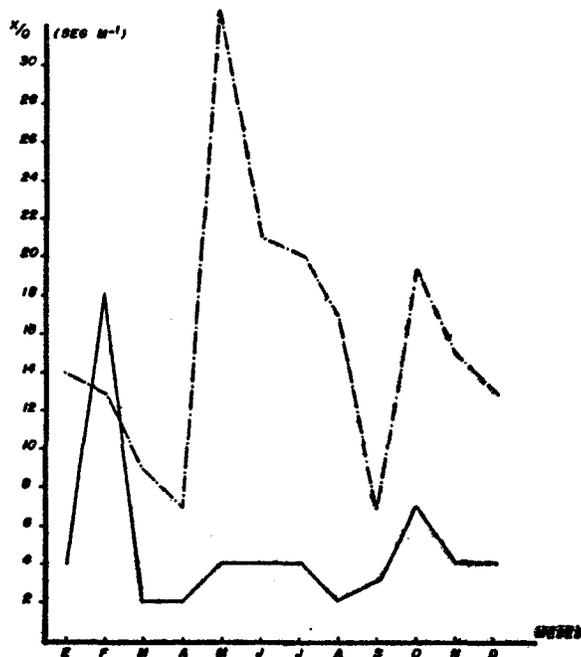


Fig. 7 Variación, con los meses, de la concentración promedio normalizada X/Q en seg M^{-1} período 1970-1974. — Tarde - - - - Mañana.

rreno, basados fundamentalmente en los elementos regularmente observados en las estaciones meteorológicas convencionales. Esto posibilita la obtención de una evaluación climatológica de la estabilidad y hace factible su estudio en zonas con estaciones meteorológicas cercanas. Estos sistemas, que desde luego tienen más limitaciones, ofrecen, no obstante, la posibilidad de una evaluación con mayor calidad de la información meteorológica en las zonas de nuevos proyectos de industrias o poblaciones donde se carezca de estudios adecuados de los elementos meteorológicos en la vertical.

En nuestro trabajo confrontábamos la dificultad de que en el período estudiado 1970-1974, solamente se efectuaron sondeos (no regulares) en la estación Casablanca para las 07:00 (hora local). Este horario, aunque importante para otros análisis dentro del trabajo, no posibilitaba una evaluación de las frecuencias de los tipos de estabilidad con la hora del día o con las direcciones del viento. Por este motivo decidimos complementar estos datos utilizando el método propuesto por Turner (1964), en la elaboración de su Modelo de Difusión para un Area Urbana. En

este sistema, se estima la insolación desde la altura solar y las condiciones existentes de nubosidad (tipo, cantidad y altura). Los estimados de irradiación para la noche se hacen considerando también la cobertura nubosa. La clasificación de las categorías de estabilidad se efectúa en función de la rapidez del viento a 10 metros de altura y la radiación neta. El índice de radiación neta varía desde 4 (alta positiva radiación neta) hasta -2 (alta negativa radiación neta).

Para la determinación de la altura solar h_0 utilizamos las tablas de declinación, la tabla de $\Delta \tau$ (ecuación del tiempo) y el $\text{sen } h_0$ (altura solar).

Estos resultados han sido comparados individualmente por mediciones de la desviación standard de la dirección horizontal del viento, que puede estimarse por cálculos manuales sencillos a partir de registros continuos de dirección del viento. La utilidad de tales datos de σ_0 es mucho mayor por su relación con la categoría de estabilidad. Esas relaciones aparecen precisadas en el libro editado por Slade (1971), y se fundamentan en datos experimentales de difusión y valores de σ_0 para tiempos promedios cortos. En él se precisa que la desviación standard de las fluctuaciones horizontales del viento σ_0 están relacionadas con la función de dispersión σ_y , por

$$\sigma_0 \approx \sigma_y/x \quad (3)$$

y que puede relacionarse con las categorías de estabilidad, como se muestra en la Tabla 10. Esta desviación standard, se obtiene desde mediciones de dirección horizontal del viento en períodos de 30 minutos. Se sabe que el rango R de Θ (dirección horizontal del viento) que es la diferencia entre los valores extremos que ocurren en ese período de tiempo se relaciona con σ_0 en forma aproximada por:

$$\sigma_0 \approx R(\Theta) / 6 \approx (\Theta_{\max} - \Theta_{\min}) / 6 \quad (4)$$

ecuación que proporciona la vía para determinar σ_0 a partir del gráfico de la dirección del viento.

En la Tabla 11, ofrecemos las frecuencias mensuales en por cientos de categorías de estabilidad, en la estación Casablanca, para el período 1970-1974. Se consideran 7 tipos de condiciones: muy inestable, inestable, ligeramente inestable, neutral, ligeramente estable, estable y muy estable. Teóricamente, se pueden establecer relaciones entre

estas categorías de estabilidad obtenidas y los parámetros de estabilidad usuales, sobre todo el número de Richardson o el parámetro de Monin-Obukov.

Otra información de interés en los trabajos meteorológicos de contaminación atmosférica, proviene de la combinación de los datos de viento y estabilidad. En la Tabla 12 ofrecemos las frecuencias de categorías de estabilidad en por cientos para todo el período, según la dirección del viento (considerando 16 rumbos). La figura 8 ilustra en forma comprensible las rosas de estabilidad para cada categoría. Estas rosas muestran en los máximos, una tendencia general a desviarse desde el NNE para los casos muy inestables, hasta el ESE para los casos muy estables, pasando por los casos y direcciones intermedios entre éstas. Esta variación se debe fundamentalmente a que la ciudad, situada en la costa Norte del país, está influida por un sistema circulatorio local de Brisa y Terral, originado por diferencias de temperatura en el aire sobre el mar y sobre la tierra.

La brisa de mar, durante las horas diurnas y en la mayor parte del año, se manifiesta en la

ciudad como viento del NNE, pasando a los rumbos cercanos NE y ENE a medida que avanzan las horas del día o en dependencia de su interacción con el alisio, que en general refuerza su intensidad. Según se puede apreciar de la rosa de los vientos anual, en Casablanca, su establecimiento definido se produce después de las 10:00. El terral o brisa de la tierra, se manifiesta durante la noche aquí como viento del ESE o rumbo cercano, por lo general más débil que la brisa de mar, al recibir el efecto opuesto del alisio. Su establecimiento definido se produce aproximadamente desde las 23:00.

Esta circulación coopera a que la ciudad reciba, por lo general, masas de aire inestables desde el mar durante el día, y masas de aire estables de zonas rurales, fundamentalmente durante la noche. Entre los períodos de estas dos corrientes, se presentan unas horas de calma o vientos muy débiles, usualmente cercanos a la salida y la puesta del sol. Estas calmas, cuyos por cientos aparecen reflejados dentro de los círculos de las rosas de estabilidad, como es lógico tienen sus máximos asociados con las condiciones muy estables y estables.

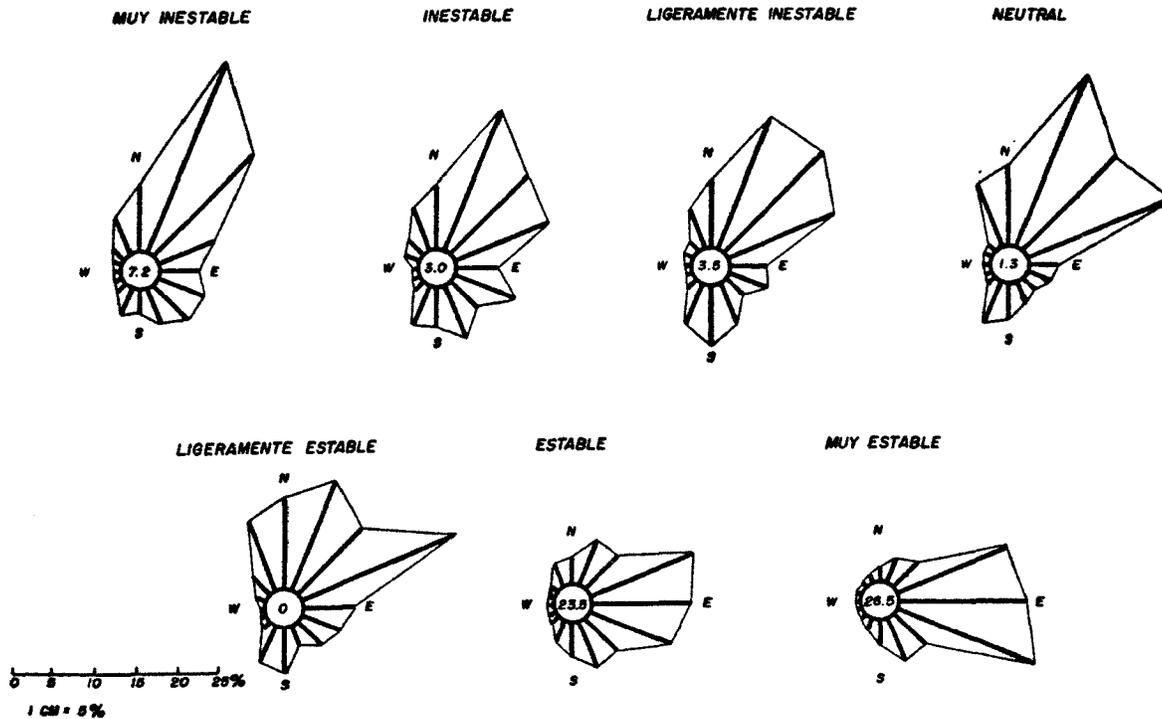


Fig. 8. Rosas de estabilidad por categorías. Estación Casablanca. Período 1970-1974.

En las condiciones de estabilidad que se observan durante la noche y el inicio de la mañana, la turbulencia es limitada, el flujo es cuasi laminar y las emisiones se dispersan poco y lentamente, tanto vertical como horizontalmente. Esto provoca serios problemas, sobre todo desde las fuentes con chimeneas de poca altura, en relación a los edificios cercanos o la topografía del terreno. En ocasiones, si aumenta la turbulencia horizontal aunque sigan limitadas verticalmente, las emisiones se dispersan más en el plano horizontal.

La afluencia de aire estable provoca la ocurrencia de fumigaciones del tipo II descritas por Bierly y Hewson (1962) fundamentalmente desde finales de octubre hasta marzo, cuando ocurren valores altos de frecuencia de la categoría "Muy estable". Este tipo de situación resulta del calentamiento por los niveles bajos del aire a su paso sobre la ciudad. La fuente de calor ciudad, puede mantener un gradiente inestable por arriba de dos o tres veces el nivel de los techos. La convección resultante llega hasta el nivel de los efluentes en el aire estable que ha estado arribando en la noche desde áreas rurales, y lleva los contaminantes hasta el suelo, provocando altas concentraciones. Esto se presenta fundamentalmente desde el final de la noche y en la madrugada, pudiendo observarse con cierta frecuencia en los meses citados anteriormente.

El tipo más común de fumigación, conocido como Tipo I, está asociado con el desarrollo de una inversión en noches despejadas y con vientos ligeros. Con el calentamiento solar, después del amanecer, el aire cercano a la superficie se calienta, creándose un gradiente adiabático o superadiabático y una capa de aire turbulento inestable asciende desde la superficie. La inversión nocturna es así destruida, desde abajo, por mezclamiento convectivo, lo que provoca que los contaminantes colectados durante la noche bajo la capa de inversión son llevados rápidamente a superficie, resultando en altas concentraciones en el terreno. Casos de este tipo pueden observarse entre las 06:30 y 09:30 para los meses señalados anteriormente. Además de las altas concentraciones en superficie, provocan agudas reducciones de la visibilidad.

Las condiciones inestables ocurren entre otras, fundamentalmente, cuando la temperatura dismi-

nuye con la altura a más de $10^{\circ}\text{C km}^{-1}$, por lo que los movimientos verticales son acelerados y el mezclamiento abundante. Debido a esto, el efluente se difunde rápidamente con altas concentraciones instantáneas en superficie, que ocurren a corta distancia de las chimeneas. En cualquier punto como promedio en el tiempo, no obstante, la concentración es baja. En las zonas cercanas a la bahía, existen evidencias de otro sistema local de viento, más pequeño y de menor intensidad. No obstante, su aseveración y el conocimiento de su influencia en el resto de los sistemas, necesitan de mayores mediciones de viento en esa área, y dentro de la ciudad para poder especificar patrones de circulación más detallados.

3. CONCLUSIONES

- 1.—Los meses con una menor altura promedio de la capa de mezclamiento, para la tarde, en la Ciudad de La Habana, son febrero y octubre. Para la mañana, los meses con una menor altura promedio son febrero y julio.
- 2.—En febrero coinciden valores mínimos, para la mañana y la tarde, de altura promedio de la capa de mezclamiento, cuestión importante para los análisis de dispersión de contaminantes en el aire. De junio a agosto, se observan descensos en los valores promedios de la altura de mezclamiento para la tarde, y de julio a agosto para la mañana.
- 3.—Los valores de altura de mezclamiento para la tarde, presentan una variación anual marcada, con máximos en abril, mayo y septiembre, y mínimos en febrero, julio y octubre.
- 4.—Los valores máximos de rapidez de transporte del viento para la mañana, ocurren en enero y los mínimos en mayo. Para la tarde, el máximo ocurre en abril y el mínimo en julio.
- 5.—Los valores máximos de la Concentración Promedio Normalizada X/Q , se alcanzan en los meses de febrero y octubre.
- 6.—Aunque con menor frecuencia que otras latitudes, se presentan casos de poca dispersión atmosférica, con duración de dos días o más, que pueden provocar la acumulación en el área de los contaminantes emitidos, produciendo concentraciones elevadas en superficie.

7.—Los máximos de categorías muy inestables ocurren con vientos del NNE y los máximos de categorías muy estables con vientos del ESE. En los restantes rumbos, entre éstos, ocurren los máximos de las demás categorías.

8.—Desde finales de octubre hasta marzo, coincidiendo con valores altos de la categoría "MUY Estable", se producen fumigaciones que provocan altas concentraciones y agudas reducciones de la visibilidad en el área.

4. RECOMENDACIONES

- a) Efectuar sondeos de la atmósfera con globos cautivos o torres, a menores plazos de tiempo, dentro del área de la Ciudad.
- b) Acometer trabajos de Climatología Sinóptica que permitan un mejor análisis de estos resultados.
- c) Efectuar mediciones meteorológicas complejas en el área de la Ciudad.
- d) Acometer los estudios complementarios necesarios para instrumentar los pronósticos de condiciones de poca capacidad dispersiva de la atmósfera que pueden provocar en superficie la ocurrencia de concentraciones elevadas.
- e) Acometer el análisis individual de los Factores de Emisión de las fuentes fundamentales de contaminación del aire en la ciudad (incluyendo el transporte), para poder precisar, en detalle, sus contribuciones a las concentraciones que se producen y elaborar

después las medidas necesarias para su control.

AGRADECIMIENTO

Se agradece la participación en este trabajo de los auxiliares de Meteorología, Graciela Angulo y Agustín Porrúa y la cooperación del Departamento de Aerología del Instituto de Meteorología, en la preparación de las cartas pseudoadiabáticas.

REFERENCIAS

- BIERLY E. W.; HEWSON E. W. (1962): Some Restrictive Meteorological Conditions to be considered in the desing of stacks. *J. Appl. Meteorol.* Vol. 1. No. 3.
- GROSS, E. W. (1970): The National Air pollution potential forecast program. ESSA Tech. Memo. WBTM NMC 47, National Meteorological Center, Washington, D. C. 28.
- HOLZWORTH, G. C. (1974): Climatological Aspects of the Composition and pollution of the Atmosphere. WMO Technical Note No. 139, Geneve, Switzerland, 43 pp.
- HOLZWORTH G. C. (1972): Mixing heights, wind speeds, and potential for urban air pollution throughout the contiguous United States. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Programs Publication No. AP - 101, Research Triangle Park, North Carolina, 118 pp.
- Mc CORMICK, R. A. (1970): Meteorological aspects of air pollution in urban and industrial districts. WMO Technical Note No. 106, Geneve, Switzerland.
- MILLER M. E. (1967): Forecasting afternoon mixing depths and transport wind speeds. *Mon. Wea. Rev.* vol. 95, No. 1
- SLADE D H. (Ed) (1971): Meteorologiya y atomnaya energiya (en ruso) *Gidrometeorologicheskoye Izdatel'svo, Leningrad*, 648 pp.
- TURNER, D. B. (1964): A Diffusion Model for an Urban Area. *J. Appl. Meteorol.* Vol. 3. No. 1.

Tabla 1. Valores de alturas de mezclamiento media en metros. Período 1970-1974.

	PERIODO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MAÑANA	1970-74	363	326	456	556	355	508	319	363	632	438	402	532
TARDE	1970-74	1521	1166	1577	1806	1795	1382	1284	1323	1577	1069	1205	1316

Tabla 2. Frecuencias en % de h para la mañana, por intervalos de altura y meses, para el período.

MESES	h (metros)						
	250	500	1000	1500	2000	2500	> 2500
ENERO	36,2	48,9	10,6	4,3	0,0	0,0	0,0
FEBRERO	26,8	46,3	19,5	4,9	2,4	0,0	0,0
MARZO	21,5	47,7	26,2	4,6	0,0	0,0	0,0
ABRIL	16,9	33,8	39,4	8,5	1,4	0,0	0,0
MAYO	36,7	41,8	19,0	2,5	0,0	0,0	0,0
JUNIO	33,3	26,7	31,7	5,0	3,3	0,0	0,0
JULIO	38,4	51,2	7,7	2,6	0,0	0,0	0,0
AGOSTO	24,2	48,5	27,3	0,0	0,0	0,0	0,0
SEPTIEMBRE	30,3	36,4	30,3	0,0	3,0	0,0	0,0
OCTUBRE	4,0	60,0	28,0	8,0	0,0	0,0	0,0
NOVIEMBRE	29,7	45,9	24,3	0,0	0,0	0,0	0,0
DICIEMBRE	17,9	42,9	30,4	5,4	3,6	0,0	0,0
PERIODO	27,0	42,7	25,1	4,1	1,1	0,0	0,0

Tabla 3. Frecuencia en % de las alturas de mezclamiento para la tarde, por intervalos de altura para los meses y el período.

MESES	h (metros)						
	250	500	1000	1500	2000	2500	> 2500
ENERO	0,0	3,3	8,2	24,6	49,2	13,1	1,6
FEBRERO	10,9	17,4	17,4	15,2	26,1	13,0	0,0
MARZO	0,0	1,5	10,8	30,8	38,5	16,9	1,5
ABRIL	0,0	0,0	9,6	12,3	41,1	34,2	2,7
MAYO	0,0	0,2	14,9	27,7	39,4	13,8	0,2
JUNIO	0,0	0,4	20,3	40,6	31,9	1,5	1,5
JULIO	0,2	0,0	24,0	64,0	10,0	0,0	0,0
AGOSTO	0,0	7,9	15,8	50,0	18,4	7,9	0,0
SEPTIEMBRE	0,0	5,4	16,2	32,4	35,1	8,1	2,7
OCTUBRE	0,0	8,1	27,0	48,6	13,5	2,7	0,0
NOVIEMBRE	0,0	5,4	35,1	37,8	21,6	0,0	0,0
DICIEMBRE	0,2	3,0	28,6	38,8	24,5	0,0	0,0
PERIODO	1,1	4,4	17,7	33,4	31,4	10,8	1,2

Tabla 4. Valores de velocidad de transporte del viento media mensual y del período, para la mañana. (En m/seg).

MESES	AÑOS					PERIODO
	1970	1971	1972	1973	1974	
ENERO	—	—	20,6	7,3	6,9	11,6
FEBRERO	—	—	6,5	9,1	8,0	7,9
MARZO	—	6,4	7,5	9,6	15,4	9,7
ABRIL	—	10,5	6,8	11,3	8,5	9,3
MAYO	—	4,6	5,9	5,1	4,5	5,0
JUNIO	—	3,8	6,2	2,3	25,7	9,5
JULIO	—	4,8	7,1	—	3,8	5,2
AGOSTO	—	8,7	6,5	4,8	—	6,7
SEPTIEMBRE	—	—	4,9	10,1	—	7,5
OCTUBRE	—	2,3	6,8	13,6	—	7,6
NOVIEMBRE	—	7,6	5,8	—	—	6,7
DICIEMBRE	—	6,7	6,1	8,1	10,0	7,7

Tabla 5. Valores de velocidad de transporte del viento media mensual y del período, para la tarde. (En m/seg).

MESES	AÑOS					PERIODO
	1970	1971	1972	1973	1974	
ENERO	4,7	3,4	5,5	4,2	3,1	4,2
FEBRERO	5,2	7,0	6,9	3,8	3,6	5,3
MARZO	6,8	5,4	6,6	6,4	4,2	5,9
ABRIL	6,3	8,0	6,5	8,4	4,7	6,8
MAYO	8,6	5,0	5,1	5,3	2,8	5,4
JUNIO	5,1	4,2	5,1	4,7	4,4	4,7
JULIO	5,3	5,4	5,8	7,3	3,7	5,5
AGOSTO	4,5	5,3	5,5	4,1	6,6	5,2
SEPTIEMBRE	3,6	6,4	5,2	3,4	5,9	4,9
OCTUBRE	5,5	4,4	4,9	4,8	6,6	5,2
NOVIEMBRE	4,7	3,9	3,9	4,3	6,1	4,6
DICIEMBRE	3,6	4,9	5,2	3,3	5,5	4,5

Tabla 6. Frecuencias en % de ocurrencias de velocidad de transporte del viento, para la mañana, en m/seg por intervalos y meses.

MESES	INTERVALOS DE u (m/seg)										
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20
ENERO	7,0	22,5	15,5	14,1	12,7	9,9	5,6	9,9	1,4	1,4	0,0
FEBRERO	0,0	12,2	17,0	24,4	19,5	9,8	4,9	4,9	2,4	0,0	4,9
MARZO	12,2	17,2	17,2	24,1	1,7	15,5	5,2	5,2	0,0	0,0	1,7
ABRIL	3,6	7,0	21,4	17,9	17,9	10,6	5,4	5,4	3,6	1,8	5,4
MAYO	14,9	22,4	31,3	11,9	10,5	6,0	1,5	0,0	0,0	1,5	0,0
JUNIO	23,7	30,5	23,7	8,5	0,0	5,1	1,7	1,7	0,0	1,7	3,4
JULIO	5,1	20,5	23,1	23,1	12,8	10,3	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0
AGOSTO	8,8	29,4	14,7	26,5	8,8	5,9	5,9	0,0	0,0	0,0	0,0
SEPTIEMBRE	5,0	30,0	40,0	10,0	5,0	5,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0
OCTUBRE	7,0	25,6	30,2	14,0	7,0	2,3	2,3	2,3	7,0	0,0	2,3
NOVIEMBRE	5,7	20,0	28,5	25,7	2,9	2,9	0,0	2,9	2,9	2,9	5,6
DICIEMBRE	12,7	12,7	9,1	18,2	11,0	12,7	11,0	5,4	5,4	1,8	0,0
TOTAL	9,7	20,2	21,6	17,6	9,3	8,4	4,3	3,8	1,9	1,0	2,2

Tabla 7. Valores de X/Q (Concentración promedio normalizada) media mensual y del período, para la mañana. (En seg m^{-1}).

MESES	AÑOS					PERIODO
	1970	1971	1972	1973	1974	
ENERO	—	—	9	23	10	14
FEBRERO	—	—	7	21	10	13
MARZO	—	20	9	5	2	9
ABRIL	—	4	12	3	8	7
MAYO	—	19	18	20	76	33
JUNIO	—	22	17	32	12	21
JULIO	—	19	8	—	34	20
AGOSTO	—	13	8	29	—	17
SEPTIEMBRE	—	—	10	4	—	7
OCTUBRE	—	13	9	34	—	19
NOVIEMBRE	—	21	8	—	—	15
DICIEMBRE	—	6	13	29	3	13

Tabla 8. Valores de X/Q (Concentración promedio normalizada) media mensual y del período, para la tarde. (En seg m^{-1}).
(Sólo para comparar la variación mensual y anual y no la magnitud)

MESES	AÑOS					PERIODO
	1970	1971	1972	1973	1974	
ENERO	—	—	2	4	5	4
FEBRERO	—	—	3	41	10	18
MARZO	—	2	2	3	2	2
ABRIL	—	1	1	2	3	2
MAYO	—	5	2	2	7	4
JUNIO	—	3	4	4	4	4
JULIO	—	2	2	8	5	4
AGOSTO	—	2	2	3	—	2
SEPTIEMBRE	—	—	2	3	—	3
OCTUBRE	—	15	3	2	—	7
NOVIEMBRE	—	4	4	—	—	4
DICIEMBRE	—	2	2	9	3	4

Tabla 9. Frecuencia total de episodios con persistencia de 2 o más días, para el período 1970-74. Entre paréntesis aparece el total de días con esas condiciones.

Rapidez del Viento m/seg	ALTURA DE MEZCLAMIENTO (metros)			
	500	1000	1500	2000
2	0	0	1 (2)	3 (7)
4	3 (8)	1 (2)	14 (35)	12 (24)
6	0	4 (8)	7 (14)	15 (33)

Tabla 10. Relación entre σ_0 y las categorías de estabilidad.

CATEGORÍA DE ESTABILIDAD	σ_0°
MUY INESTABLE	25,0
INESTABLE	20,0
LIGERAMENTE INESTABLE	15,0
NEUTRAL	10,0
LIGERAMENTE ESTABLE	5,0
ESTABLE	2,5
MUY ESTABLE	1,3

Tabla 11. Frecuencia mensual y anual, en % de categorías de estabilidad, en la estación Casablanca, para el período 1970-1974.

CLASES DE ESTABILIDAD	FRECUENCIA MENSUAL %													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	
MUY INESTABLE	1	1,0	0,5	9,7	13,7	9,5	11,5	12,2	9,4	6,1	2,1	0,6	0,1	6,3
INESTABLE	2	25,0	21,5	19,3	19,0	19,1	17,6	18,3	17,3	16,3	15,1	16,2	18,5	18,4
LIGERAMENTE INESTABLE	3	11,0	15,1	10,7	9,4	10,5	7,7	8,0	12,1	12,5	10,3	12,5	10,3	11,1
NEUTRAL	4	14,0	9,1	4,2	5,0	3,2	4,1	2,2	2,7	8,0	15,1	12,1	11,6	7,6
LIGERAMENTE ESTABLE	5	2,0	5,1	4,4	8,2	3,3	1,9	2,0	4,6	3,3	5,9	6,6	4,8	4,5
ESTABLE	6	15,0	22,2	16,9	19,7	26,4	31,4	31,0	32,3	33,1	24,5	22,3	21,8	25,0
MUY ESTABLE	7	32,0	26,3	34,8	25,0	28,1	25,8	26,3	21,5	20,7	27,1	29,7	32,0	27,4

Tabla 12. Frecuencias en % de categorías de estabilidad, por rumbos del viento, para el período 1970-74, en la estación Casablanca.

RUMBOS	CATEGORIAS DE ESTABILIDAD						
	Muy Inest.	Inest.	Lig. Inest.	Neutral	Lig. Est.	Estable	Muy Est.
N	8,5	7,6	8,2	9,8	11,4	3,4	1,6
NNE	25,3	18,3	18,7	22,2	14,3	6,4	3,0
NE	17,0	13,0	17,4	16,4	10,7	6,0	4,0
ENE	7,6	12,5	13,8	19,2	20,8	14,8	14,8
E	4,7	4,7	3,9	2,9	6,1	12,2	15,5
ESE	5,6	8,2	5,0	3,0	5,0	10,8	17,8
SE	6,0	4,2	2,4	1,7	4,4	5,8	5,0
SSE	5,0	7,0	5,7	2,9	2,7	5,9	5,6
S	2,6	4,6	7,4	4,4	5,5	3,9	3,0
SSW	3,0	5,1	5,5	5,2	4,7	2,5	1,7
SW	1,1	1,0	1,6	0,8	0,3	1,0	0,2
WSW	0,2	0,5	0,4	0,3	0,1	0,3	0,5
W	0,2	0,3	0,4	0,3	0,0	0,1	0,2
WNW	0,6	1,6	0,8	0,9	0,3	0,4	0,1
NW	1,3	2,0	0,8	0,5	3,3	0,4	0,1
NNW	4,1	5,6	4,5	8,2	9,8	2,8	1,0
CALMAS	7,2	3,0	3,5	1,3	0,0	23,5	26,5