

Estudio de variables meteorológicas secundarias que intervienen en la difusión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio de Pinar del Río

Study of secondary meteorological variables involved in the diffusion of atmospheric pollutants. Case study of Pinar del Río.

Dagoberto Rodríguez Valdés

dagoberto@vrect.upr.edu.cu

Universidad de Pinar del Río

Liuben Echevarría Pérez

Universidad de Pinar del Río

Almara Sánchez Díaz

Centro Meteorológico

Provincial de Pinar del Río

Osvaldo Cuesta Santos

osvaldo.cuestas@insmet.cu

Instituto de Meteorología

Recibido: octubre 4, 2011; aceptado: abril 18, 2012.

Resumen

El presente estudio se realizó en la ciudad de Pinar del Río en la provincia homónima, en el período 2006–2008, donde se analizó el comportamiento por las variables meteorológicas, estabilidad atmosférica y altura de la capa de mezcla que intervienen en la difusión de los contaminantes en la atmósfera, para su cálculo se utilizaron los métodos de Turner y de Pasquill, desarrollados los mismos en el Sistema Automatizado de Gestión de Información de Fuentes Contaminantes (SAGIFC), los datos meteorológicos de superficie se obtuvieron del centro meteorológico provincial de Pinar del Río. Como resultado se tiene: la ocurrencia de las categorías de estabilidad atmosférica en cantidad de días por meses a las horas analizadas para todo el período, el mismo procedimiento se realizó para determinar las diferentes alturas de la capa de mezcla. A modo de conclusión se muestran los horarios en que son más favorables y desfavorables las condiciones de dispersión de los contaminantes en la vertical, proponiéndose de esta forma como recomendaciones, los horarios y épocas del año en que sería más conveniente que las fuentes contaminantes realicen el mayor peso de las actividades de produc-

ción, sin afectar los planes económicos, para de esta forma tratar de disminuir el potencial contaminante en el área de estudio y las diferentes implicaciones que podría traer a la salud de las personas.

PALABRAS CLAVE: Estabilidad atmosférica, Altura de la capa de mezcla, Modelos de dispersión, Difusión de contaminantes.

Abstract

This study was carried out in the municipality Pinar del Río in the province of the same name from the year 2006 to 2008, which analyzed the behavior of weather variables, atmospheric stability and mixing-layer height involved in the diffusion of pollutants in the atmosphere, the Pasquill and Turner methods were used for its calculation, developed in the Automated Information Management Pollutant (SAGIFC), the meteorological data of the surface were obtained from the provincial meteorological center of Pinar del Río. The occurrence of atmospheric stability categories in number of days, months at the analyzed hours for all the period studied, was obtained as a result, the same procedure was performed to determine the different heights of the mixed

layer. In conclusion, the study shows the periods in which the conditions are most appropriate and when are less appropriate for the dispersion of pollutant in the vertical, and proposing as recommendations, the time and seasons of the year in which would be more convenient that the pollutant sources make the most important part in the production activities, without affecting economic plans, and in this way to try to reduce the polluting potential in the studied area and the different implications that could bring to the health of people.

KEYWORDS: Atmospheric stability, Mixing-layer height, Dispersion models, Diffusion of pollutants.

Introducción

Los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos utilizados en la actualidad incluyen una gran cantidad de variables atmosféricas y datos, tanto tecnológicos de los focos emisores, como del terreno, entre otros. En el caso de las variables meteorológicas secundarias existe una tendencia cada vez más creciente por conocer este comportamiento; ello se muestra en los progresos obtenidos no solo en el campo experimental, sino también en el teórico. Los principales avances en el contexto internacional en el conocimiento de la turbulencia en la atmósfera y los estudios sobre la altura de la capa de mezcla o capa límite se han desarrollado simultáneamente a lo largo de todo el siglo xx. Así, la teoría estadística de la turbulencia y los problemas relativos a la difusión se deben, en gran medida, al trabajo de G. I. Taylor entre los años 1915 y 1938, (Garratt, 1992). En la década de cincuentas y a principio de los sesentas del siglo xx, se realizaron grandes avances en el conocimiento de los procesos turbulentos bajo condiciones de flotabilidad y se desarrollaron las relaciones de flujo-gradiente. De este modo, en 1954 nacen la teoría de similitud acerca de la capa superficial (Monin-Obukhov) y la teoría de similitud (Kazanski y

Monin), en 1960 y 1961 para la capa límite. Entre 1960 y 1980 se realizaron grandes despliegues instrumentales de cuyos resultados se obtuvieron importantes parametrizaciones (Núñez, 2002), entre estos, destaca el experimento de Wangara (1967), el de Kansas (1968) y el de Minnesota (1973).

Desde finales del siglo xx (Seibert *et al.*, 1998, 2000) se ha venido reclamando el establecimiento de protocolos que, en materia de medio ambiente, tengan como objetivo la armonización de las definiciones y los procedimientos para el cálculo de todos los parámetros relativos a la calidad del aire, entre los cuales se encuentra la altura de la capa de mezcla; uno de los primeros pasos que se han llevado a cabo en este sentido está enmarcado en el contexto de la Cooperación Europea en el Campo Científico y de Investigación Tecnológica (COST Action 710: European Co-operation in the Field of Scientific and Technological Research), dividido en cuatro grupos de trabajo, cuyo objetivo era estudiar el balance de energía en superficie, la altura de la capa de mezcla, los perfiles verticales de variables promedio y turbulentas, y los fenómenos asociados a terrenos complejos (Fisher *et al.*, 1998).

En Cuba, asimismo, se han realizado estudios para determinar o estimar el comportamiento de las variables meteorológicas secundarias, que datan desde la década de los setentas del siglo xx, como son los trabajos de Álvarez (1976) y López (1978), hasta llegar a la década actual, con los estudios de Turtós *et al.* (2003), Rodríguez (2007) y Rodríguez *et al.* (2008).

No obstante todos estos estudios, actualmente, existe la necesidad de profundizar en el conocimiento de las diferentes variables meteorológicas que intervienen en la dispersión de los contaminantes, en especial, en el caso de las variables meteorológicas secundarias, puesto que para su estudio se necesita del instrumental necesario con miras a realizar sondeos de la atmósfera superior y obtener estos datos, pero nuestro país no dispone de estos instrumentos por ser muy costosos. Todo ello trae consigo que los

actuales exámenes de calidad del aire se apoyen más en la modelación, con énfasis en los modelos ISC3, Aermody el CALPUFF, los cuales incorporan un gran número de variables y parámetros, y se obtienen resultados más representativos. Todo esto se ve favorecido a la luz del desarrollo tecnológico.

La mayoría de las fuentes fijas de la ciudad de Pinar del Río presentan tecnologías atrasadas dado su tiempo de explotación, lo cual incide negativamente en las emisiones de contaminantes y agrava la situación la ubicación neurálgica de algunas, en especial las que se encuentran en el sector urbano; todo ello se traduce en un deterioro de la calidad del aire. Tal situación promovió el presente estudio, cuyo objetivo principal es obtener el comportamiento de la estabilidad atmosférica y la altura de la capa de mezcla entre 2006 y 2008.

Materiales y métodos

Para este estudio se tomaron los datos meteorológicos de superficie de la estación de la ciudad de Pinar del Río, perteneciente al Centro Meteorológico Provincial de Pinar del Río, del Instituto de Meteorología del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba.

La estabilidad atmosférica es conocida como la condición de la atmósfera que se opone al desarrollo

de nubes de los géneros cúmulo y cumulonimbo, y se caracteriza por estados del cielo despejados o con presencia de nubes estratiformes. El cálculo de esta se realizó mediante el método de Turner (1964), el cual depende de la velocidad del viento en superficie, la insolación y la nubosidad, tanto de día, como de noche; de estas variables, la única que no se registra en las estaciones meteorológicas de Cuba es la insolación, la cual queda definida en este método como el ángulo de inclinación de los rayos solares con respecto a la superficie terrestre (Tabla 1). Para aplicar este método se utilizó el Sistema Automatizado de Gestión de Información de Fuentes Contaminantes (SAGIFC) (Rodríguez, 2007). Este programa tiene implementado el método de Turner; los valores de elevación solar se obtienen a partir del *software* Sol (desarrollado en el Instituto de Meteorología de Cuba), los cuales están incluidos en la base de datos de SAGIFC; además, también tiene establecido el método de Pasquill (1961) (Tabla 2), que constituyen las reglas para estimar la estabilidad atmosférica y la altura de la capa de mezcla atmosférica. La estabilidad atmosférica se obtiene como se abordó a partir del método de Turner, y la conjunción de este procedimiento y el de Pasquill arrojan los valores de altura de la capa de mezcla atmosférica.

Tabla 1. Método de Turner para estimar la estabilidad atmosférica

Velocidad del viento U (m/s)	Día: Insolación				Cielo cubierto: Nubosidad 10/10, Altura		Noche: Nubosidad	
	Fuente: $\alpha > 60^\circ$	Moderada: $35 < \alpha < 60^\circ$	Ligera: $\alpha < 35^\circ$	Débil: $\alpha < 15^\circ$	< 2133.6 m	> 4/10	< 4/10	
0-0.77	A	A	B	C	D	F	F	
0.77-1.80	A	B	B	C	D	F	F	
1.80-2.83	A	B	C	D	D	E	F	
2.83-3.34	B	B	C	D	D	E	F	
3.34-3.86	B	B	C	D	D	D	E	
3.86-4.89	B	C	C	D	D	D	E	
4.89-5.40	C	C	D	D	D	D	E	
5.40-5.92	C	C	D	D	D	D	D	
>5.92	C	D	D	D	D	D	D	

Tabla 2. Reglas para estimar la clase de estabilidad atmosférica y las alturas de la mezcla a partir de la velocidad del viento y el grado de insolación

	Velocidad del Viento	Clase de Pasquill (Estabilidad Atmosférica)	Altura de la mezcla (m)
Día (Alta Insolación)	0-2 m/s	A (muy inestable)	1600
	2-3 m/s	B (inestable)	1200
	3-5 m/s	C (ligeramente inestable)	800
	>5 m/s	D (neutra)	560
Día (Baja Insolación)	0-2 m/s	B	1200
	2-3 m/s	C	800
	3-5 m/s	D	560
	>5 m/s	D	560
Noche	0-2 m/s	F (estable)	200
	2-3 m/s	F	200
	3-5 m/s	E (ligera estabilidad)	320
	>5 m/s	D (neutra)	560
	Nublado	D	560

Las diferentes categorías de estabilidad atmosférica y altura de la capa de mezcla son identificadas en el trabajo de la forma siguiente:

- *— A Muy inestable (1 600 m)
- B Inestable (1 200 m)
- — C Ligeramente inestable (800 m)
- ▲— D Neutra (560 m)
- E Ligera estabilidad (320 m)
- ◆— F Estable (200 m)

Discusión de los resultados

Comportamiento de la estabilidad atmosférica en la ciudad de Pinar del Río

El comportamiento de la estabilidad atmosférica en la ciudad de Pinar del Río se muestra en las figuras de la 2 a la 9, en las cuales se establece la cantidad de días que ocurre una determinada categoría de estabilidad distribuida por meses para el período 2006-2008.

En la figura 1 se muestra el comportamiento de la estabilidad atmosférica a las 0 UTC (19:00 horas), expresada en cantidad de *días por meses*, para cada estabilidad. Como puede apreciarse, a esta hora, las categorías que ocurren son: *ligeramente inestable* (C), *neutra* (D), *ligeramente estable* (E) y *estable* (F), apreciándose que la única que ocurre en todo el período es la ca-

tegoría de estabilidad *neutra* (D), la cual presenta sus valores máximos en junio (27 días) y en mayo (22 días), mientras que en los demás meses estuvo por debajo de 11 días; este comportamiento obedeció a que en mayo y junio existió un aumento en la cantidad de días con bastante nubosidad y velocidad del viento (generalmente, superior a 2.24 m/s). En el caso de las categorías *ligeramente estable* (E) y *estable* (F), tuvieron su presencia en todos los meses, excepto en junio y julio, y la categoría *estable* (F) resultó la de mayor cantidad de días de ocurrencia al año, teniendo sus máximos en septiembre y octubre (sobrepasando 80 días), y sus mínimos en mayo y agosto. La categoría *ligeramente estable* (E) nunca llegó a 20 días y su mayor valor lo alcanzó en enero, con 15 días; este comportamiento es debido a la componente estacional, puesto que en los meses de verano la cantidad de horas de sol es mayor, y a esta hora todavía existe radiación solar y la atmósfera —como puede apreciarse— presenta un comportamiento mayormente inestable, mostrándose una mayor presencia de la categoría *ligeramente inestable* (C), la cual ocurrió solo en mayo-agosto, y presentó sus valores máximos en julio (alrededor de 80 días) y en junio (alrededor de 60 días).

La figura 2 muestra el comportamiento de la estabilidad atmosférica a las 3 UTC (22:00 horas), ex-

presada en cantidad de *días por meses*, para cada estabilidad. Se aprecia que, a esta hora de la noche, solo ocurren las categorías de estabilidad *neutra* (D), *ligeramente estable* (E) y *estable* (F), estando presente las categorías *ligeramente estable* (E) y *estable* (F) en todo el período; este comportamiento obedece a que a esta hora disminuye la temperatura por el proceso de irradiación terrestre, el cual es influenciado en mayor grado por la presencia de un mayor número de días con cielos despejados o poca nubosidad y poca fuerza del viento, la cual, mayormente, no supera 1 m/s, y ello provocó que la categoría *estable* (F) fuese la de mayor ocurrencia en cantidad de días a lo largo del año y durante el período analizado (oscilando todo el año alrededor de 80 días y llegando a alcanzar el valor máximo de 92 días en julio). La categoría *ligeramente estable* (E) tuvo sus valores máximos en noviembre y diciembre (10 días) y, por último, la categoría *neutra* (D), excepto en julio, tuvo su ocurrencia en los demás meses y su valor máximo lo alcanzó en diciembre (9 días); su presencia estuvo liada a días con bastante nubosidad y velocidades del viento superiores a 3 m/s.

La figura 3 muestra el comportamiento de la estabilidad atmosférica a las 6 UTC (1:00 horas), expresada en cantidad de *días por meses*, para cada estabilidad. A esta hora, al igual que a las 3 UTC, solo ocurren las categorías de estabilidad *neutra* (D), *ligeramente estable* (E) y *estable* (F), estando presentes durante todo el período; en este lapso de la madrugada continúa enfriándose la tierra por el proceso de irradiación terrestre, debido a una mayor presencia de días con cielos despejados y la poca velocidad del viento, dando como resultado que la categoría de estabilidad de mayor ocurrencia sea la *estable* (F), oscilando sus valores mensuales alrededor de 80 días, alcanzando su valor máximo en julio (88 días). La categoría *ligeramente estable* (E) tuvo su valor máximo en diciembre (12 días) y su valor mínimo en junio (1 día); y, por último, la categoría *neutra* (D) fue la de menor ocurrencia —y tuvo

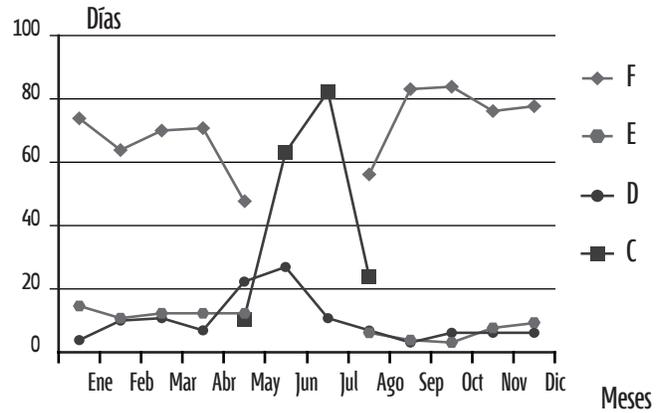


Fig. 1 Comportamiento de la categoría estabilidad atmosférica por cantidad de días por meses a las 0 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

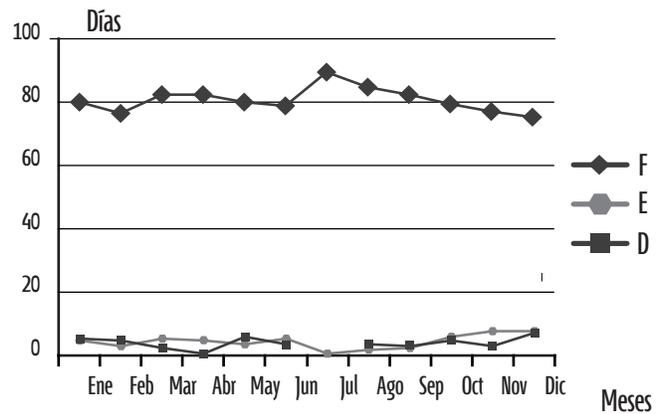


Fig. 2 Comportamiento de la categoría estabilidad atmosférica por cantidad de días por meses a las 3 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

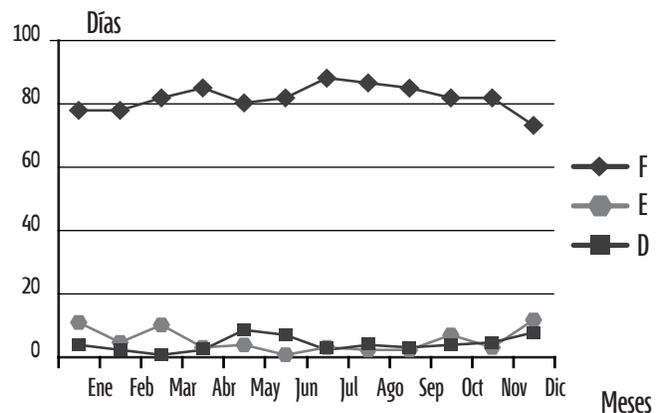


Fig. 3 Comportamiento de la categoría estabilidad atmosférica por cantidad de días por meses a las 6 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

su valor máximo en mayo (9 días)—, lo cual obedeció a que, en este horario de madrugada, ocurrieron pocos días con bastante nubosidad o cielo nublado y con una velocidad del viento superior a 3 m/s.

La figura 4 muestra el comportamiento de la estabilidad atmosférica a las 9 UTC (4:00 horas), expresada en cantidad de *días por meses*, para cada estabilidad. A esta hora solo ocurrieron las categorías de estabilidad *neutra* (D), *ligeramente estable* (E) y *estable* (F), estando presente en todo el período la categoría *estable* (F), sobrepasando 80 días mensuales, excepto en enero, febrero y diciembre (cuando los valores estuvieron muy próximos a esta cifra), así como en enero, que alcanzó exactamente 80 días; su valor máximo lo obtuvo en agosto (91 días). Este comportamiento obedece a que, en este horario de la madrugada, se alcanza el mayor número de días con cielos despejados o con poca nubosidad y velocidades del viento con valores que, generalmente, no sobrepasan 2 m/s. A causa de que el proceso de irradiación se va profundizando e intensificando durante la noche, la categoría *ligeramente estable* (E) ocurrió en todos los meses con excepción de abril, y su valor máximo lo alcanzó en diciembre (10 días), y su comportamiento obedece, en general, a la presencia de noches con velocidades del viento entre 2 m/s y 4 m/s, y cielos que van desde despejados hasta casi nublados, predominando los valores intermedios

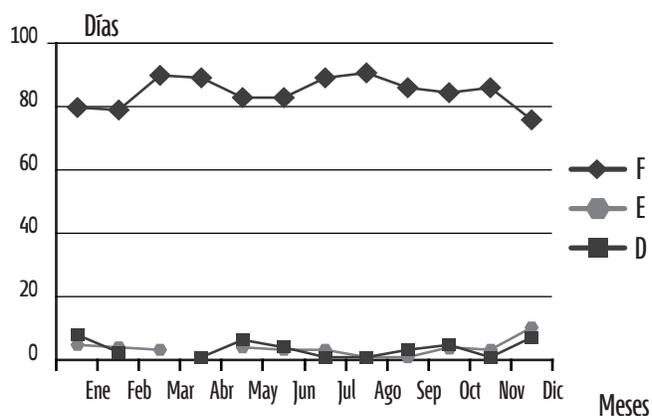


Fig. 4 Comportamiento de la categoría estabilidad atmosférica por cantidad de días por mes a las 9 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

4/8, 5/8 y 6/8, respectivamente. Por último, la categoría *neutra* (D), excepto en marzo, tuvo su ocurrencia todos los meses y fue la categoría de menor presencia en cantidad de días por meses, alcanzando su valor máximo en enero (8 días), lo cual obedeció a que existieron pocos días nublados o con bastante nubosidad y velocidades del viento superiores a 3 m/s.

La figura 5 muestra el comportamiento de la estabilidad atmosférica a las 12 UTC (7:00 horas), expresada en cantidad de *días por meses*, para cada estabilidad. A esta hora ocurren las categorías de estabilidad *inestable* (B), *ligeramente inestable* (C), *neutra* (D), *ligeramente estable* (E) y *estable* (F), apreciándose que la categoría de estabilidad *neutra* (D) es la única que ocurre en todo el período, y tiene sus valores máximos en octubre (19 días); este comportamiento estuvo ligado a la ocurrencia de días mayormente nublados y velocidades del viento que, en general, sobrepasaron 2 m/s. La categoría *ligeramente inestable* (C), excepto en enero, ocurrió en los demás meses y fue la de mayor ocurrencia en cantidad de días por meses, presentando su valor máximo en julio (87 días); este comportamiento está regido por la componente estacional y provocó que los meses de menor ocurrencia de esta categoría fuesen febrero y diciembre, respectivamente, puesto que en estos meses las horas de luz solar son más cortas. Los otros dos

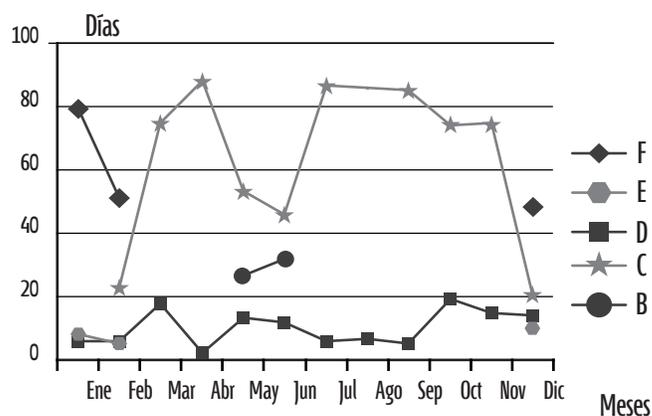


Fig. 5 Comportamiento de la categoría estabilidad atmosférica por cantidad de días por mes a las 12 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

meses en que disminuyó la ocurrencia de esta categoría fueron mayo y junio, porque fue cuando único ocurrió la categoría *inestable* (B), teniendo su mayor presencia en junio (32 días), lo cual obedeció a que las horas de luz solar alcanzan sus valores mayores y, por ende, la radiación solar a esta hora es más fuerte y provoca una mayor inestabilidad en la atmósfera; esto se debe –como se mencionó– a la marcada tendencia estacional. Por último, las categorías *ligeramente estable* (E) y *estable* (F) solo ocurrieron en enero, febrero y diciembre, teniendo una mayor presencia la categoría *estable* (F) –que alcanzó su valor máximo en enero (79 días)– y la categoría *ligeramente estable* (E) –la cual tuvo su valor máximo en diciembre (10 días)–; la ocurrencia de estas dos categorías en este lapso está regida por la poca duración de las horas de luz solar en estos meses, lo cual provoca que a esta hora todavía no haya salido el sol en gran parte de los días y, por consiguiente, la atmósfera exhiba un comportamiento más estable.

La figura 6 muestra el comportamiento de la estabilidad atmosférica a las 15 UTC (10:00 horas), expresada en cantidad de *días por meses*, para cada estabilidad. A esta hora ocurren las categorías de estabilidad *muy inestable* (A), *inestable* (B), *ligeramente inestable* (C) y *neutra* (D); donde las categorías *inestable* (B) y *ligeramente inestable* (C) ocurrieron en todo el período

do y se evidenció que la categoría *inestable* (B) fue la de mayor ocurrencia a lo largo del año en el período analizado, presentando sus valores máximos en abril (56 días); este comportamiento se debió a la presencia de días con velocidades del viento que oscilaron entre 1 m/s y 3 m/s, y días parcialmente nublados. La categoría *ligeramente inestable* (C) también tuvo una alta ocurrencia a lo largo del año, con su valor máximo en diciembre (54 días), y su ocurrencia obedeció a la presencia de días parcialmente nublados con velocidades del viento que, en general, fueron superiores a 2.8 m/s. La categoría *neutra* (D), excepto en abril, tuvo su presencia en los demás meses y presentó su valor máximo en enero (20 días); su ocurrencia se debió a la presencia de días mayormente nublados, con velocidades del viento que, en mayoría, superaban 2.8 m/s. Por último, a esta hora del día comienza a ocurrir la categoría *muy inestable* (A), con una presencia desde febrero hasta noviembre, obedeciendo ello al comportamiento estacional, lo cual se traduce en una mayor ocurrencia de esta categoría hacia los meses de verano, dado el aumento de la radiación solar, con su valor máximo en septiembre (32 días).

La figura 7 muestra el comportamiento de la estabilidad atmosférica a las 18 UTC (13:00 horas), expresada en cantidad de *días por meses*, para cada estabilidad. A esta hora, al igual que a las 15 UTC, están presentes las

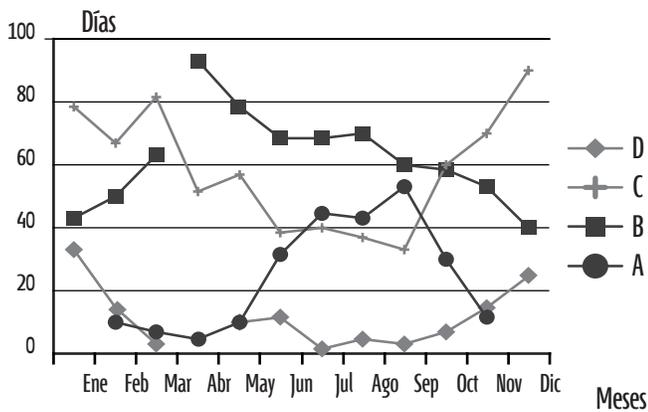


Fig. 6 Comportamiento de la categoría estabilidad atmosférica por cantidad de días por meses a las 15 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

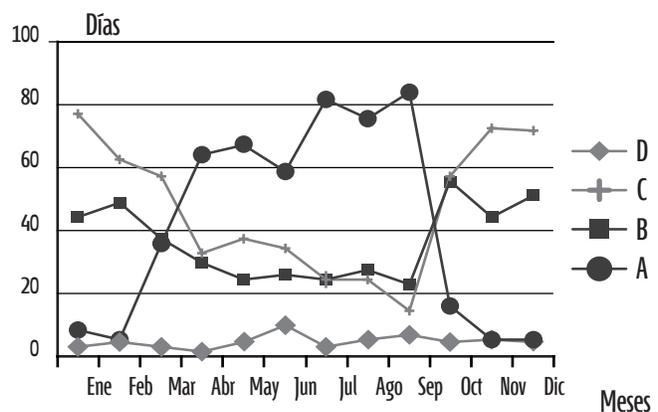


Fig. 7 Comportamiento de la categoría estabilidad atmosférica por cantidad de días por meses a las 18 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

categorías *muy inestable* (A), *inestable* (B), *ligeramente inestable* (C) y *neutra* (D) —ocurriendo durante todo el período—. Como puede apreciarse, a esta hora, la atmósfera presenta su mayor inestabilidad, puesto que el sol alcanza el mayor ángulo de elevación, lo cual evidencia un predominio de la ocurrencia de la categoría *muy inestable* (A), que alcanza su valor máximo en septiembre (59 días) y sus valores mínimos en los meses de invierno; este comportamiento obedeció al proceso cíclico de la componente estacional. La categoría *ligeramente inestable* (C) sucedió a la anterior en mayor número de días de ocurrencia, y presentó sus valores máximos en enero, noviembre y diciembre (estando por encima de 50 días) respectivamente. La categoría *inestable* (B) tuvo su mayor presencia en octubre (alcanzando 39 días), mientras que, por último, la categoría *neutra* (D) resultó la de menor ocurrencia en todo el período, con un valor máximo en junio (7 días), dado que en este horario existieron pocos días nublados y con velocidades del viento altas.

La figura 8 muestra el comportamiento de la estabilidad atmosférica a las 21 UTC (16:00 horas), expresada en cantidad de *días por meses*, para cada estabilidad. A esta hora del día, al igual que a las 15 y 18 UTC, ocurrieron las categorías *muy inestable* (A), *inestable* (B), *ligeramente inestable* (C) y *neutra* (D); en este horario de la tarde, la atmósfera aún exhibe un comportamiento,

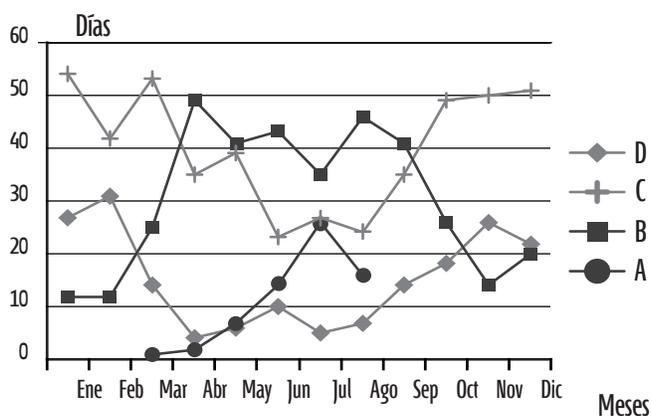


Fig. 8 Comportamiento de la categoría estabilidad atmosférica por cantidad de días por meses a las 21 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

en general, inestable, pero esta tendencia disminuye con respecto a las 18 UTC. Se aprecia que la única categoría que no ocurrió en todo el período fue la *muy inestable* (A), que tuvo su presencia de abril a agosto, lo cual obedece —como se ha mencionado— al comportamiento estacional, y alcanzó su valor máximo en julio (26 días). La categoría de mayor ocurrencia fue la *ligeramente inestable* (C), con sus valores máximos en los meses de invierno, sobre todo en enero (54 días), puesto que en estos meses disminuyó la ocurrencia de la categoría *inestable* (B), la cual alcanzó sus valores máximos en los meses de verano (llegando, en abril, hasta 49 días). Por último, la categoría *neutra* (D) tuvo su mayor presencia en febrero (cuando alcanzó 31 días) y enero (27 días); esto obedece a que predominó la ocurrencia de velocidades del viento, en general, superiores a 5 m/s, así como a una mayor presencia de días con bastante nubosidad.

El comportamiento de la estabilidad atmosférica a las 0 UTC (19:00 horas) estuvo regido por las categorías *ligeramente inestable* (C), *neutra* (D), *ligeramente estable* (E) y *estable* (F), donde la categoría *neutra* (D) resultó la única que ocurrió en todo el período y la de mayor ocurrencia fue la categoría *estable* (F), que alcanzó sus valores mayores en septiembre y octubre (sobrepasando 80 días); este comportamiento obedece al proceso cíclico de las estaciones del año, dando como lugar que, a esta hora, prevalezcan las categorías más estables a lo largo del año, excepto en los meses de verano, cuando predomina la categoría *ligeramente inestable* (C), propiciada por el aumento de las horas de luz solar.

En los horarios nocturnos [3 UTC (22:00 horas), 6 UTC (1:00 horas) y 9 UTC (4:00 horas)], el comportamiento de la estabilidad atmosférica estuvo regido por las categorías de estabilidad *neutra* (D), *ligeramente estable* (E) y *estable* (F), donde esta última categoría prevaleció en cuanto a la cantidad de días (con valores mensuales alrededor de 80 días para todo el período analizado), alcanzando su mayor presencia

en el horario de las 9 UTC; este comportamiento obedece a que en este lapso de la madrugada la superficie terrestre ha liberado casi toda la energía solar adsorbida durante el día.

A las 12 UTC (7:00 horas) existe la presencia de la mayoría de las categorías de estabilidad atmosférica: *inestable* (B), *ligeramente inestable* (C), *neutra* (D), *ligeramente estable* (E) y *estable* (F), lo cual obedece a la marcada influencia del comportamiento estacional. Ello trae consigo la ocurrencia de las categorías más estables en los meses de invierno, con poca duración de las horas de luz solar y, en comportamiento opuesto, las categorías más inestables, donde se muestra que la categoría *inestable* (B) solo ocurrió en mayo y junio. Teniendo presencia en todo el período solamente las categorías *neutra* (D) y *ligeramente inestable* (C), la cual resultó de mayor ocurrencia por meses, sobrepasando 80 días en abril, julio, agosto y septiembre.

En los horarios diurnos [15 UTC (10:00 horas), 18 UTC (13:00 horas) y 21 UTC (16:00 horas)], las estabildades presentes son las categorías: *muy inestable* (A), *inestable* (B), *ligeramente inestable* (C) y *neutra* (D). Como puede apreciarse, a esta hora del día, la atmósfera alcanza su mayor inestabilidad, teniendo su pico máximo en el horario de las 18 UTC, donde la categoría *muy inestable* (A) ocurre en todo el año, presentando sus valores máximos, principalmente, en julio–septiembre (llegando en este último mes a 59 días de ocurrencia); este comportamiento se debe a que en este horario del día es cuando la radiación solar llega de forma más perpendicular a la superficie terrestre, al igual que en los meses de verano; ocurre lo mismo por el comportamiento estacional.

Comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica para la ciudad de Pinar del Río

A continuación, se muestran los resultados del comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica por cantidad de días, distribuidos por meses para el período comprendido 2006–2008 en la ciudad de Pinar del Río, en las diferentes horas a que se realizan las observaciones trihorarias en las estaciones meteorológicas.

La figura 9 muestra la marcha de la altura de la capa de mezcla atmosférica a las 0 UTC (19:00 horas), expresada en cantidad de *días por meses*, para cada altura. A esta hora prevalecieron las alturas 200 m, 320 m, 560 m y 800 m, apreciándose que la altura de 560 m es la única que ocurrió en todo el período, y tuvo sus valores máximos en junio (27 días) y mayo (22 días); este comportamiento obedeció a que en mayo y junio existió un aumento en la cantidad de días con bastante nubosidad y velocidades del viento, en general, superiores a 2.24 m/s. Las alturas 320 m y 200 m, excepto en junio y julio, ocurrieron en los demás meses; la altura de 200 m resultó la de mayor cantidad de días de ocurrencia al año, presentando sus valores máximos en septiembre y octubre (sobrepasando 80 días) y sus mínimos en mayo y agosto. La altura de 320 m nunca llegó a 20 días y su mayor valor lo alcanzó en enero (15 días); este comportamiento está regido por la marcada influencia de las estaciones en el año, puesto que en los meses de verano la cantidad de horas de sol es mayor y, a esta hora, todavía existe radiación solar y la atmósfera –como pue-

–

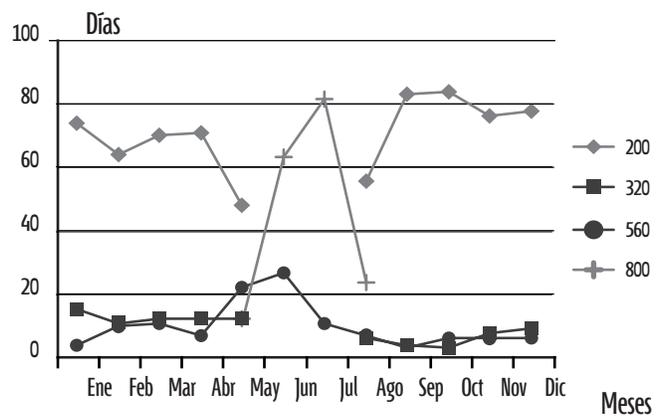


Fig. 9 Comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica por días en los doce meses del año a las 0 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

de apreciarse— presenta un comportamiento mayormente inestable. Se muestra una mayor presencia de la altura 800m, la cual ocurrió solo en mayo-agosto y presentó sus valores máximos en julio (alrededor de 80 días) y en junio (cercano a 60 días).

La figura 10 muestra el comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica a las 3 UTC (22:00 horas), expresada en cantidad de *días por meses*, para cada altura. A esta hora ocurren las alturas 200 m, 320 m y 560 m, mostrándose que las alturas de 200 m y 320 m ocurrieron en todo el período, donde se aprecia que la altura de 200 m fue la que predominó en todo el año, oscilando sus valores alrededor de 80 días por meses para el período analizado y alcanzando su valor máximo en julio (92 días); este comportamiento se debe a la disminución, en esta hora, de la temperatura por el proceso de irradiación terrestre, el cual es influenciado en mayor grado por la presencia de un mayor número de días con cielos despejados o poca nubosidad y poca fuerza del viento, la que mayormente no supero 1 m/s. La altura de 200 m tuvo sus valores máximos en noviembre y diciembre (10 días), mientras que, por último, la altura de 560 m solo no ocurrió en julio, cuyo valor máximo (9 días) lo alcanzó en diciembre; su presencia estuvo liada a días con bastante nubosidad y velocidades del viento superiores a 3 m/s.

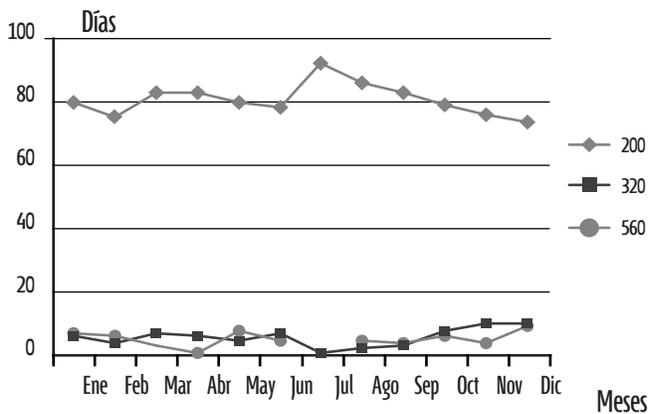


Fig. 10 Comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica por días en los doce meses del año a las 3 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

La figura 11 muestra el comportamiento de la altura de la capa de mezcla a las 6 UTC (1:00 horas), expresada en cantidad de *días por meses*, para cada estabilidad. A esta hora, al igual que a las 3 UTC, solo ocurren las alturas de 200 m, 320 m y 560 m, las cuales están presentes en todo el período. A esta hora de la madrugada continua enfriándose la tierra por el proceso de irradiación terrestre, debido a una mayor presencia de días con cielos despejados y poca velocidad del viento, dando como resultado que la altura de 200 m sea la de mayor ocurrencia, con valores mensuales alrededor de 80 días, que alcanzan su valor máximo en julio (88 días). La altura de 320 m tuvo su valor máximo en diciembre (12 días) y su valor mínimo en junio (1 día), mientras que, por último, la altura de 560 m fue la de menor ocurrencia, con su valor máximo en mayo (9 días), lo cual obedeció a que en este horario de la madrugada ocurrieron pocos días con bastante nubosidad o cielo nublado y una fuerza del viento superior a 3 m/s.

La figura 12 muestra el comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica a las 9 UTC (4:00 horas), expresada en cantidad de *días por meses*, para cada altura. A esta hora ocurrieron las alturas de 200 m, 320 m y 560 m, estando presente en todo el período la altura de 200 m, sobrepasando 80 días mensuales, excepto en enero, febrero y diciembre,

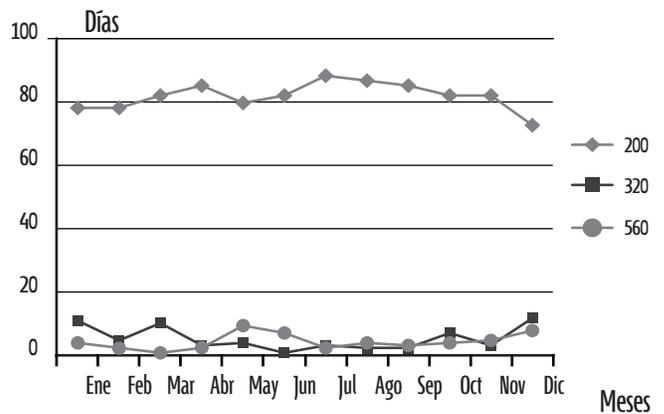


Fig. 11 Comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica por días en los 12 meses del año a las 6 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

cuando estuvieron muy cerca de este valor, y enero en que se alcanzó, exactamente, 80 días, y su valor máximo lo obtuvo en agosto (91 días); este comportamiento obedeció a que el proceso de irradiación se va profundizando e intensificando durante la noche, puesto que en este horario de la madrugada se alcanza el mayor número de días con cielos despejados o con poca nubosidad y velocidades del viento con valores que no sobrepasan 2 m/s. La altura de 320 m tuvo su presencia todos los meses, con excepción de abril; su valor máximo lo alcanzó en diciembre (10 días) y su comportamiento obedeció, de forma general, a la presencia de noches con velocidades del viento entre 2 m/s y 4 m/s, y cielos que van desde despejados hasta casi nublados, con predominio de cielos parcialmente nublados. Por último, la altura de 560 m, excepto en marzo, ocurrió en los demás meses y resultó la altura de menor presencia en cantidad de días por meses, cuyo valor máximo (8 días) lo alcanzó en enero, provocado por la existencia de pocos días nublados o con bastante nubosidad y velocidades del viento superiores a 3 m/s.

La figura 13 muestra el comportamiento de la capa de mezcla atmosférica a las 12 UTC (7:00 horas), expresada en cantidad de *días por meses*, para cada altura. A esta hora ocurren las alturas 200 m, 320 m, 560 m, 800 m y 1 200 m, aunque se evidencia que

la altura de 560 m es la única que ocurrió en todo el período, alcanzando sus valores máximos en octubre (19 días); este comportamiento se debió a la presencia de días con velocidades del viento que, en general, sobrepasaron 2 m/s y cielos nublados. La altura de 800 m tuvo su presencia todos los meses, con excepción de enero, y fue la de mayor ocurrencia en cantidad de días por meses, alcanzando su valor máximo en julio (87 días); este comportamiento está regido por las diferentes estaciones del año, las cuales propician que los meses de menor ocurrencia de esta altura sean febrero y diciembre, respectivamente, atendiendo a que en estos meses las horas de luz solar son más cortas. Los otros dos meses en que disminuyó la ocurrencia de esta altura fueron mayo y junio, debido a que fue cuando único ocurrió la altura de 1 200 m, con su mayor presencia en junio (32 días); ello obedeció a que en estos meses las horas de luz solar alcanzan sus valores mayores, lo que trae consigo que la radiación solar a esta hora sea más fuerte y provoque una mayor altura de la capa de mezcla. Por último, las alturas de 200 m y 320 m solo ocurrieron en enero, febrero y diciembre, teniendo una mayor presencia la altura de 200 m, alcanzando su valor máximo (79 días) en enero; y la altura de 320 m tuvo su mayor presencia en diciembre (10 días). La ocurrencia de estas dos alturas a esta hora está dada

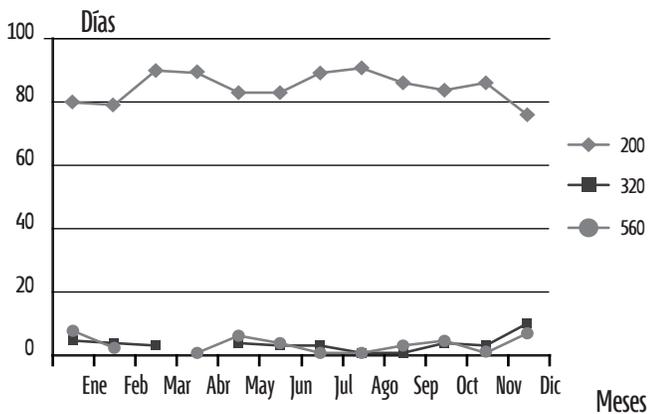


Fig. 12 Comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica por días en los 12 meses del año a las 9 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

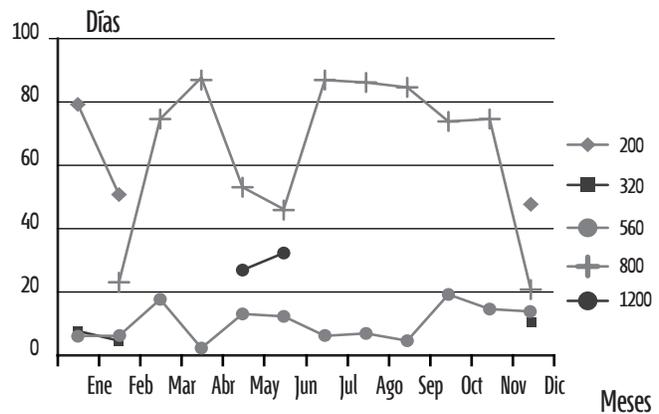


Fig. 13 Comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica por días en los 12 meses del año a las 12 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

por la poca duración de las horas de luz solar en estos meses y, por ende, a esta hora todavía no ha salido el sol en gran parte de los días; por consiguiente, la atmósfera posee un comportamiento más estable.

La figura 14 muestra el comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica a las 15 UTC (10:00 horas), expresada en cantidad de *días por meses*, para cada altura. A esta hora ocurren las alturas de 560 m, 800 m, 1 200 m y 1 600 m, donde las alturas de 1 200 m y 800 m predominaron en todo el período y se corroboró que la altura de 1 200 m resultó la de mayor presencia en el año y durante el período analizado, con sus valores máximos en abril (56 días); este comportamiento obedece a la ocurrencia de días con velocidades del viento que oscilaron entre 1 m/s y 3 m/s, y cielos parcialmente nublados. La altura de 800 m también tuvo una alta presencia todo el año, mostrando su valor máximo en diciembre (54 días) y su ocurrencia se debió a días parcialmente nublados, con velocidades del viento superiores a 2.8 m/s. La altura de 560 m, excepto en abril, ocurrió todos los meses y alcanzó su valor máximo en enero (20 días); su ocurrencia obedeció a la presencia de días mayormente nublados y con velocidades del viento que, en mayoría, superaron 2.8 m/s. Por último, a esta hora del día comienza a ocurrir la altura de 1600 m, teniendo presencia desde febrero hasta noviembre; ello obedece al comportamiento es-

tacional, lo cual se traduce en una mayor ocurrencia de esta altura hacia los meses de verano por el aumento de la radiación solar, alcanzando su valor máximo en septiembre (32 días).

La figura 15 muestra el comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica a las 18 UTC (13:00 horas), expresada en cantidad de *días por meses*, para cada altura. A esta hora, al igual que a las 15 UTC, están presentes las alturas de 560 m, 800 m, 1 200 m y 1 600 m, las cuales ocurren en todo el período. Como puede apreciarse, a esta hora, la atmósfera presenta su mayor altura de la capa de mezcla dado que el sol alcanza el mayor ángulo de elevación, lo cual se hace evidente mediante el predominio de ocurrencia de la altura de 1 600 m, que alcanzó su valor máximo en septiembre (59 días) y sus valores mínimos en los meses de invierno; este comportamiento obedeció al proceso cíclico de la componente estacional. La altura de 800 m sucedió a la anterior en mayor número de días de ocurrencia, con sus valores máximos en enero, noviembre y diciembre (estando por encima de 50 días), respectivamente. La altura de 1 200 m alcanzó su mayor ocurrencia en octubre (39 días) y, por último, la altura de 560 m fue la de menor presencia en todo el período, con sus valores máximos en junio (7 días); esto se debió a que en este horario existieron pocos días nublados y con velocidades del viento altas.

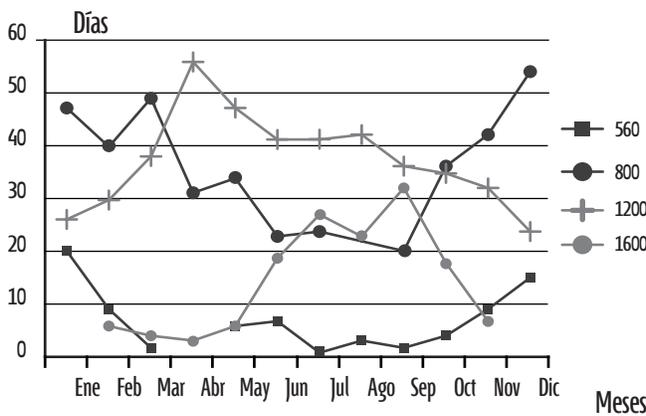


Fig. 14 Comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica por días en los 12 meses del año a las 15 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

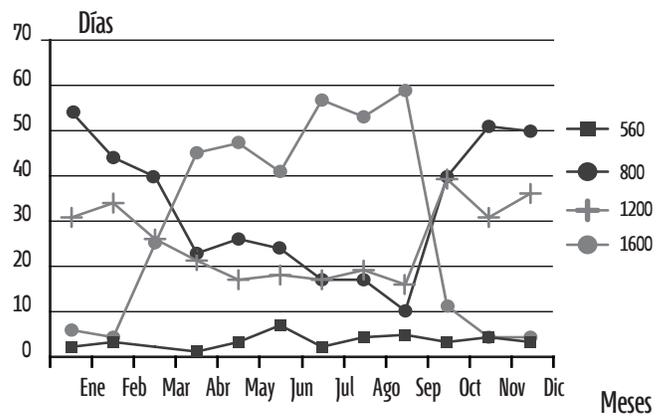


Fig. 15 Comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica por días en los 12 meses del año a las 18 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

La figura 16 muestra el comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica a las 21 UTC (16:00 horas), expresada en cantidad de *días por meses*, para cada altura. A esta hora del día, al igual que a las 15 y 18 UTC, ocurrieron las alturas de 560 m, 800 m, 1 200 m y 1 600 m; la única que no ocurrió en todo el período fue la altura de 1 600 m, con su mayor ocurrencia en abril-agosto a causa –como se ha mencionado– del comportamiento estacional, alcanzando su valor máximo en julio (26 días). La altura de mayor ocurrencia fue la de 800 m, con sus valores máximos en los meses de invierno, fundamentalmente en enero (54 días); ello obedeció a que en los meses de invierno disminuyó la ocurrencia de la altura de 1 200 m, la cual alcanzó sus valores máximos, sobre todo, en los meses de verano (llegando en abril a 49 días). Por último, la altura de 560 m alcanzó su mayor presencia en febrero (31 días), seguido por enero (27 días); esto se debió a que en estos meses prevaleció la ocurrencia de velocidades del viento, en general, superiores a 5 m/s, unido a una mayor presencia de días con bastante nubosidad.

El comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica –como se aprecia en el método de Pasquill– depende de la estabilidad atmosférica. A las 0 UTC (19:00 horas), este estuvo regido por las alturas de 200 m, 320 m, 560 m y 800 m, ocurriendo en todo el período solo la altura 560 m y resultó la altu-

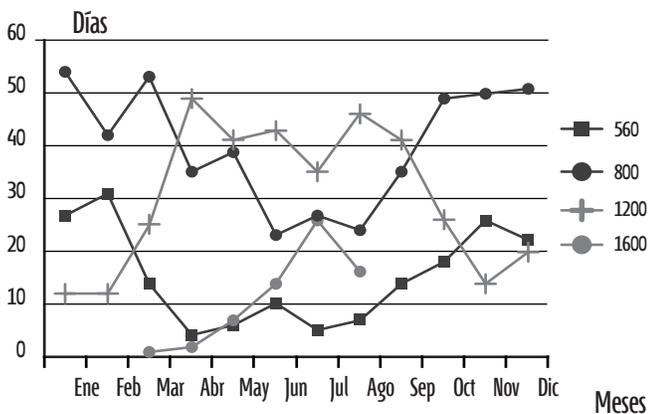


Fig. 16 Comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica por días en los 12 meses del año a las 21 UTC (estación de Pinar del Río, 2006-2008).

ra de 200 m la de mayor ocurrencia, con sus valores máximos en septiembre y octubre (más de 80 días); ello obedece al proceso cíclico de las estaciones del año, el cual propicia que a esta hora prevalezcan las alturas de 200 m y 320 m durante el año, excepto en los meses de verano, fundamentalmente junio y julio, donde solo ocurrieron las alturas de 560 m y 800 m, esta última fue la de mayor presencia en este período, llegando a 82 días en julio, por el aumento de las horas de radiación solar.

En los horarios nocturnos [3 UTC (22:00 horas), 6 UTC (1:00 horas) y 9 UTC (4:00 horas)], el comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica está gobernado por las alturas de 200 m, 320 m y 560 m; ello obedece –como es sabido– al proceso de irradiación terrestre, el cual provoca que la superficie terrestre se enfríe durante la noche, trayendo consigo que el espesor de la altura de la capa de mezcla disminuya de forma general, lo que se hace evidente en el predominio de la altura de 200 m todo el año, cuyos valores mensuales se muestran sobre 80 días para el período analizado, con su mayor presencia en el horario de las 9 UTC.

A las 12 UTC (7:00 horas), el comportamiento de la altura de la capa de mezcla atmosférica, está regido por las alturas de 200 m, 320 m, 560 m, 800 m y 1 200 m; la altura de 560 m resultó la única que ocurrió en todo el período, mientras que la de mayor ocurrencia por meses fue la altura de 800 m, sobrepasando 80 días en abril, julio, agosto y septiembre, dada la una mayor duración de las horas de luz solar por el comportamiento estacional.

En los horarios diurnos [15 UTC (10:00 horas), 18 UTC (13:00 horas) y 21 UTC (16:00 horas)], las alturas presentes son: 560 m, 800 m, 1 200 m y 1 600 m. Como puede apreciarse, a esta hora del día la atmósfera muestra su mayor espesor, con su pico máximo a las 18 UTC, donde la altura de 1 600 m ocurre todo el año, con sus valores máximos, fundamentalmente, en julio–septiembre (llegando, en este último mes, a 59 días de ocurrencia); ello obedece a que a esta hora

del día la radiación solar llega de forma más perpendicular a la superficie terrestre, al igual que en los meses de verano, donde ocurre lo mismo por el comportamiento estacional.

Conclusiones

A las 0 UTC (19:00 horas), las categorías de estabilidad atmosféricas que ocurren son la *ligeramente inestable* (C), *neutra* (D), *ligeramente estable* (E) y *estable* (F), correspondiéndoles a estas categorías las alturas de la capa de mezcla de 800 m, 560 m, 320 m y 200 m; tiene una mayor ocurrencia la categoría *estable* (F), perteneciéndole a está la altura de la capa de mezcla de 200 m, con sus valores máximos en septiembre y octubre (más de 80 días); ello obedece al proceso cíclico de las estaciones del año, el cual propicia que, a esta hora, prevalezcan las alturas de 200 m y 320 m durante el año, excepto en los meses de verano, fundamentalmente junio y julio, donde solo ocurrieron las alturas de 560 m y 800 m, por el aumento de las horas de radiación solar. Teniendo en cuenta esta observación y dado que los planes de producción son estimados anuales, puede valorarse el criterio de reajustar la producción, aumentándola en los meses de verano y disminuyéndola un poco en los meses de invierno, pero de manera que no afecte el plan anual, con el fin de atenuar un incremento en los niveles de contaminación.

Las condiciones más desfavorables para la dispersión de los contaminantes atmosféricos en la vertical ocurre en los horarios nocturnos [3 UTC (22:00 horas), 6 UTC (1:00 horas) y 9 UTC (4:00 horas)]. Como se observa en el trabajo, en estos horarios, la estabilidad atmosférica de mayor ocurrencia durante la noche es la *estable* (F) (Figs. 3, 4 y 5), lo cual implica que la altura de la capa de mezcla atmosférica predominante sea la de 200 m, siendo más marcado este comportamiento a las 9 UTC y, por ende, disminuyendo el espesor de la altura de la capa de mezcla (Figs. 11, 12 y

13), por lo que se recomienda realizar actividades de producción en las fuentes contaminantes solo en los casos estrictamente necesarios, dada la importancia que revisten para la economía del país.

A las 12 UTC (7:00 horas), excepto la categoría de estabilidad *muy inestable* (A), ocurren todas las demás, dando lugar a que las alturas de mezcla presentes sean 200 m, 320 m, 560 m, 800 m y 1 200 m. A esta hora comienza a aumentar el nivel de inestabilidad de la atmósfera dada la incidencia de la radiación solar, lo cual propicia que el espesor de la altura de la capa de mezcla atmosférica alcance un mayor volumen y que predomine (en cantidad de días) la categoría de estabilidad *ligeramente inestable* (C), correspondiéndole a está la altura de 800 m, principalmente en abril, julio, agosto y septiembre. En los meses de invierno disminuye la ocurrencia de esta categoría y, por consiguiente, la ocurrencia de esta altura, dándoles paso a las categorías de estabilidad *ligeramente estable* (E) y *estable* (F), alturas de 320 m y 200 m, respectivamente (Figs. 6 y 14), lo cual trae consigo que en estos meses la dispersión de los contaminantes este más limitada. Esto constituye un factor que ha de tenerse en cuenta, puesto que gran parte de las fuentes contaminantes inician sus actividades laborales a esta hora y sería conveniente establecer un grupo de medidas para evitar que aumente la contaminación atmosférica, entre las cuales se puede valorar el inicio de las actividades laborales 1 hora más tarde (a la 8: 00 a.m.), siempre y cuando no afecte los planes de producción de las fuentes; todo ello con fin de disminuir los posibles episodios de contaminación, si tenemos en cuenta que algunas de estas fuentes están ubicadas en pleno sector urbano.

En las horas del día [15 UTC (10:00 horas), 18 UTC (13:00 horas) y 21 UTC (16:00 horas)], ocurre la mayor inestabilidad atmosférica por una mayor incidencia de la radiación solar, la que se hace más marcada en los meses de verano. A estas horas, están presentes las categorías de estabilidad *muy inestable* (A), *ines-*

table (B), ligeramente inestable (C) y neutra (D), correspondiéndoles las alturas de 1 600 m, 1 200 m, 800 m y 560 m, y apreciándose que la atmósfera se muestra más inestable a las 18 UTC, dada la mayor ocurrencia de la categoría *muy inestable* (A) (Fig. 8), lo cual da lugar a que la altura de mezcla de 1 600 m (Fig. 16) sea la de mayor ocurrencia y se alcance la mayor altura de la capa de mezcla atmosférica, fundamentalmente, en septiembre (59 días). Por ello, se propone tener en cuenta las buenas condiciones para la dispersión de los contaminantes en la vertical a estas horas del día —en especial a las 18 UTC—, con el fin de centrar el mayor peso de las actividades de producción (de ser posible) en estos horarios.

Bibliografía

- ÁLVAREZ, R. (1976): “Estudio de la dispersión de contaminantes en la atmósfera de Cuba, al grado doctor en Ciencias Físico-Matemáticas”, IFA, Moscú.
- FISHER, B. E. A., J. J. ERBRINK, S. FINARDI, P. JEANNET, S. JOFFRE, M. G. MORSELLI, U. PECHINGER, P. SEIBERT, D. J. THOMSON (Eds.) (1998): COST Action 710-Final Report. Harmonisation of the pre-processing of meteorological data for atmospheric dispersion models, L-2985 European Commission, Luxembourg, EUR 18195 EN (ISBN 92-828-3302-X).
- GARRATT, J. R. (1992): *The atmospheric boundary layer*, Cambridge University Press. pp. 316.
- LÓPEZ, C. M. (1978): Factores meteorológicos en la propagación de contaminantes del aire en la Ciudad de La Habana, Informe Científico-Técnico no. 46, INSMET, ACC.
- NÚÑEZ, S. (2002): *Altura de la capa de mezcla: caracterización experimental y aplicación de un modelo meteorológico para el estudio de su evolución diurna*. Memoria para optar al grado de doctor, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, ISBN: 84-669-1749-7.
- PASQUILL, F. (1961): “The estimation of the dispersion of wind-borne material”, *Meteorological Magazine*, 90, pp. 33-49.
- RODRÍGUEZ, D., L. ECHEVARRIA, O. CUESTA, A. SÁNCHEZ, J. M. DÍAZ, R. VARGAS (2008): Resultados preliminares de cálculo de la altura de la capa de mezcla a través del uso del Global Forecast System, Convención Trópico 2008, ISBN 978-959-282-079-1.
- RODRÍGUEZ; D. (2007): *Sistema Automatizado de Gestión de Información de Fuentes Contaminantes (SAGIFC)*. Tesis de maestría en Nuevas Tecnologías para la Educación, Universidad de Pinar del Río, Cuba.
- SEIBERT, P., F. BEYRICH, S. E. GRYNING, S. JOFFRE, A. RASMUSSEN, P. TERCIER. (1998): *Mixing layer depth determination for dispersion modelling*. European Commission. In: FISHER, B. E. A., J. J. ERBRINK, S. FINARDI, P. JEANNET, S. JOFFRE, M. G. MORSELLI, U. PECHINGER, P. SEIBERT AND D. J. THOMSON (Eds.) (1998): COST Action 710-Final Report. Harmonisation of the pre-processing of meteorological data for atmospheric dispersion models. L-2985 European Commission, Luxembourg, EUR 18195 EN (ISBN 92-828-3302-X).
- SEIBERT, P., F. BEYRICH, S. E. GRYNING, S. JOFFRE, A. RASMUSSEN, P. TERCIER. (2000): “Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height”, *Atmos. Environ.*, 34, 1001-1027.
- TURNER, D.B. (1964): “A difusión model for an urbana rea”, *J. Appl. Meteor.*, vol. 3, pp. 83-91.
- TURTÓS L., A. ROQUE, R. SOLTURA, M. SÁNCHEZ (2003): “Metodología de estimación de variables meteorológicas secundarias para modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos”, *Contribución a la Educación y la Protección Ambiental*, vol. 4. ISBN 959-7136-20-1: 266-277.