

NUBES NOCTILUCIENTES *

SYDNEY CHAPMAN ** y BENSON FOGLE ***

1. INTRODUCCION

Las nubes noctilucientes (abreviatura: NNL) son nubes situadas alto en la atmósfera y vistas contra el fondo de un cielo oscuro al ser iluminadas aún por la luz solar, cuando el sol está abajo del horizonte, en ángulos de depresión entre 6° y casi 18° (Fig. 1). Generalmente parecen cirrus o cirrostratus y con frecuencia tienen delicada configuración de filigrana, con marcada estructura ondulada. Son muy delgadas y las estrellas cintilan a través de ellas casi sin oscurecerse. En brillantez y tamaño alcanzan variación considerable.

Comenzaron a atraer la atención de los científicos en 1885; la primera observación registrada de ellas, reconociendo que eran un fenómeno raro y notable, fue hecha por T. W. Backhouse (1885) en Kissingen, Alemania, el 8 de Junio de ese año. Muchas otras observaciones de ellas fueron hechas alrededor de esa época; en años posteriores el número de informes subió y bajó, en parte según la atención que les daban observadores interesados. Más de 1,000 casos están registrados hasta hoy y muchas de sus características ya se estudiaron. Se han publicado fotografías de ellas en blanco y negro (Witt, 1962; Paton, 1964) y en color (Ludlam, 1957).

LA ALTURA

En los pasados 80 años más de 100 determinaciones de altura de las NNL han sido hechas (Jesse, 1896; Störmer, 1935; Paton, 1949; Witt, 1962). Los valores varían de 74 a 92 Km, con promedio de 82 Km; variación que se debe en parte a errores de observación. El nivel de 82 Km concuerda estrechamente con el de la mesopausa, donde la temperatura del aire tiene su segundo valor mínimo, como

* Para presentarse en la Cuarta Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, Hermosillo, Son., Marzo de 1965.

** Instituto Geofísico, Universidad de Alaska; también del Observatorio de Gran Altura, Boulder, Colorado y del Instituto de Ciencia y Tecnología, Universidad de Michigan.

*** Instituto Geofísico, Universidad de Alaska.

NOCTILUCENT CLOUDS *

SYDNEY CHAPMAN ** and BENSON FOGLE ***

1. INTRODUCTION

Noctiluculent clouds (abbreviation: NLC) are clouds situated high in the atmosphere, seen against the background of a dark sky, while they are still illuminated by sunlight, when the sun is well below the horizon, at angles of depression between 6° and nearly 18° (Fig. 1). They generally resemble cirrus or cirrostratus, often having a delicate filigree pattern, with marked wave structure. They are very thin, and stars shine through them almost undimmed. In brightness and extent they have a considerable range.

They began to attract the attention of scientists in 1885; the first recorded observation of them, recognizing that they were an unusual and remarkable phenomenon, was made by T. W. Backhouse (1885) at Kissingen in Germany on June 8 of that year. Many other observations of them were made about that time: in later years the number reported rose and fell, partly depending on the attention given to them by interested observers. Over 1,000 occurrences are on record so far, and many of their characteristics have been studied. Pictures of them in black-and-white (Witt, 1962; Paton, 1964) and in color (Ludlam, 1957) have been published.

THE HEIGHT

Over the past 80 years more than 100 NLC height determinations have been made (Jesse, 1896; Störmer, 1935; Paton, 1949; Witt, 1962). The values range from 74 to 92 Km, the average being 82 Km; part of the range must be due to errors of observation. The level 82 Km agrees closely with that of the mesopause, where the air temperature has its second minimum value, as shown by Fig. 2 for

* To be presented at the Fourth Annual Reunion of the Mexican Geophysical Union, Hermosillo, Son., March, 1965.

** Geophysical Institute, University of Alaska; also of the High Altitude Observatory, Boulder, Colorado and of the Institute of Science and Technology, University of Michigan.

*** Geophysical Institute, University of Alaska.

se muestra en la Fig. 2 para Churchill, Canadá y Krönegard, Suecia. La Fig. 3 muestra la distribución de frecuencia de altura de las NNL registradas. La altura de las NNL determina los intervalos después del ocaso y antes de la salida del sol al quedar las NNL iluminadas contra un cielo oscuro en diferentes latitudes y estaciones (Fig. 4).

La determinación de altura de las NNL requiere organizar las tomas de fotografías simultáneas desde dos o más estaciones situadas a distancia conveniente, parecida a la desarrollada por Störmer para las determinaciones de la altitud auroral pues en 1932 pudo aplicar sus métodos a las NNL (Störmer, 1933).

2. LATITUDES DE OBSERVACION

La mayoría de las observaciones de NNL han sido hechas desde latitudes entre 45°N y 65°N , en Europa (Jesse, 1896; Vestine, 1934; Störmer, 1935; Paton, 1949; Witt, 1962). Backhouse, en Inglaterra y Jesse, en Alemania, estaban entre los más activos primeros observadores: más recientemente Hoffmeister, en Alemania, Paton, en Escocia y Grishin, en la U.R.S.S., han dado mucha atención a las NNL. La Fig. 5 muestra la evidente frecuencia de incidencias de NNL sobre América del Norte respecto a la latitud. Hasta recientemente pocas observaciones habían sido registradas y bien documentadas en América del Norte, pero desde 1962 una extensa red de estaciones de observación de NNL (Fig. 6) han sido establecidas en ese continente. Esto ha dado como resultado una adición de 87 despliegues vistos, que

Churchill, Canada and Krönegard, Sweden. Figure 3 shows the frequency distribution of recorded NLC heights. The NLC height determines the intervals after sunset and before sunrise during which NLC are illuminated against a dark sky at different latitudes and seasons (Fig. 4).

The height determination of NLC requires organization for simultaneous photography from two or more stations at suitable distances apart, similar to that developed by Störmer for auroral height determinations; in 1932 he was able to apply his methods to NLC (Störmer, 1933).

2. LATITUDES OF OBSERVATION

Most of the NLC observations have been made from latitudes between 45°N and 65°N , in Europe (Jesse, 1896; Vestine, 1934; Störmer, 1936; Paton, 1964; Witt, 1962). Backhouse, in England and Jesse, in Germany, were among the most active early observers; more recently Hoffmeister in Germany, Paton in Scotland, and Grishin in U.S.S.R. have given much attention to NLC. Fig. 5 shows the apparent frequency of occurrence of NLC over North America with respect to latitude. Until recently few North American observations had been recorded and well documented, but since 1962 an extensive network of NLC observing stations (Fig. 6) has been established in that continent. This has resulted in the addition of 87 sighted displays, making a total of 99 displays now reported from North America. The

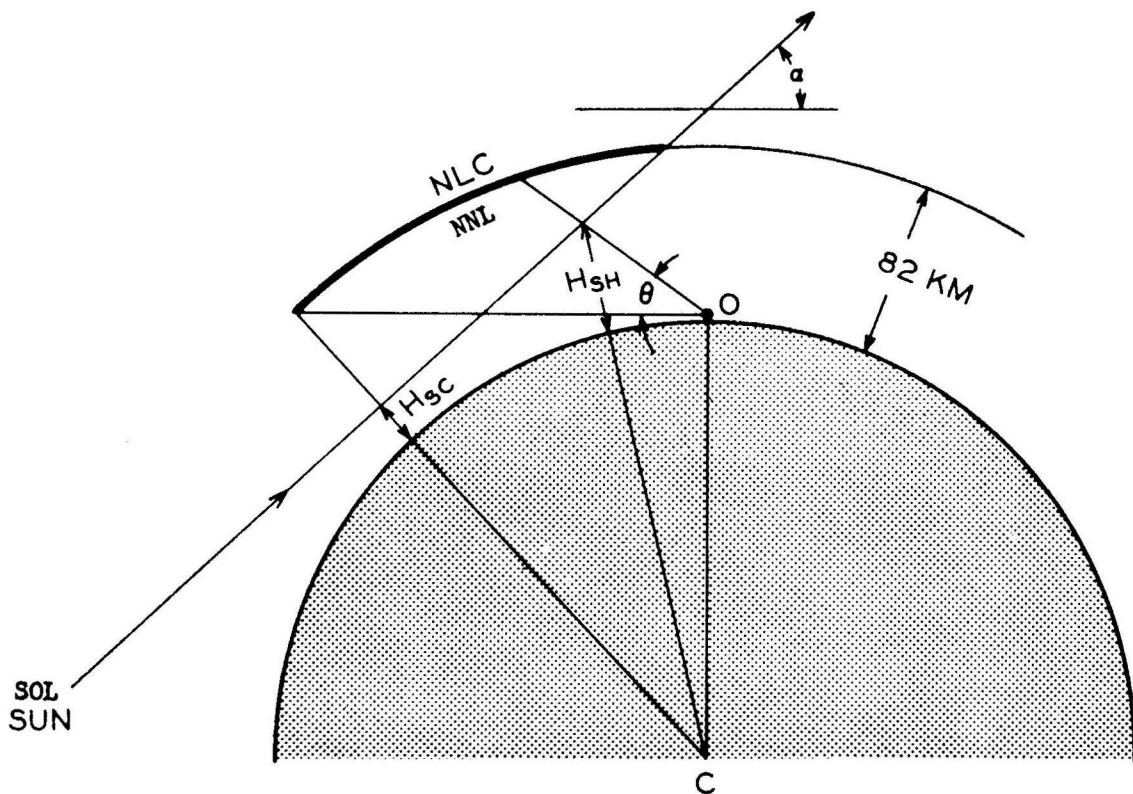


Fig. 1. Geometría de condiciones de observación de NNL. H_{sc} es la altura de pantalla, H_{sh} es la altura de sombra, θ es el ángulo de elevación y α es el ángulo de depresión solar.

Fig. 1. Geometry of NLC viewing conditions. H_{sc} is the screening height, H_{sh} the shadow height, θ the elevation angle, and α the solar depression angle.

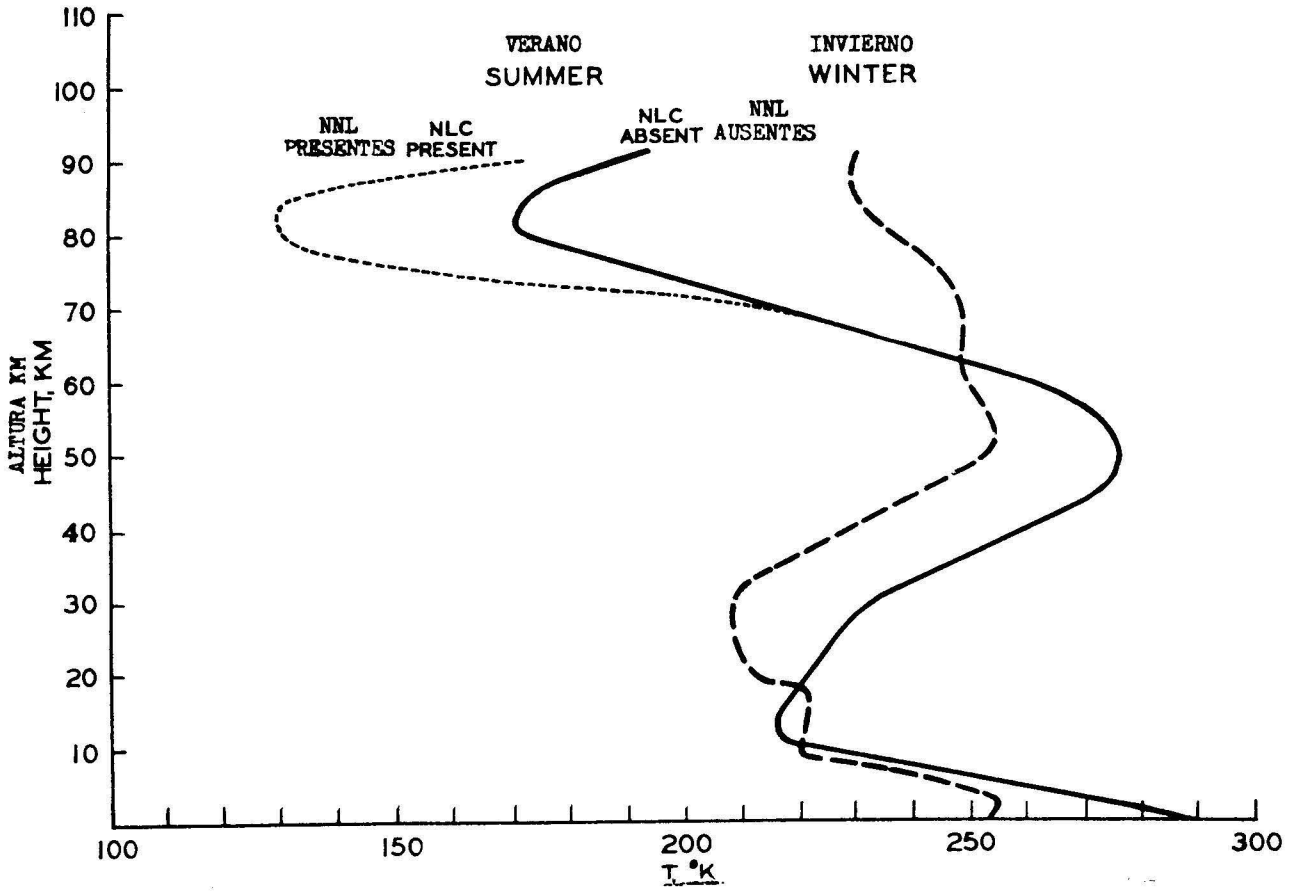


Fig. 2. Variación de temperatura con altura a 60°N.

Fig. 2. Variation of temperature with altitude at 60°N.

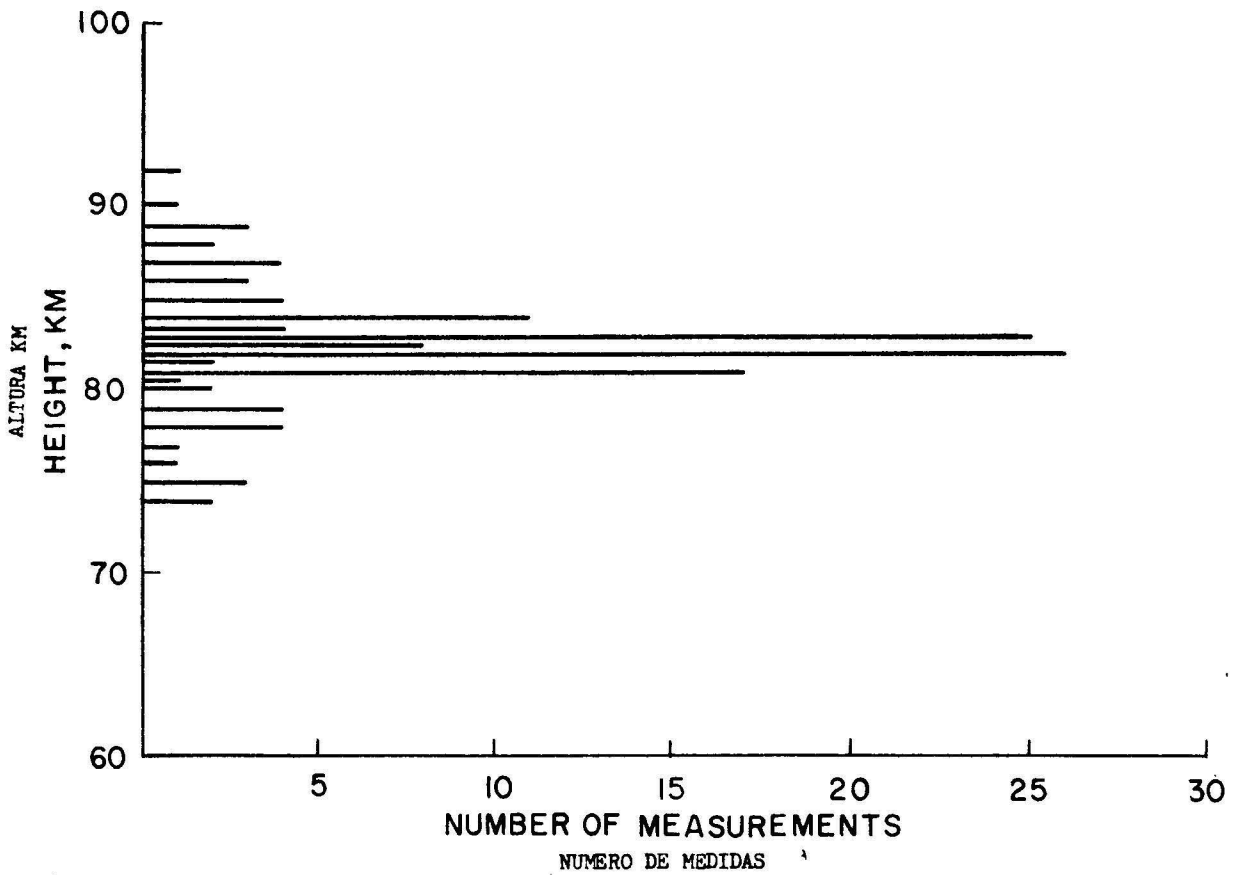


Fig. 3. Distribución de frecuencia de alturas registradas de NNL.

Fig. 3. Frequency distribution of recorded NLC heights.

hacen un total de 99 ahora referidos desde América del Norte. Se ha demostrado que la frecuencia de incidencias en América del Norte iguala a la de Europa y Rusia (Fogle, 1965). Un manual de instrucción para el observador (Fogle y Gotaas, 1963), incluyendo fotografías en color, está disponible si se solicita al Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska (College, Alaska, 99735); describe las características de las nubes y la manera de hacer registros visuales y/o fotográficos.

Pocas observaciones desde lugares al sur de los 45° N han sido manifestadas; para tener una convicción total, los informes sobre observaciones deben ser confirmados por fotografías (con detalles adecuados como lugar y fecha de observación, hora y dirección de vistas o de fotografías). L. R. Pitwell (1963) ha informado sobre una observación en Addis Ababa (9° N, 39° E) el 17 de Enero de 1963, de nubes que tenían las características manifiestas de las NNL, pero al parecer no fueron fotografiadas. Es de desear que los astrónomos, meteorólogos y otros, en latitudes abajo de los 45° están pendientes de las NNL e informen de cualquier observación que hagan. Sin embargo, Astapovic (1958) aseguró que en una guardia en busca de NNL durante 700 noches de verano sin nubes, desde Ashkabad, Rusia (37°N, 58.3° E) no obtuvo datos.

North American frequency of occurrence has been shown to equal that over Europe and Russia (Fogle, 1965). An observer's instruction manual (Fogle and Gotaas, 1963), including pictures in color, is available on request to the Geophysical Institute of the University of Alaska (College, Alaska, 99735); it describes the characteristics of the clouds, and how best to make visual and/or photographic records.

Few observations from places south of 45°N have been reported; to carry full conviction, reported sightings should be confirmed by photographs (with adequate details as to place and date of observations, the time, and the direction of the sightings or photograph). L. R. Pitwell (1963) has reported an observation at Addis Ababa (9°N, 39°E) on January 17, 1963, of clouds having the reported characteristics of NLC, but they were apparently not photographed. It is desirable that astronomers, meteorologists and others in latitudes below 45° should be on the watch for NLC and should report any observations they may make. However, Astapovic (1958) states that a watch for NLC during 700 cloudless summer nights from Ashkabad, Rusia (37.°N, 58.3°E), gave no sightings.

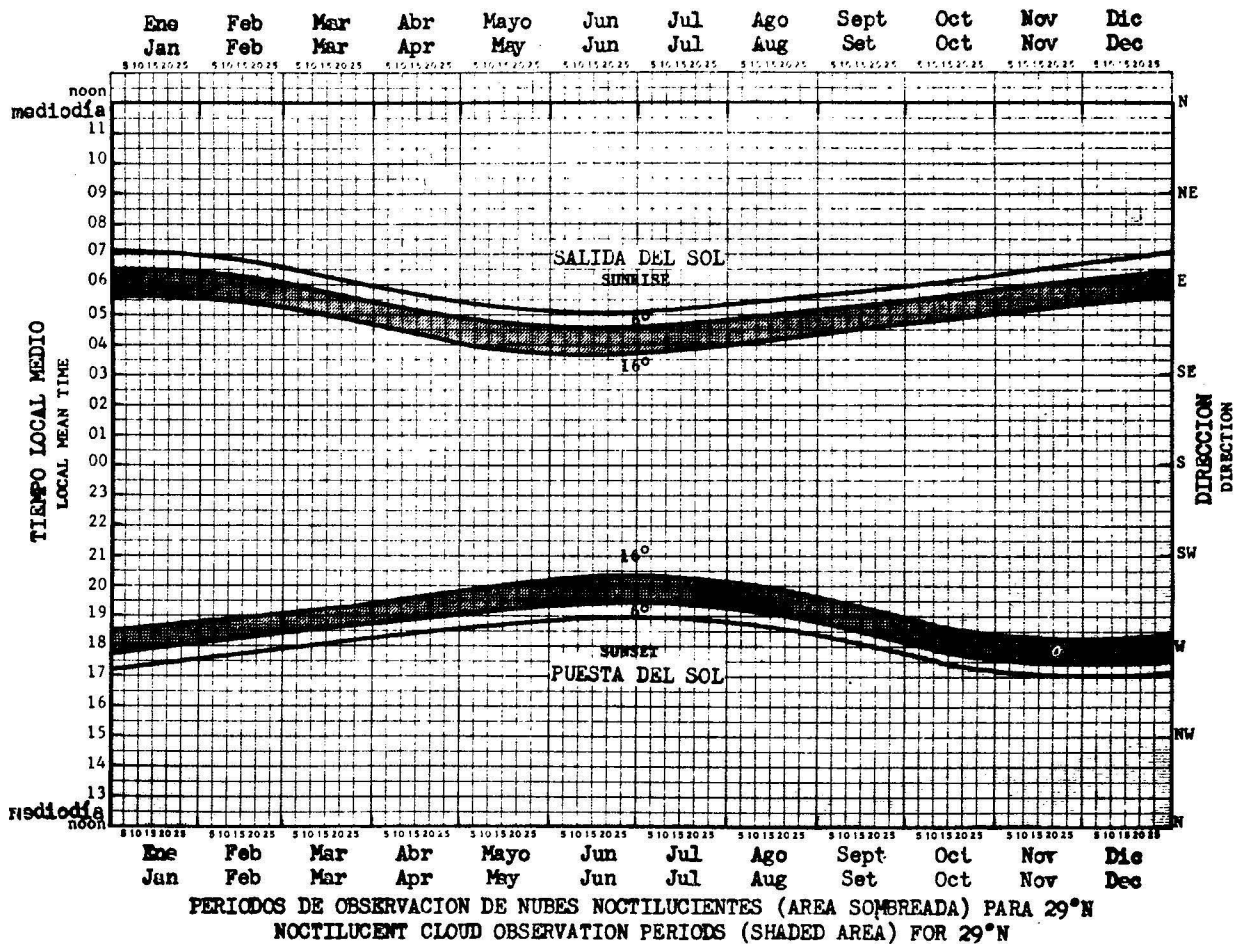


Fig. 4. Variación de períodos de observación de NNL en función de latitud.

Fig. 4. Variation of NLC observing periods as a function of latitude.

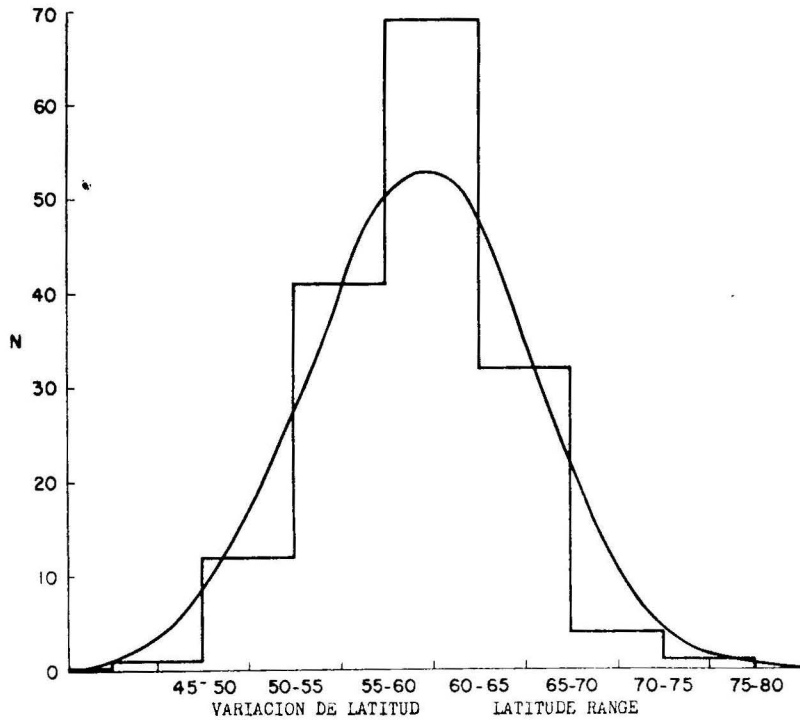


Fig. 5. Frecuencia aparente de incidencia de NNL sobre América del Norte respecto a latitud.

Fig. 5. Apparent frequency of occurrence of NLC over North America with respect to latitude.

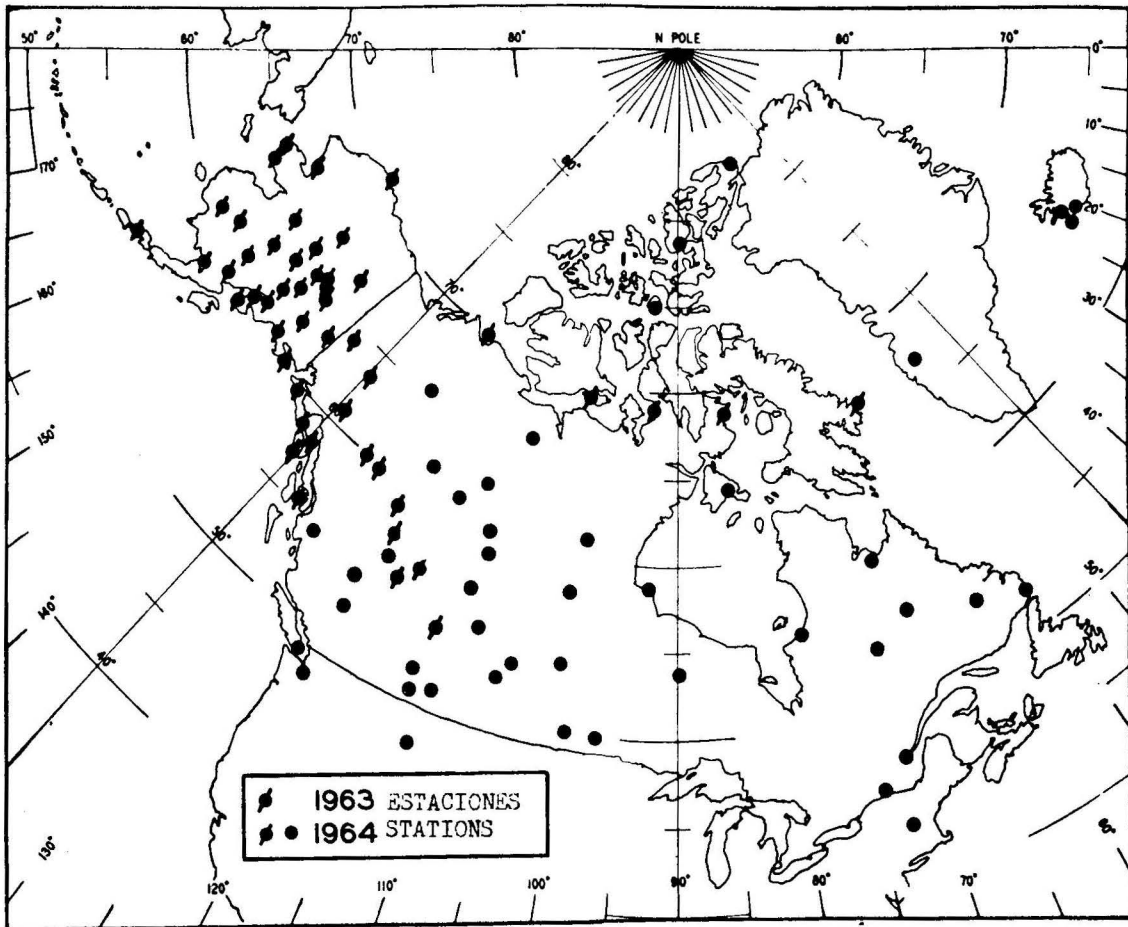


Fig. 6. Red de estaciones de observación de NNL sobre América del Norte, Groenlandia e Islandia.

Fig. 6. Network of NLC observing stations over North America, Greenland and Iceland.

Había muy pocos informes sobre las NNL y ninguno apoyado en fotografías en el Hemisferio Sur hasta este año, cuando durante una visita de 10 días a Punta Arenas, Chile (53° S, 71° W), Fogle obtuvo fotografías de un despliegue moderado en la noche del 9 al 10 de Enero. Ahora ha obtenido la cooperación de más de 50 estaciones y observadores del Hemisferio Sur, que vigilarán la aparición de las NNL durante el Verano meridional de 1965/66.

En cada latitud de cada estación hay un intervalo después del ocaso y antes del otro durante el cual las NNL, a la altura en que generalmente son observadas, alrededor de 82 Km si están presentes, son iluminadas por la luz del sol; Fogle y Gotaas han publicado algunas cartas (Fogle y Gotaas, 1963) mostrando cada una para una latitud particular, los intervalos apropiados a lo largo del año calendario. Para Hermosillo, México, estos intervalos (Fig. 7) después del ocaso y antes del amanecer varían poco en duración a lo largo del año. Así, los intervalos del ocaso en tres fechas típicas son como sigue:

Enero 1	49 minutos
Febrero 8	47 minutos
Junio 10	56 minutos

AREA DE LAS NNL

Algunas veces el límite total del despliegue de NNL puede ser visto y estimada su área; ésta puede ser sólo de algunas decenas de miles de Km². La extensión de cielo al nivel de 82 Km visible desde tierra es un área circular de unos 1,000 Km de radio y de una superficie de 3 millones de Km²; pero solamente una parte puede ser iluminada por la luz del sol contra un cielo oscuro. Un despliegue de NNL ampliamente observado sobre Alaska y Canadá durante Agosto de 1963 fue demasiado extenso para ser visible desde un solo lugar; la combinación de datos de muchos observadores indican que su área (Fig. 8) fue de más de 2.5 millones de Km² (Fogle, 1964). Es posible que las NNL puedan algunas veces cubrir todas las longitudes alrededor del polo y tener un área de un orden de 10⁸ Km²; pero esto si fuera cierto sería difícil de establecer por medio de observaciones de las que hasta ahora se disponen, porque están restringidas al crepúsculo y solamente estaciones en un sector de alrededor de 90° de longitud pueden verlas al mismo tiempo.

DURACIÓN

Las NNL pueden formarse o desaparecer durante el día, cuando no pueden ser vistas. Durante Agosto de 1963 dos despliegues de NNL fueron observados desde College, Alaska, por más de 5 horas (Fogle, 1964). Algunas veces extensas NNL recurren por dos o más noches sucesivas, pero si son partes de una distribución que es continua a través de las horas del día intermedio, es incierto. Secciones particulares de NNL pueden durar solamente por algunas decenas de minutos.

Very few reports of NLC, and none supported by photographs, had been made in the Southern hemisphere until this year, when during a ten-day visit to Punta Arenas, Chile (53°S, 71°W), Fogle obtained photographs of a moderate display on the night of January 9/10. He has now obtained the cooperation of more than 50 Southern Hemisphere stations and observers, who will watch for NLC during the southern summer of 1965/66.

In each latitude at each season there is an interval after sunset and before sunrise during which NLC at the generally observed height, about 82 Km if present, are illuminated by sunlight; Fogle and Gotaas have published several charts (Fogle and Gotaas, 1963) each showing for a particular latitude the appropriate intervals throughout the calendar year. For Hermosillo, Mexico, these intervals (Fig. 7) after sunset and before dawn vary but little in duration throughout the year; thus the sunset intervals at three typical dates are as follow:

Jan. 1	49 minutes
Feb. 8	47 minutes
June 10	56 minutes

AREA OF NLC

Sometimes the whole boundary of a display of NLC can be seen, and its area estimated; this may be only a few tens of thousands of Km². The extent of sky at the level of 82 Km visible from the ground is a circular area about 1,000 Km in radius and of area about 3 million Km²; but only a part of this can be illuminated by sunlight against a dark sky. One NLC display widely observed over Alaska and Canada during August 1963 was too extensive to be all visible from any one place; combination of data from many observers indicates that its area (Fig. 8) was more than 2.5 million Km² (Fogle, 1964). It is possible that NLC might at times cover all longitudes round the pole, and have an area of order 10⁸ Km²; but this, if true, would be difficult to establish by observations of the kind so far available, because they are restricted to twilight, and only stations in a sector of about 90° in longitude can see them at the same time.

DURATION

NLC may be formed or disappear in the daytime, when they cannot be seen. During August 1963 two NLC displays were observed from College, Alaska for more than 5 hours (Fogle, 1964). Sometimes extensive NLC recur for two or more successive nights, but whether they are parts of a distribution that is continuous throughout the intervening daytime is uncertain. Particular parts of NLC may last only for some tens of minutes.

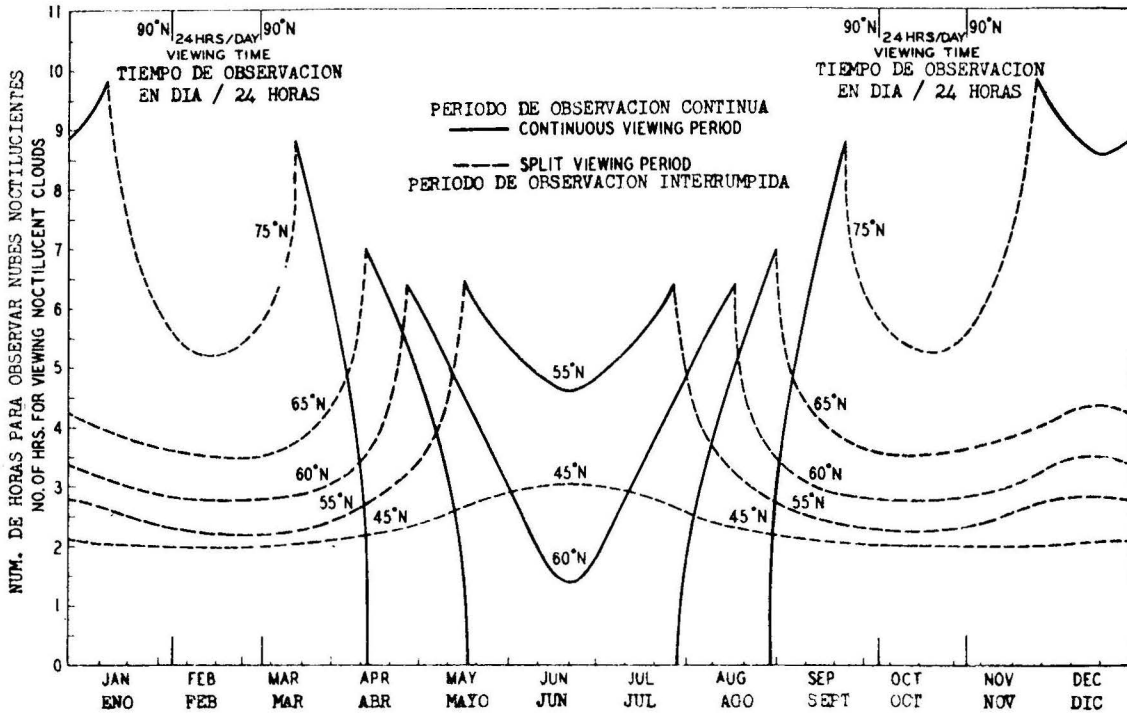


Fig. 7. Curva de tiempo de observación de NNL para 29°N.

Fig. 7. NLC observation times curve for 29°N.

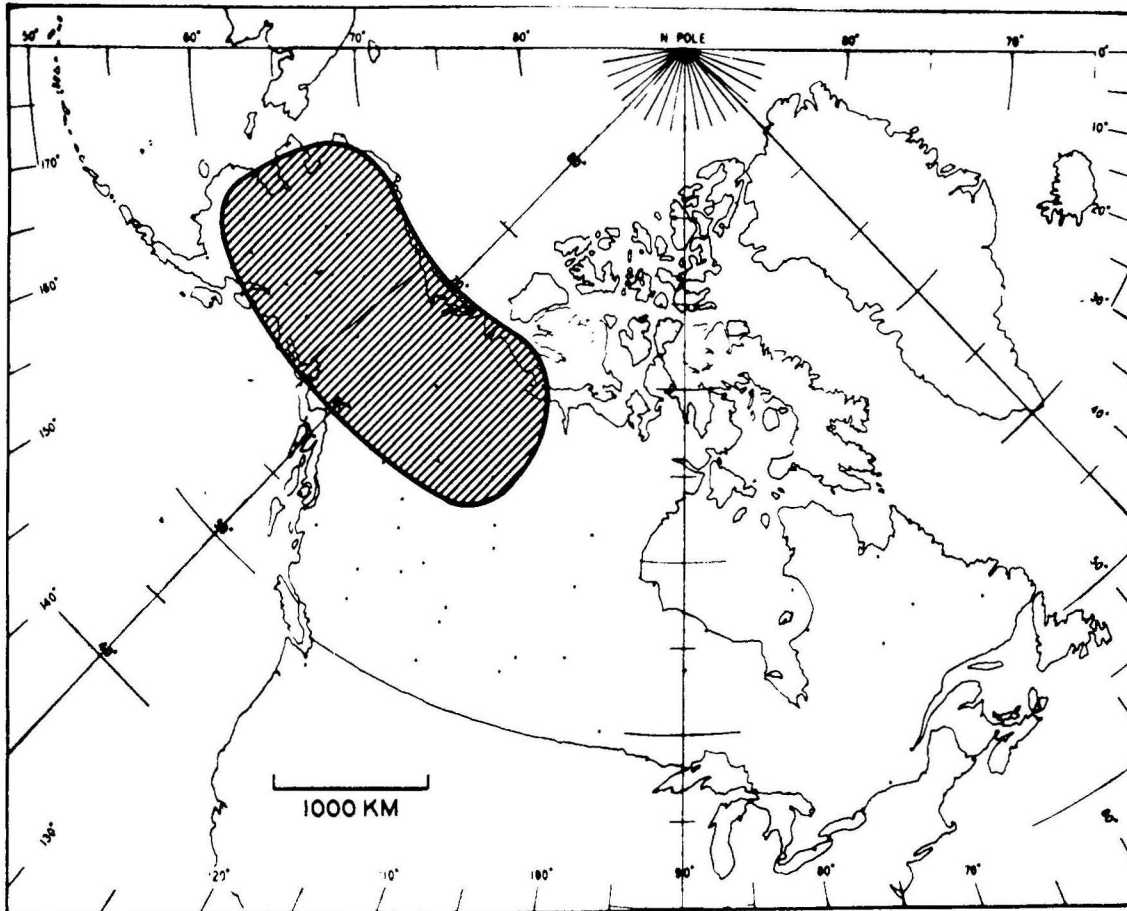


Fig. 8. Area cubierta por el extenso despliegue de NNL del 11/12 de Agosto de 1963.

Fig. 8. Area covered by the extensive NLC display of 11/12 August 1963.

LA ESTACIÓN PARA OBSERVACIÓN

En el Hemisferio Norte las NNL son vistas algunas veces durante los meses del verano septentrional. Se ha informado sobre ellas, con toda seguridad, desde el 5 de Marzo y más tarde, hasta el 28 de Octubre. Hamilton (1964) dio cuenta de una observación desde Lerwick ($60^{\circ}.1$ N, 1° W) en la noche del 5 al 6 de Enero de 1964, pero no se tomaron fotografías y es posible que lo que se vió no fueran NNL sino el largo y durable rastro de un meteoro (Paton, 1964a). Arriba de 65° de latitud el cielo nocturno en verano es demasiado brillante para permitir la observación de NNL. La Fig. 9 muestra la distribución de frecuencia de NNL registradas con respecto a la estación. A pesar de la casi completa restricción, para registros seguros de NNL en la estación de Verano, es deseable que las NNL sean observadas durante todo el año.

DESPLAZAMIENTO DE LAS NNL

Generalmente, cuando es posible observar las NNL por una hora o más de modo continuo, se las ve desplazarse a través del cielo. Se han hecho muchas determinaciones de velocidad. En general, en latitudes septentrionales el movimiento es hacia el suroeste; son comunes velocidades de alrededor de 40 m por segundo y han sido registrados valores hasta de 200 m. La Fig. 10 muestra un plano de vectores de las velocidades registradas.

ESTRUCTURA DE ONDA Y MOVIMIENTO

Muchas NNL tienen marcada estructura ondulada, que frecuentemente cambian con intervalos de 10 minutos o más; estos cambios se registran mejor con cámara cinematográfica.

THE SEASON OF OBSERVATION

In the Northern Hemisphere NLC are seen at times during the months of the northern summer; they have been reliably reported as early as March 5 and as late as October 28. Hamilton (1964) reported a sighting from Lerwick ($60^{\circ}.1$ N, 1° W) on the night of January 5/6, 1964, but no photograph was taken, and it is thought possible that what was seen was not NLC but a long enduring meteor trail (Paton, 1964a). Above 65° latitude the night sky in summer is too bright to permit observation of NLC. Figure 9, shows the frequency distribution of recorded NLC with respect to season. Despite the almost complete limitation of reliable NLC records to the summer season, it is desirable that NLC should be looked for throughout the year.

DRIFT MOTION OF NLC

Usually when it is possible to observe NLC for an hour or more continuously, they are seen to drift across the sky. Many velocity determinations have been made. In general in northern latitudes the motion is to the southwest; speeds of about 40 m/sec are common, and values up to 200 m/sec are common, and values up to 200 m/sec have been reported. Figure 10 shows a vector plot of the reported velocities.

WAVE STRUCTURE AND MOTION

Many NLC show marked wave structure, often seen to be changing within intervals of 10 minutes or more; such changes are best recorded by cine camera. The wave length

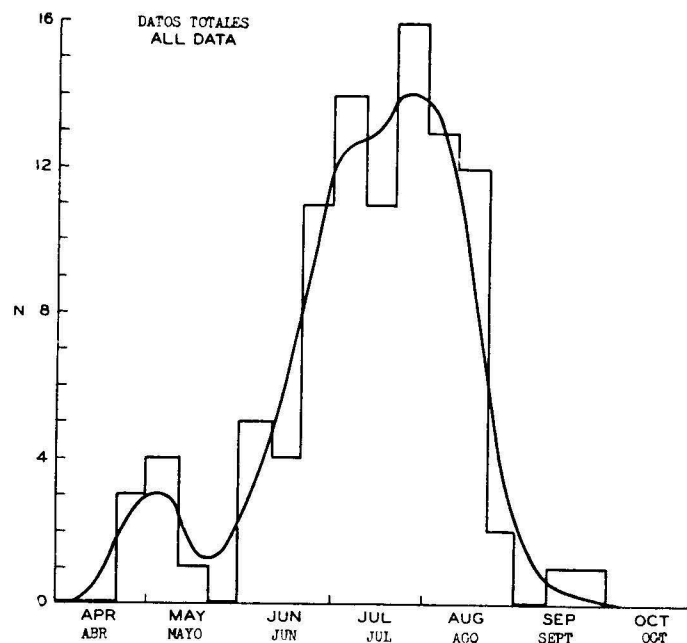


Fig. 9. Frecuencia aparente de incidencia de NNL sobre América del Norte respecto a estación.

Fig. 9. Apparent frequency of occurrence of NLC over North America with respect to season.

gráfica. La longitud de onda de la estructura de las NNL varía de alrededor de 5 a 100 Km, el valor más frecuente es de cerca de 10 Km (Fig. 11). Algunas veces hay dos sistemas de ondas inclinadas una hacia otra, que producen apariencia rizada que se asemeja a la de algunas nubes troposféricas.

ESPESOR Y AMPLITUD DE ONDA VERTICAL

Las NNL son tan tenues que no es fácil de medir su espesor ni la amplitud de la onda vertical, que puede ser mayor. Witt (1962) ha hecho medidas que sugieren espesores de 2 Km o menos, tal vez 1 Km y amplitudes de onda vertical de un promedio de 1.5 a 2 Km, quizá llegando hasta 3 Km. El límite inferior de las NNL parece ser más definido que el superior.

MEDIDAS OPTICAS

Han sido hechas observaciones espectrográficas (Grishin, 1956) y medidas de polarización (Witt, 1960) de la luz de las NNL. El espectro se asemeja al de la luz del día con líneas de Fraunhofer y sin líneas de emisión; la luz es simplemente luz del sol dispersa, más azul que roja. La luz está fuertemente polarizada como la del día. Algunas veces nubes troposféricas aparecen en silueta oscura sobre un fondo brillante de NNL. El radio de partícula en estas observaciones ópticas se estima que es de 1.4μ a 1.8μ y la densidad de

of the NLC structure ranges from about 5 to 100 Km, the most frequent value being about 10 Km (Fig. 11). Sometimes there are two systems of waves inclined to each other, which may produce a rippled appearance resembling that of some tropospheric clouds.

THICKNESS AND VERTICAL WAVE AMPLITUDE

NLC are so tenuous that it is not easy to measure the thickness, or even the vertical wave amplitude, which may be greater. Witt (1962) has made measurements that suggest thicknesses of 2 Km or less, perhaps only 1 Km, and vertical wave amplitudes averaging 1.5 to 2 Km, perhaps ranging up to 3 Km. The lower boundary of NLC appears to be more definite than the upper one.

OPTICAL MEASUREMENTS

Spectrographic observations (Grishin, 1956) and polarization measurements (Witt, 1960) of the light of NLC have been made. The spectrum resembles that of daylight, with Fraunhofer lines and no emission lines; the light is simply scattered sunlight, more blue than red. The light is strongly polarized, like daylight. Tropospheric clouds sometimes appear in dark silhouette on a bright NLC background. From these optical observations the particle radius is estimated to be from 1.4μ to 1.8μ , and the number density

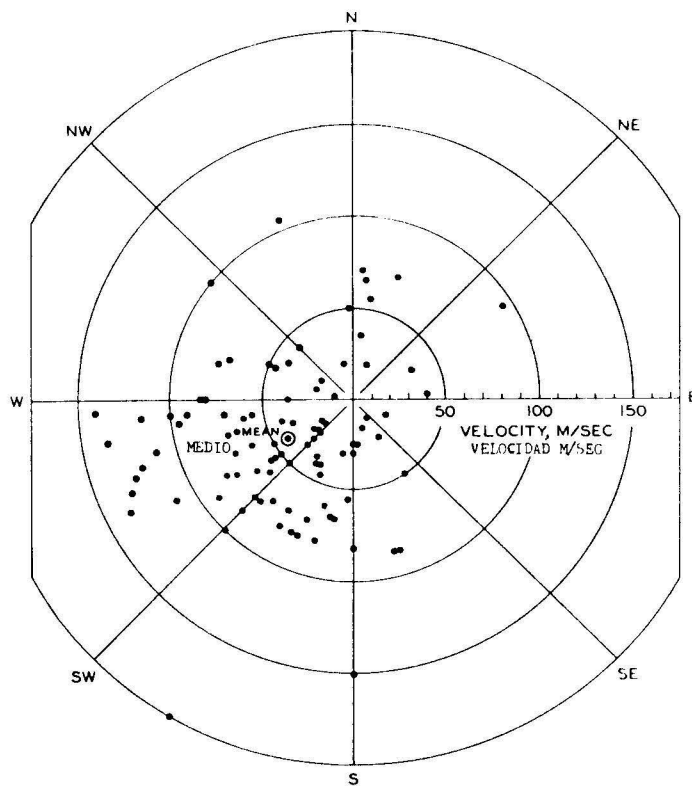


Fig. 10. Distribución de vectores de velocidades registradas de NNL.

Fig. 10. Vector plot of the reported velocities of NLC.

número de partículas de NNL cerca de la mesopausa se estima, con mucha incertidumbre, que es de 10^{-2} a $1/cc$ (Ludlam, 1957).

OBSERVACIONES POR COHETES

En 1962 dos cohetes lanzados desde Krönegard, Suecia, capturaron partículas en el aire sobre placas de impacto, expuestas durante la parte superior del vuelo, sobre un intervalo de planos en cada lado de la mesopausa. Un cohete pasó a través de NNL, otro cruzó la misma región cuando las NNL estaban ausentes (Witt, Hemenway y Soberman, 1964). Las partículas capturadas cuando las NNL fueron observadas eran de 100 a 1,000 veces más numerosas que cuando las NNL estaban ausentes, mostrando trazas de níquel y hierro, que sugerían orígenes extra-terrestres (Fig. 12). La película en que fueron recogidas las partículas indicaban que al capturarse, las partículas mayores tenían una cubierta que se había evaporado cuando las placas se recogieron. Esta cubierta se interpreta ser como de hielo. La Fig. 13 muestra la distribución de frecuencia de tamaño de las partículas sin cubierta, parece que los diámetros varían de .05 a .5 micrones. La Fig. 14 muestra el porcentaje de partículas de diferentes tamaños que tenían cubiertas.

INTERPRETACIÓN

Muchas especulaciones han sido hechas acerca de la naturaleza y causa de las NNL. Los primeros informes (1885) vinieron cuando el polvo de la gran erupción volcánica del Krakatoa se dispersó sobre el globo, produciendo

of the NLC particles near the mesopausa is estimated with much uncertainty to be from 10^{-2} to $1/cc$ (Ludlam, 1957).

ROCKET OBSERVATION

In 1962 two rockets launched from Krönegard, Sweden, caught particles in the air on impact plates, exposed during the upper part of the flight, over a range of levels on either side of the mesopausa. One rocket passed through NLC, the other traversed the same region when NLC were absent (Witt, Hemenway and Soberman, 1964). The particles caught when NLC were observed were 100 to 1,000 times as numerous as when NLC were absent. They showed traces of nickel and iron, suggesting an extra-terrestrial origin (Fig. 12). The film on which the particles were collected indicated that when caught, the larger particles had a coating that had evaporated when the plates were recovered. This coating was interpreted as ice. Fig. 13 shows the size frequency distribution of the uncoated particles; the diameters seem to range from .05 to .5 microns. Fig. 14 shows the percentage of particles of different sizes that were coated.

INTERPRETATION

Many speculations have been made as to the nature and cause of NLC. The early records (1885) came when dust from the great volcanic eruption of Krakatoa had become dispersed over the globe, producing sunsets of unusual

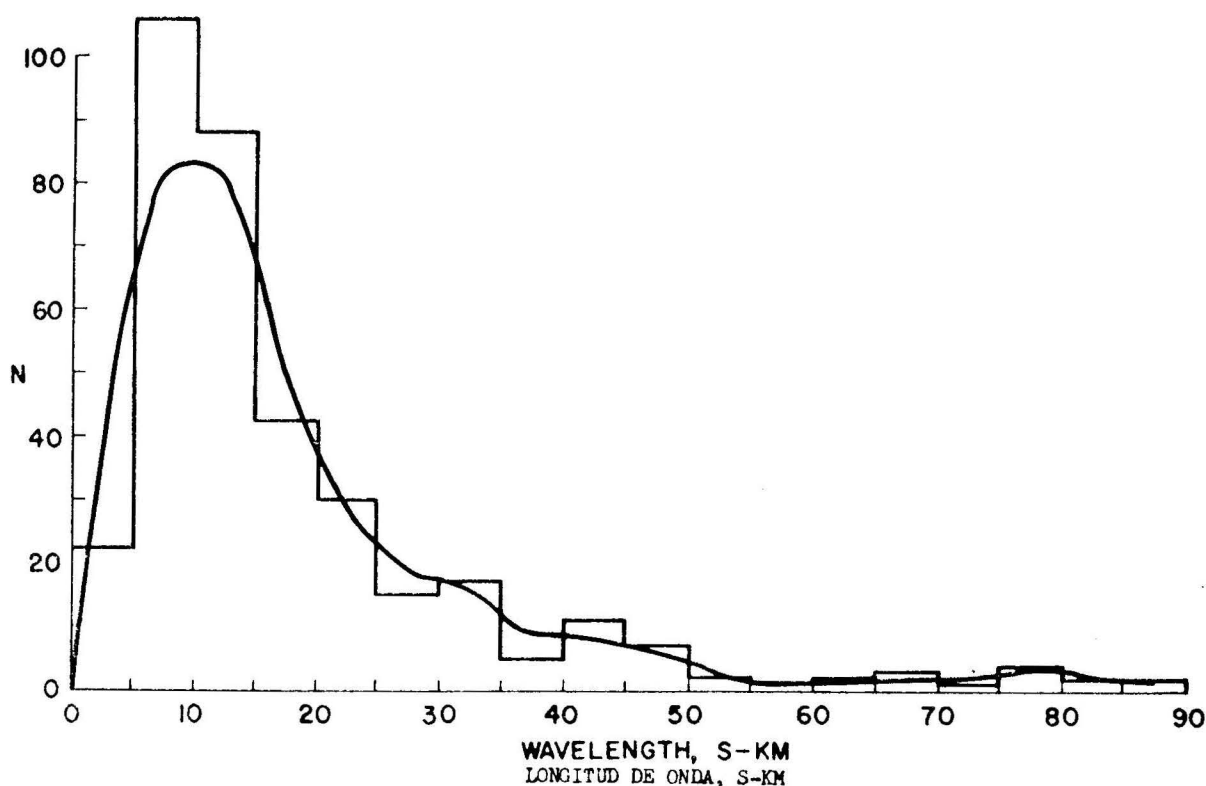


Fig. 11. Distribución de longitudes de onda de NNL.

Fig. 11. Distribution of wavelengths in NLC.

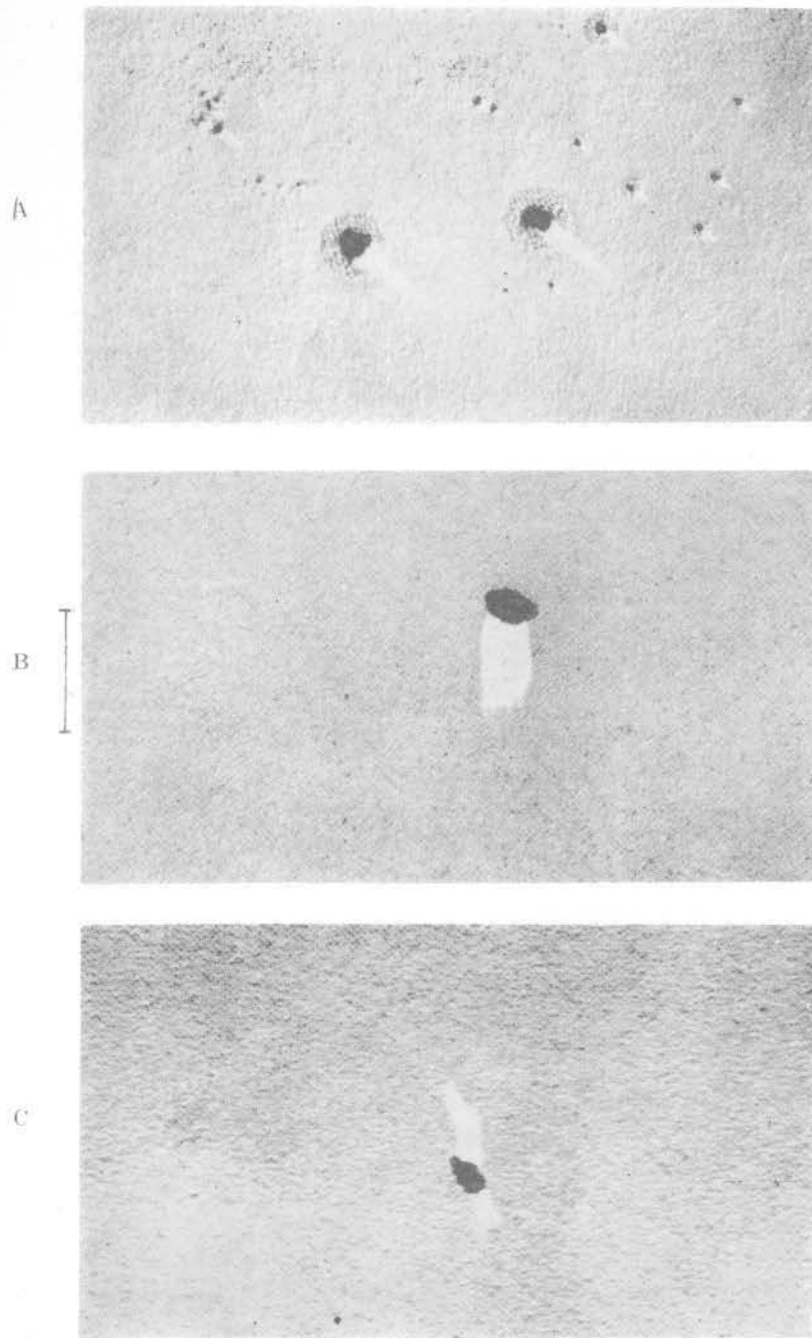


Fig. 12. Micrografía de electrones de (A) partículas de NNL, (B) partícula de polvo-mesoférico en ausencia de NNL y (C) superficie de control (escala = 1 micra).

Fig. 12. Electron micrograph of (A) NLC particles, (B) mesospheric dust particle in absence of NLC, (C) control surface (scale = 1 micron).

ocasion de inusitado brillo y esplendor; esto hizo que el cielo fuera más ampliamente observado, pero las estadísticas no apoyan la idea de que la erupción del Krakatoa u otras erupciones volcánicas puedan ser la causa de NNL.

Las escasas observaciones de cohetes apoyan a los muchos autores que han pensado que las NNL están formadas por núcleos de polvo cubiertos de hielo. Una explicación completa debe mostrar por qué la presencia de NNL ocurre en o cerca de la mesopausa, al parecer solamente en verano y en latitudes arriba de los 45°; cómo se forman, por qué están presentes en algunas noches y no en otras; y por qué son delgadas, de estructura ondulada y frecuentemente tienen una duración de cuando menos unas horas.

La temperatura registrada por medio del cohete que atravesó una distribución de NNL sobre Suecia, en Agosto de 1963, fue excepcionalmente baja, cerca de 130° K. Una temperatura muy baja es necesaria para que el vapor de agua se condense en núcleos de polvo.

Murgatroyd y Singleton (1961) tentativamente han inferido de otros datos que en el hemisferio de verano hay una región continua de aire ascendente en la mesosfera (entre 30 y 80 Km de altura), con velocidades ascendentes que aumentan hacia el polo de verano y son de un orden de 1 cm/seg, o 1 Km/día en latitudes de NNL. Ciertamente alguna circulación a gran escala parece requerirse para explicar la presencia de suficiente vapor de agua para que las NNL aparezcan en la mesopausa.

Se necesitan condiciones adicionales para explicar por qué las NNL están algunas veces, pero no siempre, presentes

brightness and splendor; this led to the sky being more widely observed at that time, but statistics do not support the view that the Krakatoa or other volcanic eruptions can be the cause of NLC.

The scanty rocket observations support the many writers who have interpreted NLC as composed of ice-coated dust nuclei. A full explanation must show why NLC occur at or near the mesopause, apparently only in summer and in latitudes above 45°; how they are formed, why they are present on some nights but not on others; and why they are thin, of wavy structure, and often have a duration of at least some hours.

The mesopause temperature recorded by means of a rocket probe that traversed a distribution of NLC over Sweden in August 1963 was exceptionally low, about 130° K. A very low temperature is necessary for water vapor to condense on dust nuclei.

Murgatroyd and Singleton (1961) have tentatively inferred from other data that in the summer hemisphere there is a continuous region of ascending air in the mesosphere (between 50 and 80 Km height) with ascent speeds that increase towards the summer pole, and are of order 1 cm/sec, or 1 Km/day, in NLC latitudes. Certainly some large scale circulation seems to be required to explain the presence of sufficient water vapor for NLC to appear at the mesopause.

Additional considerations are needed to explain why NLC are sometimes but not always present in high latitudes

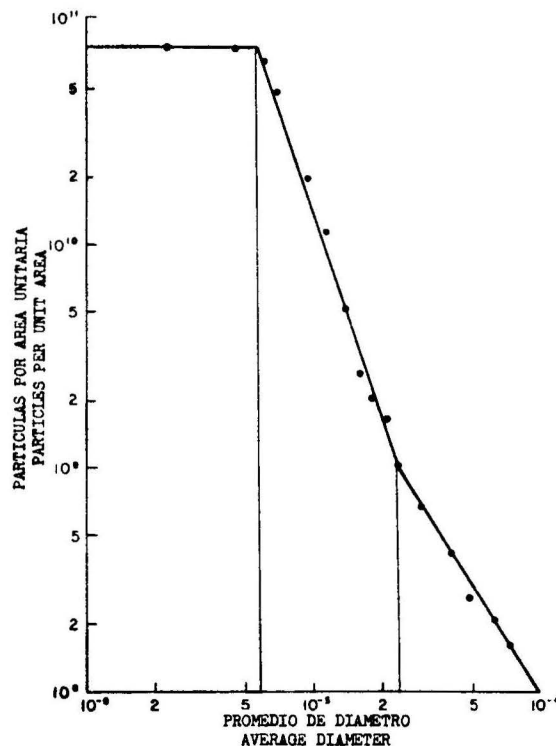


Fig. 13. Distribución de frecuencia de tamaños de núcleos de polvo de NNL.

Fig. 13. Size frequency distribution of NLC dust nuclei.

en latitudes altas en verano y por qué (con la escasa evidencia del cohete) los núcleos de polvo en NNL son mucho más numerosos cerca de la mesopausa que en otras partes.

Chapman y Kendall (1965) han discutido la difusión del vapor de agua y del polvo en las regiones de ambos lados de la mesopausa en varias condiciones, arguyendo que la hipótesis de una temperatura anormalmente baja de la mesopausa puede llenar los tres requisitos para la aparición de NNL en la región de aire ascendente del verano de altas latitudes inferida por Murgatroyd y Singleton. La temperatura baja es por sí misma un requisito para la condensación. Los otros dos son la presencia de adecuado vapor de agua y núcleos de polvo. La anormal temperatura baja de la mesopausa T_m implica gradientes más rápidos de temperatura vertical (índices de lapso y de ascenso) abajo y arriba de este plano. Además, implica disminuida estabilidad abajo y aumentada estabilidad arriba. La agravada inestabilidad abajo favorecerá el transporte turbulento de vapor de agua a la mesopausa. De ahí debe difundirse dentro de la más quieta termósfera justamente arriba. La altura correspondiente a T_m implica un rápido decremento ascendente de la densidad y la diaria disociación de las moléculas de agua por radiación ultravioleta penetrando débilmente tan abajo cuanto la mesopausa reduzca más aún la concentración del vapor de agua. Las dos causas parecen adecuadas para explicar la tenuidad de las NNL.

Problemas de difusión relacionados con polvo meteórico descendiendo desde afuera al interior de una atmósfera isotérmica han sido considerados por Yu y Klein (1964) y Chapman y Kendall (1965). Yu y Klein discutieron lo que pasa cuando la entrada de las partículas ocurre solamente durante un muy breve intervalo, hacia dentro de una atmós-

in summer-and why (on the scanty rocket evidence) the dust nuclei are so much more numerous near the mesopause in NLC than otherwise.

Chapman and Kendall (1965) have discussed diffusion of water vapor and dust in the regions on both sides of the mesopause in various conditions. They argue that one hypothesis, of abnormally low mesopause temperature, may account for the three requisites for the appearance of NLC in the high latitude summer region of ascending air inferred by Murgatroyd and Singleton. The low temperature itself is one requisite, for condensation. The other two are the presence of adequate water vapor and dust nuclei. The abnormal low mesopause temperature T_m implies steeper vertical temperature gradients (lapse and mount rates) below and above that level; they further imply decreased stability below, increased stability above. The enhanced instability below will favor the eddy transport stability of water vapor to the mesopause. From there it must diffuse into the quieter thermosphere just above; the very small scale height corresponding to T_m implies a rapid upward decrease of density; and daytime dissociation of the water molecules by ultra violet radiation penetrating weakly as far down as the mesopause will further reduce the water vapor concentration. The two causes seem adequate to explain the thinness of NLC.

Diffusion problems relating to meteoric dust descending from outside into an isothermal atmosphere have been considered by Yu and Klein (1964) and Chapman and Kendall (1965). Yu and Klein discussed what happens when the entry of the particles occurs only during a very brief interval, into a perfectly static dustfree atmosphere. In this

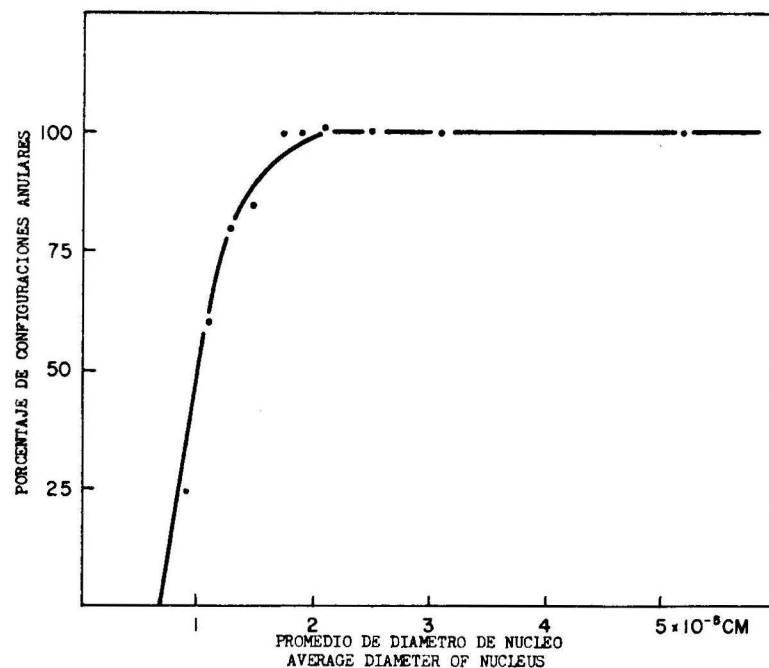


Fig. 14. Porcentaje de partículas de NNL de diferentes tamaños que tenían cubiertas.

Fig. 14. Percentage of NLC particles of different sizes that were coated.

fera perfectamente estática y libre de polvo. En este caso, el polvo formaría una capa delgada que descendería. La velocidad del descenso debería hacerse invariablemente menor a medida que la capa de polvo se hundiese en niveles aún más densos (Fig. 15).

Chapman y Kendall consideraron una entrada *continua y uniforme* de polvo a partir de un cierto tiempo cero hacia el interior de una atmósfera isotérmica perfectamente estática, bajando hasta un cierto nivel, la *turbopausa* y mezclándose bien por *turbulencia* por debajo de ese nivel. En la parte de la atmósfera arriba de la turbopausa, la densidad del polvo debería alcanzar gradualmente una distribución con una constante proporción de polvo en el aire. La densidad del polvo debería bajar discontinuamente a través de la turbopausa por una dispersión turbulenta en las capas inferiores; si el coeficiente de difusión turbulenta fuera un múltiplo grande y constante M del coeficiente de difusión molecular en la región turbulenta, gradualmente la distribución del polvo debería hacerse exponencial en proporción constante a la densidad del aire, pero menor en la razón M que si toda la atmósfera fuera estática. En cualquier caso,

case the dust would form a thin layer which would descend. The speed of descent would get steadily less as the dust layer sank into even denser levels (Fig. 15).

Chapman and Kendall considered a *uniform continuous* entry of dust from a certain zero time onwards, into an isothermal of dust from a certain zero time onwards, into an level, the *turbopause*, and well mixed by turbulence below that level. In the part of the atmosphere above the turbopause, the dust density would gradually approach a distribution with a constant proportion of dust in the air. The dust density would drop discontinuously across the turbopause by eddy dispersion in the layers below; if the eddy diffusion coefficient were a constant large multiple M of the molecular diffusion coefficient in the turbulent region, gradually the dust distribution there would approach an exponential one, in constant proportion to the air density, but less in the ratio M than if the whole atmosphere were static. In either case the whole density distribution would slowly increase as the dust accumulated in the atmosphere,

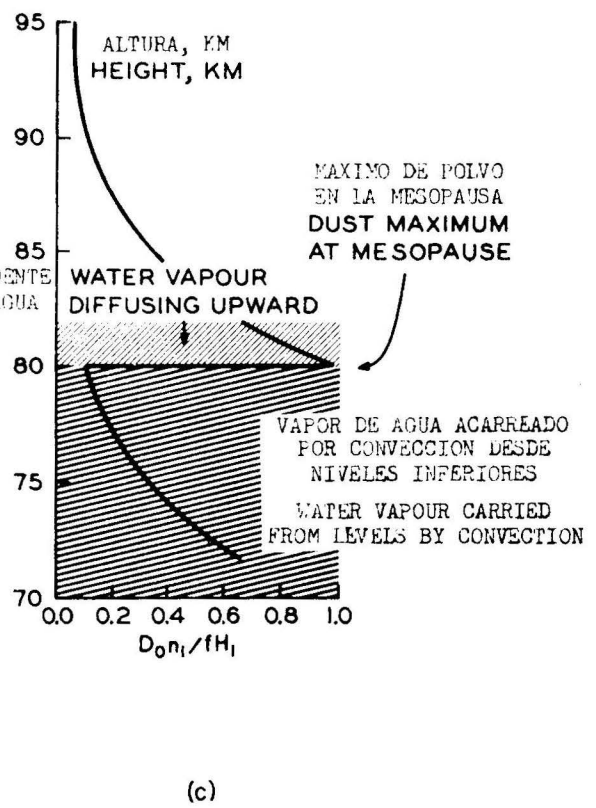
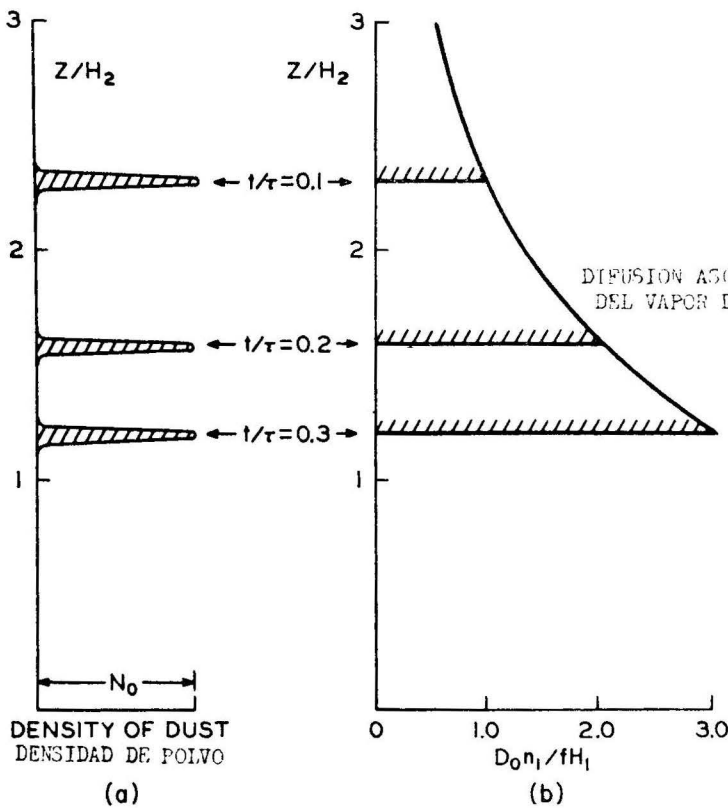


Fig. 15. Descenso de polvo a través de una atmósfera exponencial isotérmica:
 (A) delgada capa de polvo resultante de entrada de polvo por breve tiempo,
 (B) entrada continua de polvo en una atmósfera inicialmente libre de polvo,
 (C) interacción de polvo y agua que se difunde en la atmósfera a través de la mesopausa.

Fig. 15. Descent of dust through an isothermal exponential atmosphere:
 (A) a thin dust layer caused by dust entry for a brief time,
 (B) continuous entry of dust into an initially dust free atmosphere,
 (C) dust interacting with water diffusing into the atmosphere across the mesopause.

la distribución total de la densidad debería aumentar despacio, a medida que el polvo se acumule en la atmósfera, excepto en niveles bajos y siempre y cuando el polvo se deposite en el suelo.

Si después de algún tiempo el nivel de la turbopausa descendiera de la altura h_1 a la altura h_2 , la densidad del polvo, a medida que el aire intermedio se calma, deberá alcanzar gradualmente en un tiempo t_0 una distribución exponencial y continuar bajando la distribución hasta la altura h_2 en constante proporción a la densidad del aire, que anteriormente terminaba en la altura h_1 ; la baja discontinua de la densidad del polvo debería ahora ocurrir en la nueva altura de la turbopausa h_2 .

La aplicación de esas ideas sobre las NNL es así: la exploración de la composición de la atmósfera por cohetes sugiere cierto grado de mezcla turbulenta del aire que se extiende más allá de la mesopausa hasta arriba de 110 Km; éste o algún nivel más bajo se asemejaría a la turbopausa discontinua en la idealizada atmósfera descrita arriba. El nivel efectivo de la turbopausa debe variar y una temperatura anormalmente baja de la mesopausa T_m con su rápido aumento asociado de índice de temperatura superior, debe bajar la turbopausa. Chapman y Kendall (1965) sugieren que cuando hay NNL la turbopausa desciende hasta o cerca de la mesopausa y sus cálculos indican que la distribución de partículas de polvo del tamaño observado por el cohete debería ser casi exponencial al bajar a su nuevo nivel en unas 8 horas. Esto podría explicar de manera natural el gran aumento de densidad del polvo en ese tiempo, como en la observación por cohete de NNL en la mesopausa. No intentaban explicar lo que causa le anormalmente baja observada temperatura de la mesopausa.

Chapman y Kendall (1965) infieren que cuando las NNL son observadas, las partículas de nubes deben formarse por condensación de vapor de agua en las partículas de polvo en la supuesta región saturada abajo de la mesopausa, pero que serán muy pocas (a causa de la dispersión turbulenta) para dar nubes visibles allí. Así, las NNL solamente arriba de la mesopausa y en una capa que se adelgaza por el decremento hacia arriba tanto del vapor de agua (en proporción de lapso con la densidad del aire) como del polvo (en proporción de contraste con la densidad del aire).

Debería hacerse notar que la formación de NNL puede explicarse por una concentración aumentada de partículas de polvo sólo en la mesopausa sin el requisito añadido de la cubierta de hielo en las partículas grandes. Al considerar las propiedades de dispersión de partículas de polvo y de partículas de polvo cubiertas con hielo se ve que partículas de cualquiera de ambos tipos explicarían las características de la luz en las NNL. Las medidas experimentales de polarización de la luz desde NNL como función del tiempo al crecer y disiparse el despliegue deberían contestar esta pregunta sobre la verdadera naturaleza de las partículas.

Haurwitz (1964) ha discutido la estructura de las NNL y concluye que las ondas de componente más largo parecen ser causadas por ondas de gravedad en la región de la

except at low levels and in so far as the dust settled out at the ground.

If after some time the level of the turbopause descended from height h_1 to height h_2 , the dust density, as the intervening air came to rest, would in a time t_0 gradually approach an exponential distribution, continuing down to height h_2 the distribution, in constant proportion to the air density, that formerly terminated at height h_1 ; the discontinuous drop of dust density would now occur at the new turbopause height h_2 .

The application of these ideas to NLC is as follows. Rocket exploration of the composition of the atmosphere suggests that some degree of turbulent mixing of the air extends beyond the mesopause, up to about 110 Km; this or a somewhat lower level may be likened to the discontinuous turbopause in the idealized atmosphere described above. The effective level of the turbopause must vary, and an abnormally low mesopause temperature T_m , with its associated steeper mount rate of temperature above, must lower the turbopause. Chapman and Kendall (1965) suggest that when there is NLC the turbopause descends to or near to the mesopause, and their calculations indicate that the distribution of dust particles of the rocket-observed size would become almost exponential down to the new level within about 8 hours. This could account in a natural way for a great increase of dust density at such a time, as in the NLC rocket observation, at the mesopause. They do not attempt to explain what causes the observed abnormally low mesopause temperature.

Chapman and Kendall (1965) infer that when NLC are observed, cloud particles must be formed by condensation of water vapor on the dust particles in the supposed saturated region below the mesopause, but that these will be too few (because of turbulent dispersion) to give visible cloud there. Thus the NLC appear only above the mesopause, and in a layer rendered thin by the upward decrease of both the water vapor (in lapsing proportion to the air density) and the dust (in contrast proportion to the air density).

It should be pointed out that the formation of NLC could be accounted for by an increased concentration of dust particles at the mesopause alone without the added requirement of ice coating on the larger particles. Considerations of the scattering properties of dust and ice-coated particles show that particles of either type would explain the characteristics of the light from NLC. Experimental measurements of the polarization of the light from NLC as a function of time during the growth and decay of a display should answer this question of the true nature of the particles.

Haurwitz (1964) has discussed the structure of NLC, and concludes that the longer component waves are likely to be caused by gravity waves in the mesopause region,

mesopausa y que la estructura a menor escala puede ser causada por ondas interfásicas (así como en la explicación de Helmholtz sobre la estructura de onda, abigarrada, de las nubes troposféricas).

3. INTERES METEOROLOGICO DE LAS NNL

Es ahora apenas posible juzgar si la observación de NNL será de valor en la predicción del tiempo, pero a medida que la interpretación de las NNL se hace más cierta y mejor desarrollada, las NNL pueden ciertamente contribuir a nuestro conocimiento y comprensión de la dinámica general y de la termodinámica de la atmósfera. Su incidencia en ciertos meses y en ciertos intervalos de latitud es un indicador de las propiedades sinópticas a gran escala de la circulación general. Las fechas y lugares particulares en latitudes altas donde las NNL se hacen visibles señalan las no-uniformidades locales en la circulación y las condiciones en dichas regiones mesoféricas.

La visibilidad de las NNL a una altura mesoférica da un medio simple para determinar los vientos justamente arriba de la mesopausa y la estructura de onda puede informar acerca de la distribución de viento a través de la mesopausa. Nuestro principal conocimiento de los vientos en esta región ha venido de la exploración por cohetes, usando material inyectado para formar rastros luminosos o ionizados; éstos y los gases del cohete han formado, en algunas ocasiones, NNL artificiales.¹ Pero, las NNL pueden dar información más continuamente y sobre regiones más grandes, que la que puede obtenerse por técnicas de cohetes, mucho más costosas.

Muchos otros problemas relacionados con las NNL se presentan para estudio. Entre ellos está su posible influencia en la distribución térmica que las crea (de acuerdo con la hipótesis de Chapman y Kendall). Otra es su influencia en la fotoquímica de la región en la cual están situadas, tanto en ozono como oxígeno atómico y en cuanto a productos de disociación del vapor de agua. Estas influencias pueden afectar la distribución del hidroxilo y del oxígeno atómico que participan en el resplandor del aire.

AGRADECIMIENTO

La ayuda de la National Science Foundation bajo subsidio Núm. GP-1759 para este trabajo es agradecidamente reconocida.

¹ NUBES NOCTILUCENTES ARTIFICIALES.—En los últimos años ha habido como una docena de observaciones de NNL artificiales (Meinel, 1963) hasta latitudes abajo de 45°. Estas nubes han sido asociadas con lanzamientos de cohetes desde Point Magu Missile Range a 34°N, 118°W. La mayor parte de las observaciones se han correlacionado con lanzamientos del proyectil SCOUT, que tiene un propulsor sólido y se quema en la alta atmósfera. Los productos escapados del proyectil SCOUT son ricos en vapor de agua y partículas sólidas y parece ser que estas sustancias son introducidas dentro de la región de la mesopausa en cantidad suficiente para crear NNL. Cuando los vientos van hacia el este, las nubes se mueven sobre Arizona donde Meinel las ha observado.

and that the smaller scale structure may be caused by interface waves (somewhat as in the Helmholtz explanation of the wave and dappled structure of tropospheric clouds).

3. METEOROLOGICAL INTEREST OF NLC

It is scarcely now possible to judge whether the observation of NLC will ever be of value in weather forecasting, but as the interpretation of NLC becomes more certain and better developed, NLC can certainly contribute to our knowledge and understanding of the general dynamics and thermodynamics of the atmosphere. Its occurrence in certain months and over a certain range of latitude is a pointer to large scale synoptic properties of the general circulation. The particular dates and particular places in high latitudes where NLC becomes visible point to local non-uniformities in the circulation and condition in those mesospheric regions.

The visibility of NLC at mesospheric height gives a simple means of determining the winds just above the mesopause, and the wave structure may give information about the distribution of wind across the mesopause. Our main knowledge of winds in this region has come from rocket exploration, using injected material to form luminous or ionized trails; these and the rocket gases have on several occasions formed artificial NLC.¹ But NLC can give information more continuously and over larger regions than are possible with the much more expensive rocket techniques.

Many further problems connected with NLC suggest themselves for study. Among these are their possible influence on the thermal distribution which creates them (according to the hypotheses of Chapman and Kendall). Another is their influence on the photochemistry of the region in which they are situated, both as regards ozone and atomic oxygen, and as regards the dissociation products of water vapor. Such influences may affect the brightness and distribution of the hydroxyl and atomic oxygen contributions to the airglow.

ACKNOWLEDGEMENT

The support by the National Science Foundation under Grant No. GP-1759 for this work is gratefully acknowledged.

¹ ARTIFICIAL NOCTILUCENT CLOUDS.—Over the past few years there have been over a dozen sightings of artificial NLC (Meinel, 1963) at latitudes below 45°. These clouds have been associated with rocket launchings from the Point Magu Missile Range at 34°N, 118°W. Most of the sightings have been correlated with launchings of the SCOUT missile, which has a solid propellant and burns high into the atmosphere. The exhaust products of the SCOUT missile are rich in water vapor and solid particles, and it appears that these substances are introduced into the mesopause region in sufficient amount to create artificial NLC. When the winds are toward the east, the clouds drift over Arizona where Meinel has observed them.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAPHY

- ASTAPOVIC, I. S. 1958. *Meteoric Phenomena in the Earth's Atmosphere*. Moscow Gos. Izdat. Fiz. Mat.-Lit.
- BACKHOUSE, T. W. 1885. The Luminous Cirrus Clouds of June and July, *Meteor. Mag.*, 20:133.
- CHAPMAN, S. & P. C. KENDALL, 1965. Noctilucent Clouds and Thermospheric Dust: their Diffusion and Height Distribution, (en publicación) (in publication).
- FOGLE, B. & Y. GOTAAS, 1963. Noctilucent Cloud Observation Manual. Cloud Report No. 1, Geophysical Institute, University of Alaska, October.
- FOGLE, B. 1964. Results of the Study of Noctilucent Clouds over North America during 1963, Cloud Report No. 2, Geophysical Institute, University of Alaska, February.
- 1965. The Apparent Frequency of Occurrence of Noctilucent Clouds over North America (en publicación) (in publication).
- GRISHIN, N. I. 1956. Research of Continuous Spectra of Noctilucent Clouds, *All-Union Astr. Geod. Soc. Bull.*, 19(26):3-16.
- HAMILTON, R. A. 1964. Observations of Noctilucent Cloud near Midwinter, *Meteor. Mag.*, 93:201.
- HAURWITZ, B. 1964. Comments on wave Forms in Noctilucent Clouds. Geophysical Institute Report No. UAG-R160, University of Alaska, December.
- JESSE, O. 1896. Die höhe der leuchtenden Nachtwolken, *Astr. Nachr.*, 410, 161-168.
- LUDLAM, F. H. 1957. Noctilucent Clouds, *Tellus*, 9; 341-364.
- MEINEL, A. B., B. MIDDLEHURST & E. WHITAKER. 1963. Low Latitude Noctilucent Cloud of 15 June 1963, *Science*, 141:1176-1178.
- MURCATROYD, R. J. & F. SINGLETON. 1961. Possible Meridional Circulations in the Stratosphere and Mesosphere, *Quart. Jour. Royal Met. Soc.*, 87:126.
- PATON, J. 1949. Luminous Night Clouds, *Meteor. Mag.*, 78:354-357.
- 1964a. Noctilucent Clouds, *Meteor. Mag.*, 93:161.
- 1964b. Private communication.
- PITTWELL, L. R. 1963. High Altitude Clouds over Addis Ababa, *Bull. Geophys. Obs. Addis Ababa*, 3:145.
- STÖRMER, C. 1933. Height and Velocity of Luminous Night Clouds observed in Norway in 1932. *Oslo University Observatory Publication No. 6*.
- 1935. Measurements of Luminous Night Clouds in Norway 1953 and 1954. *Astrophysica Norvegica*, 1:87-114.
- STROUD, W. G., W. NORDBERG, W. R. BANDEEN, F. L. BARTMAN & P. TITUS. 1960. Rocket Grenade Measurements of Temperature and Winds in the Mesosphere over Churchill, Canada, *Jour. Geophys. Research*, 65:2307-2323.
- WITT, G. 1960. Polarization of Light from Noctilucent Clouds, *Jour. Geophys. Research*, 65:925-933.
- 1962. Height, Structure and Displacement of Noctilucent Clouds, *Tellus*, 14:1-18.
- WITT, G., C. L. HENENWAY & R. K. SOBERMAN. 1964. Collection and Analysis of Particles for Mesopause, *Space Research*, Vol. 4, North Holland Publishing Co.
- YU, K. & M. M. KLEIN. 1964. *Phys. Fl.*, 1:651.

NUBES NOCTILUCIENTES FOTOGRAFIADAS EN ALASKA
EN AGOSTO DE 1963

NOCTILUCENT CLOUDS PHOTOGRAPHED IN ALASKA
IN AUGUST 1963



1. VIII-12/13. College. Y. GOTAAS-EIELSON. 23:10 NE 8" f. 2.8. ASA 160



2. VIII-12/13. College. B. FOGLE. 00:25 NNE 1" f. 0.95 ASA 25

NUBES NOCTILUCIENTES FOTOGRAFIADAS EN ALASKA
EN AGOSTO DE 1963

NOCTILUCENT CLOUDS PHOTOGRAPHED IN ALASKA
IN AUGUST 1963



3. VIII-12/13. College. B. FOGLE. 00:40 NNE 1" f. 0.95 ASA 160



4. VIII-11/12. Anchorage. R. SISTRUNK. 01:45-02:00 NE ASA 25

NUBES NOCTILUCIENTES FOTOGRAFIADAS EN ALASKA
EN AGOSTO DE 1963

NOCTILUCENT CLOUDS PHOTOGRAPHED IN ALASKA
IN AUGUST 1963



5. VIII-11/12. College. B. FOGLE. 00:45 65° E 1" f. 0.95 ASA 160



6. VIII-6/7. Fairbanks. G. CRESSWELL. 00:15 7" f. 2.0 ASA 25

F20L