

GEOFISICA INTERNACIONAL

REVISTA DE LA UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, AUSPICIADA POR EL INSTITUTO DE GEOFÍSICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Director: Julián Adem

Subdirector: Manuel Maldonado-Koerdell

Vol. 2

México, D. F., 1o. de Enero de 1962

Núm. 1

ALGUNAS RELACIONES ENTRE EL NIVEL DEL MAR Y EL VIENTO EN EL PACIFICO ECUATORIAL

G. W. GROVES * y F. GRIVEL **

RESUMEN

El viento alisio en la región del Pacífico Ecuatorial, está sometido a fluctuaciones regulares de cuatro días, asociadas con el paso de ondas atmosféricas de tipo planetario hacia el oeste. Estas fluctuaciones del viento originan ascensos y descensos en la superficie del mar con la misma frecuencia. En ocasiones, dichas ondas superficiales alcanzan una doble amplitud de diez centímetros y destacan prominentemente sobre el ruido de fondo. El análisis estadístico muestra que estas ondas son coherentes a lo largo de grandes distancias desde las Islas Line hasta las Phoenix y desde ellas hasta las Islas Gilbert, una distancia total de 3,000 Km. La actividad de fondo, en la misma gama de frecuencias, no tiene esta coherencia. Las relaciones de fase en las varias estaciones mareográficas establecidas durante el Año Geofísico Internacional resultan compatibles con una onda progresiva que viaja hacia el oeste, como era de esperarse, que podría ser inducida por las ondas en el viento alisio.

En las Islas Phoenix, donde la actividad de cuatro días resulta ser mayor, hay picos significantes y bien definidos del espectro con períodos de cinco y 2.7 días, además del pico más prominente de cuatro días. Dichos picos son notablemente angostos, siendo casi indistinguibles de las verdaderas líneas. No ha sido explicado el origen de estos picos.

INTRODUCCION

El viento alisio en la región ecuatorial del Océano Pacífico exhibe un movimiento ondulatorio de tipo planetario. Las ondas se originan en algún lugar al este de las Islas Line y viajan a razón de 11 nudos hacia el oeste, volviéndose inestables y provocando vórtices (los cuales en ocasiones adquieren intensidades huracanadas) después de su paso

* Dirección actual: Instituto de Geofísica y Física Planetaria, Universidad de California, La Jolla, California.

** Instituto de Geofísica, U.N.A.M.

SOME RELATIONSHIPS BETWEEN SEA LEVEL AND WIND IN THE EQUATORIAL PACIFIC

G. W. GROVES * and F. GRIVEL **

ABSTRACT

The trade wind in the Equatorial Pacific region is subject to regular four-day fluctuations associated with the westward passage of planetary-type, atmospheric waves. This wind fluctuation causes the sea surface to rise and fall with the same frequency. At times, these surface waves attain a double amplitude of ten centimeters and stand out prominently against the background noise. Statistical analysis shows these waves to be coherent over great distances — from the Line Islands to the Phoenix, and from the latter to the Gilbert Islands, a total distance of 3,000 Km. The background activity, in the same frequency range, is not this coherent. The phase relations at various sea-level observatories set up during the International Geophysical Year are consistent with a westward-travelling progressive wave, as one might expect would be forced by the wave in the trade wind.

In the Phoenix Islands, where the four-day activity is greatest, there are significant, well-resolved spectral peaks at periods of five days and 2.7 days, in addition to the more prominent four-day peak. These peaks are remarkably narrow, being almost indistinguishable from true lines. The origin of these peaks has not been explained.

INTRODUCTION

The trade wind in the equatorial region of the Pacific Ocean exhibits a planetary-like wave motion. The waves originate somewhere east of the Line Islands and progress westward at about 11 knots, becoming unstable and shedding vortices (which at times attain hurricane intensity) after they pass the Gilbert Islands. Their wave length is

* Present address: Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, La Jolla, California.

** Institute of Geophysics, U.N.A.M.

por las Islas Gilbert. Su longitud de onda es aproximadamente de 15 grados de longitud. En un punto fijo del curso de dichas ondas, un observador podría notar que la dirección del viento alterna al norte del este y al sur del este, repitiéndose de esa manera cada cuatro días o algo así bajo

about 15 degrees of longitude. At a fixed point in the path of these waves, an observer would note that the wind direction alternates between north of East and south of East, the pattern repeating itself every four days or so under the most regular conditions. These easterly waves have been

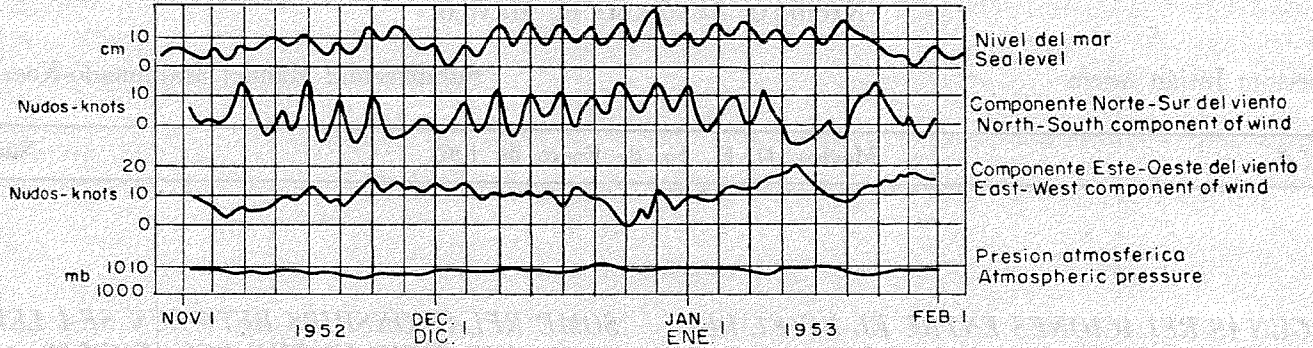


Fig. 1. Registros simultáneos del nivel del mar, presión atmosférica superficial y vientos superficiales en la Isla de Cantón. Los registros de viento y presión consisten en promedios (centrados) de las ocho observaciones tomadas cada día a intervalos de tres horas. Las líneas verticales están a intervalos de 3.84 días para demostrar la gran regularidad de la fase a través de muchos ciclos de la oscilación (Tomado de *Deep Sea Research*, 1956, Vol. 3, p. 248).

Fig. 1. Simultaneous records of sea level, surface atmospheric pressure atmospheric pressure and surface wind at Canton Island. The wind and pressure record consist of (centered) averages of the eight observations made each day at three-hour intervals. The vertical lines are spaced every 3.84 days to demonstrate the remarkable regularity of phase throughout many cycles of the oscillation. (Taken from *Deep-Sea Research*, 1956, Vol. 3, p. 248).

las más regulares condiciones. Estas ondas del este han sido descritas por Palmer (1952). Se ha encontrado una oscilación en el nivel del mar con un período de cuatro días que está relacionada con las ondas del este (Groves, 1956). La Figura 1 muestra el nivel del mar, viento y presión atmosférica en la Isla Canton durante un periodo de tres meses con ondas de cuatro días inusualmente regulares.

described by Palmer (1952). An oscillation in sea level having four-day period has been found to be related to these easterly waves (Groves, 1956). Figure 1 shows sea level, wind and atmospheric pressure at Canton Island during a three-month period for which the four-day waves were unusually regular.

LOS DATOS

THE DATA

Se establecieron estaciones mareográficas temporalmente en varias islas en la región de estas ondas, durante el Año

Sea-level recorders were established temporarily on several islands in the region of these waves during the In-

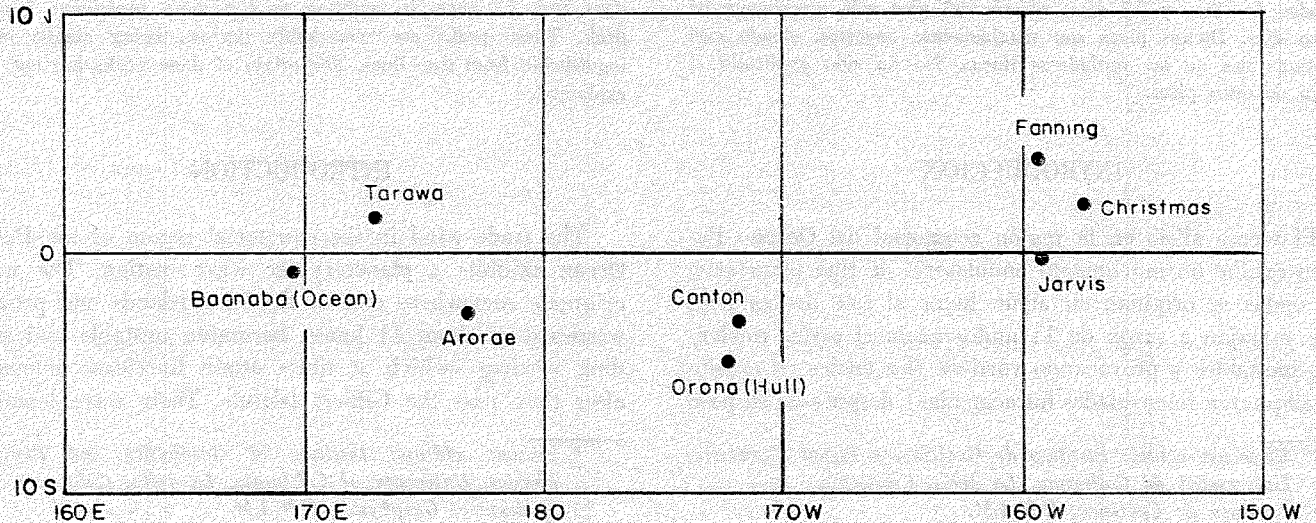


Fig. 2. Observatorios usados en el presente estudio. Los datos mareográficos de Tarawa tomados durante la guerra, representan una corta serie que no se usó.

Fig. 2. Observatories used in the present study. The Tarawa tide data represent a short series which was not used, taken during the war.

Geofísico Internacional. El mapa de la Figura 2 muestra las islas de las cuales se usaron los datos en el presente estudio. Los mareogramas fueron leídos y tabulados a intervalos de una hora en la forma usual. Las variaciones de la marea se eliminaron aplicando promedios ponderados superpuestos (D_{35} en Groves, 1955)¹ por medio de una computadora electrónica. Los valores resultantes del nivel "medio" del mar se obtuvieron dos veces al día — a las 0000 y a las 1200 TCG. El conjunto ponderado que se usó era simétrico, así que la fase de cada componente sinusoidal no sufrió cambios. Las amplitudes de las diversas componentes se alteraron como sigue:

	<i>Factor de Amplitud</i> <i>Amplitude Factor</i>
Errores al azar — Random Errors	0.25
Marea semidiurna — Semidiurnal Tide	0.0010
Marea diurna — Diurnal Tide	0.0018
Período de dos días — Two-day Period	0.42
Período de cuatro días — Four-day Period	0.82

El tratamiento de los datos del viento resultó complicado por la irregularidad de las observaciones, las cuales fueron algunas veces hechas únicamente durante las horas del día. Cada observación se representó primeramente por sus componentes norte y este y luego se trató de promediar cada componente de una manera similar al tratamiento de los datos del nivel del mar. Se obtuvo un valor por día, a las 0000 TCG. El plan fue completamente subjetivo y varió de año en año al cambiarse el procedimiento de observación. Los registros obtenidos de las componentes del viento son dignos de confianza, aunque no son tan buenos como las curvas del nivel del mar.

Las gráficas de las series de tiempo obtenidas de esta manera se muestran en las Figuras 3a a 3i. Los vientos se muestran por componentes: la curva continua es la componente de sur a norte, la curva discontinua es la componente de oeste a este. Desgraciadamente no hay una parte de los registros de estos 21½ años en que la oscilación de cuatro días aparezca tan bien como en la serie de tres meses de la Figura 1. Hemos sido informados (Jerome Namias, comunicación personal) que la región de alta presión del Pacífico Norte estuvo en una posición anómala durante la mayor parte del período del presente estudio y esto puede tener relación con la baja actividad de cuatro días.

LOS REGISTROS DEL NIVEL DEL MAR

LAS ISLAS LINE. Los registros son generalmente irregulares indicando alguna predominante actividad de cuatro días que ocurre de tiempo en tiempo. Christmas, Fanning y Jarvis son notablemente coherentes para bajas fre-

quency. The map in Figure 2 shows islands from which data was used in the present study. Marigrams were read and tabulated at hourly intervals in the usual way. Tidal variation was eliminated by applying overlapping weighted averages (D_{35} in Groves, 1955)¹ by means of an electronic computer. The resulting values of "mean" sea level were obtained twice daily — at 0000 and at 1200 GCT. The weighting array used was symmetrical so that the phase of each sinusoidal component remained unchanged. The amplitudes of the various components were altered as follows:

Treatment of the wind data was complicated by the irregularity of the observations, which were sometimes made only during the daylight hours. Each observation was first represented by its North and East component, and then it was attempted to average each component in a manner similar to the treatment of the sea level data. One value was obtained each day, at 0000 GCT. The scheme was quite subjective and varied from year to year as the observational procedure was changed. The resulting smoothed records of wind components are considered reliable, although not as good as the sea-level curves.

Figures 3a through 3i show plots of the time series obtained in this way. The winds are shown by components: the solid curve is the South to North component, the dashed curve the West to East component. Unfortunately there is no portion of these 21½ years of records in which the four-day oscillation is shown as strikingly as in the three-month series of Figure 1. We are told (Jerome Namias, personal communication), that the North Pacific High pressure region was in an anomalous position during most of the period of the present study, and this may be related to the lower four-day activity.

THE SEA-LEVEL RECORDS

THE LINE ISLANDS. The records are generally irregular with some indication of predominant four-day activity occurring from time to time. Christmas, Fanning and Jarvis are strikingly coherent at low frequencies, as one would

¹ Inédito.

¹ Unpublished

cuencias, como era de esperarse debido a la proximidad de una con otra. Las crestas de alta frecuencia ocurren en algunas ocasiones simultáneamente en los tres lugares, desde mediados de Septiembre hasta finales de Octubre de 1957 y durante Julio y Agosto de 1958 (el último ejemplo no incluye los registros de Jarvis). Esta coherencia se debe principalmente a la actividad de cuatro días, como se demuestra por el análisis estadístico que se discutirá después. Lo esencial es que la oscilación de cuatro días es aparentemente casi simultánea a través de las Islas Line.

LAS ISLAS PHOENIX. Canton tiene la máxima actividad de cuatro días y menor nivel de ruido que cualquier otro lugar estudiado. Durante el presente estudio hubo algunas ocasiones en que se observó una marcada actividad de cuatro días en Canton, por ejemplo, Enero de 1957, de mediados de Abril a Junio de 1958, Diciembre de 1958 y Junio de 1959, etc. La actividad de cuatro días es notablemente más baja en Orona (Isla Hull) que en Canton. Sin embargo, puede verse una marcada actividad durante Julio y Agosto de 1957. La comparación de Canton y Orona muestra gran coherencia para bajas frecuencias, como era de esperarse por su proximidad. Las crestas y los valles de alta frecuencia coinciden generalmente desde Junio hasta mediados de Agosto de 1957 y un poco menos aparentemente durante el resto de 1957. Esto es nuevamente una manifestación de la coherente actividad de cuatro días, que está aproximadamente en fase entre estas dos estaciones.

Para examinar la posibilidad de relación entre las variaciones del nivel del mar en las Islas Line y las Islas Phoenix, separadas por una gran distancia, comparemos los registros de Canton y Christmas. Parece haber una notable coherencia en las bajas frecuencias (períodos de semanas) que están aproximadamente en fase, pero se nota menor coherencia en las más altas frecuencias. En algunas ocasiones, como en el mes de Mayo de 1958, puede uno engañarse creyendo que existe alguna relación directa en la actividad de casi cuatro días, pero esto no apareció en el análisis.

LAS ISLAS GILBERT. Arorae y Baanaba (Isla Ocean) se encuentran separadas por unos 900 Km y por una topografía irregular. La componente de baja frecuencia parece coherente y directamente relacionada entre ambos lugares, pero el detalle más refinado, incluyendo la actividad de cuatro días, parece no tener relación. La actividad de cuatro días en Baanaba no sobresale generalmente por encima del ruido de fondo, excepto durante los meses de Octubre a Diciembre de 1957. El pico mayor durante este tiempo, ocurrido cerca del 18 de Noviembre, estaba relacionado con un viento monzónico del oeste, extraordinariamente fuerte. Picos similares que ocurrieron durante esta tormenta pueden verse en los registros del nivel del mar de Arorae, Canton y Orona. No se sabe si existe alguna rela-

expect from their proximity to one another. The higher-frequency crests sometimes occur simultaneously at the three places as from mid-September to end of October, 1957, and during July and August, 1958 (the latter example is without the Jarvis record). This coherence is due primarily to the four-day activity, as is shown by the statistical analyses to be discussed below. The essential point is that the four-day oscillation apparently is almost simultaneous throughout the Line Islands.

THE PHOENIX ISLANDS. Canton has the strongest four-day activity and lowest noise level of any place studied so far. During the present study there were a few times during which marked four-day activity can be noted at Canton; for example, January, 1957, mid-April through June, 1958, December, 1958 and June, 1959, etc. The four-day activity is noticeably lower at Orona (Hull Island) than at Canton. However, marked activity can be seen during July-August, 1957. Comparison of Canton with Orona shows strong coherence at low frequencies, as one would expect from their proximity. The higher-frequency crests and troughs generally coincide, as during June to mid-August, 1957, and somewhat less convincingly throughout the rest of 1957. This again is a manifestation of coherent four-day activity approximately in phase between these two stations.

To examine the possibility of a relationship between the sea-level variation in the Line Islands and in the Phoenix Islands, a respectable distance apart, let us compare the Canton and Christmas records. There seems to be considerable coherence in the low frequencies (periods of weeks), which are approximately in phase, but noticeably less coherence in the higher frequencies. There are times, such as during May, 1958, when one can persuade himself into believing that there is a direct relationship in the quasi four-day activity, but this is not born out in the analyses.

THE GILBERT ISLANDS. Arorae and Baanaba (Ocean Island) are separated by about 900 Km and irregular topography. The low frequency component appears coherent and directly related between the two places but the finer detail, including the four-day activity, seems unrelated. The four-day activity at Baanaba does not usually stand out noticeably above the background noise except during October to December, 1957. The highest peak during this time, occurring about November 18, was related to an unusually severe westerly Monsoon wind. Similar peaks which occurred during this storm can be seen on the sea-level records at Arorae, Canton and Orona. It is not known whether there is a relation between the occurrence of the Monsoon wind and the enhanced four-day

Figs. 3a. — 3i. Registros simultáneos de vientos y nivel del mar. La curva continua del viento es la componente sur-norte, la curva discontinua es la componente oeste-este.

Figs. 3a. — 3i. Simultaneous records of sea level and winds. The solid wind curve is the South to North component, the dashed curve is the West-East component.

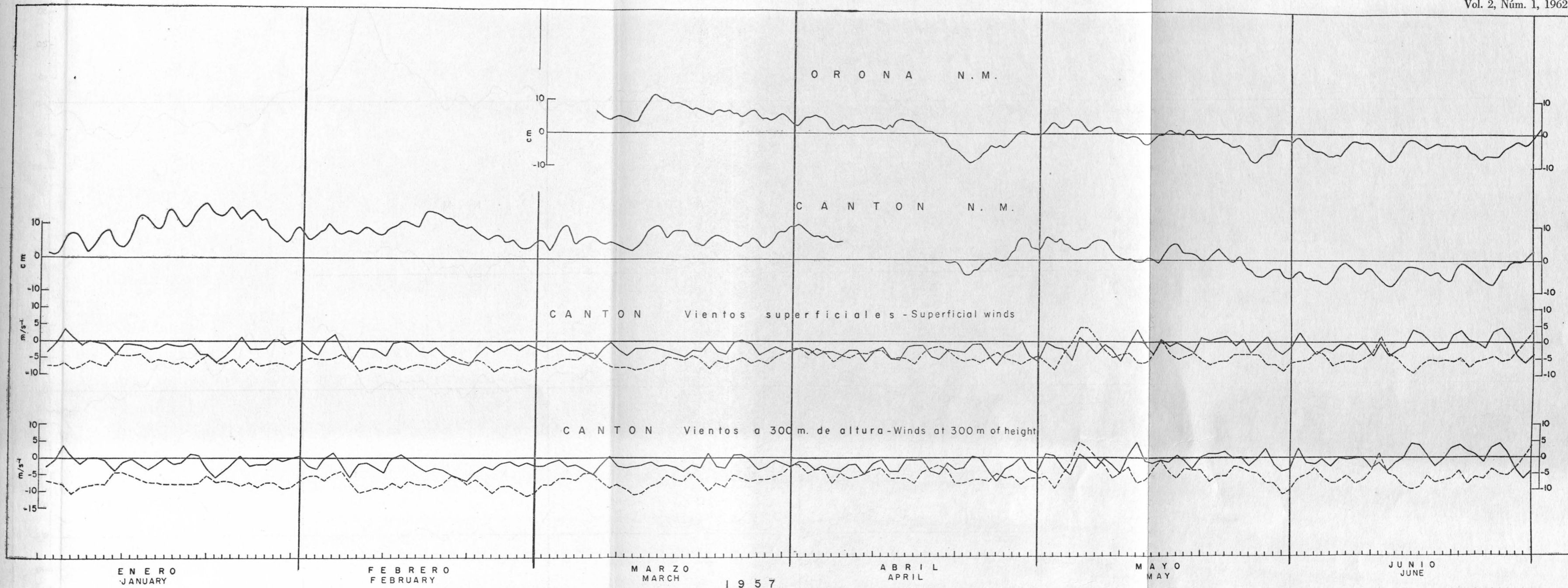


Fig. 3a

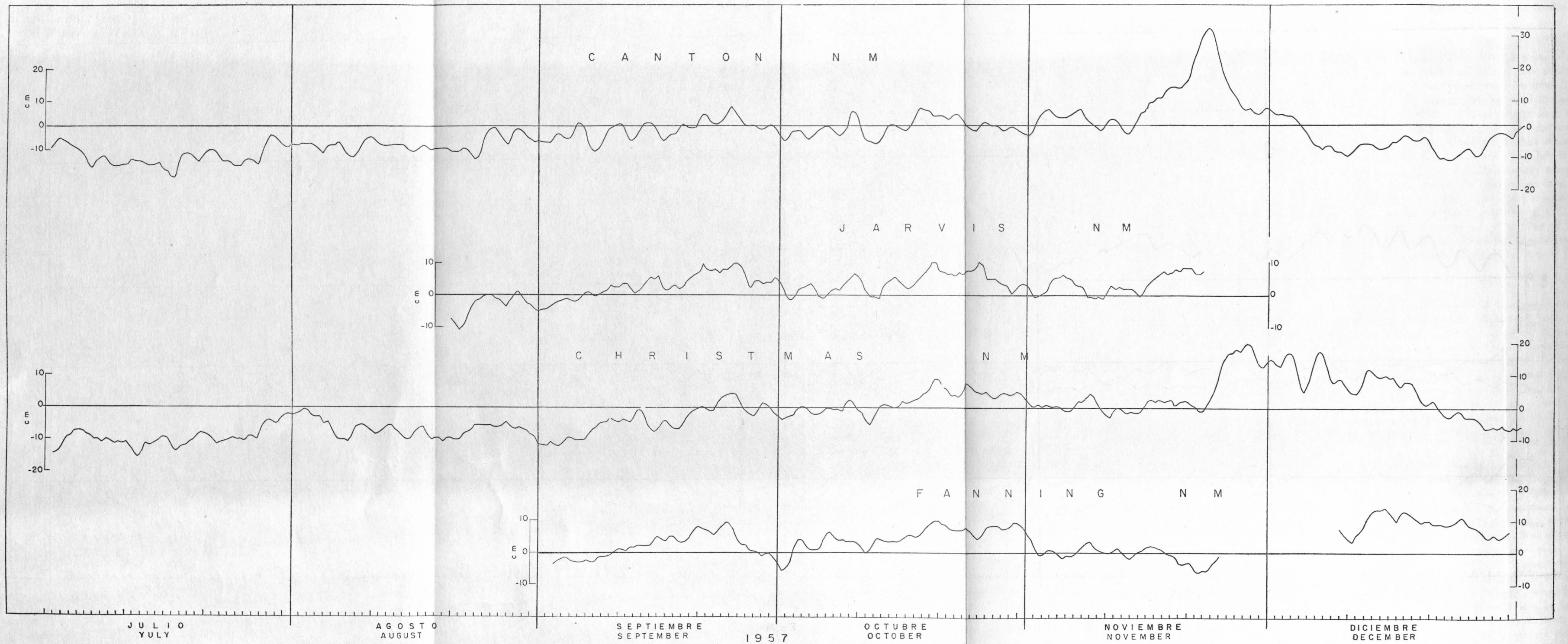


Fig. 3b

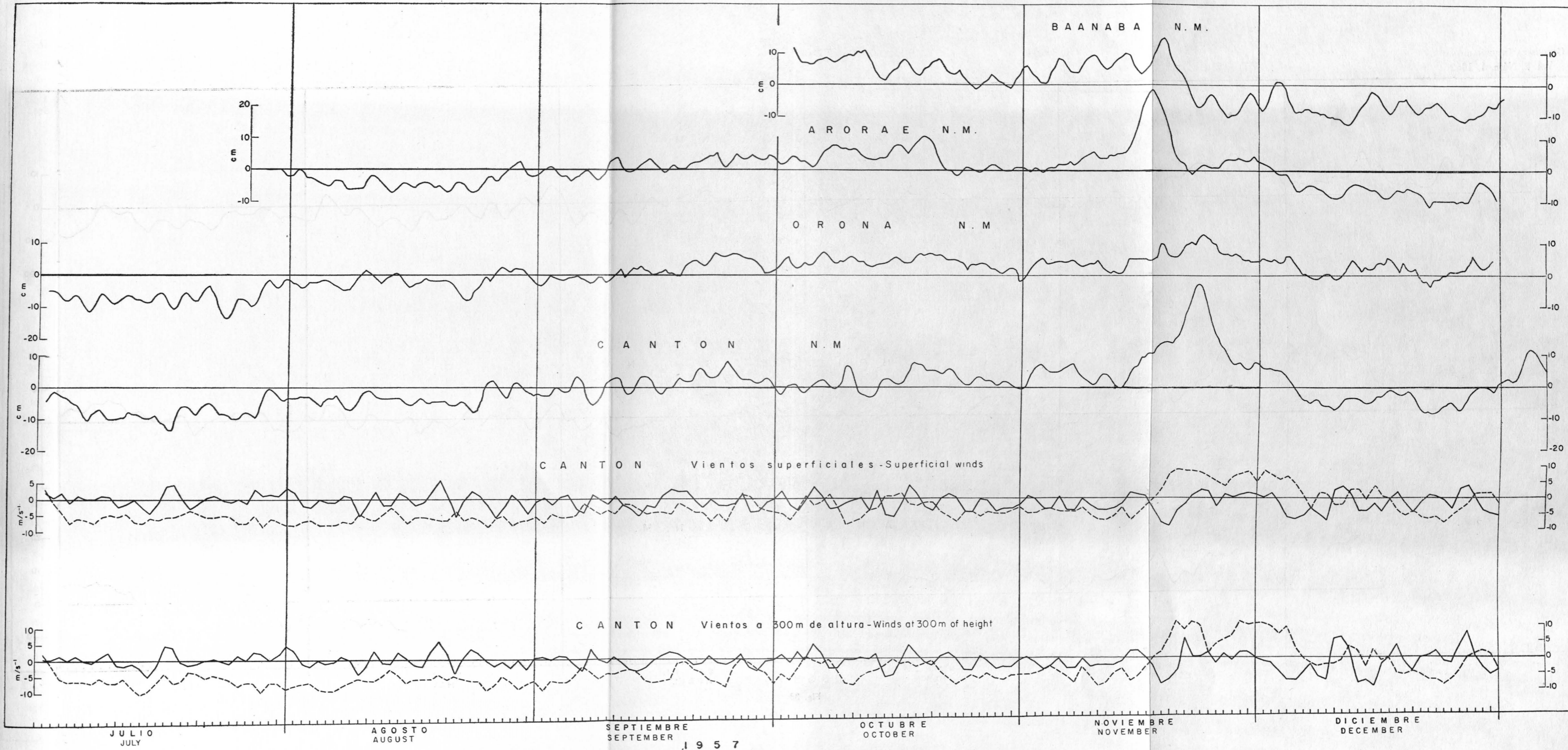


Fig. 3c

1957

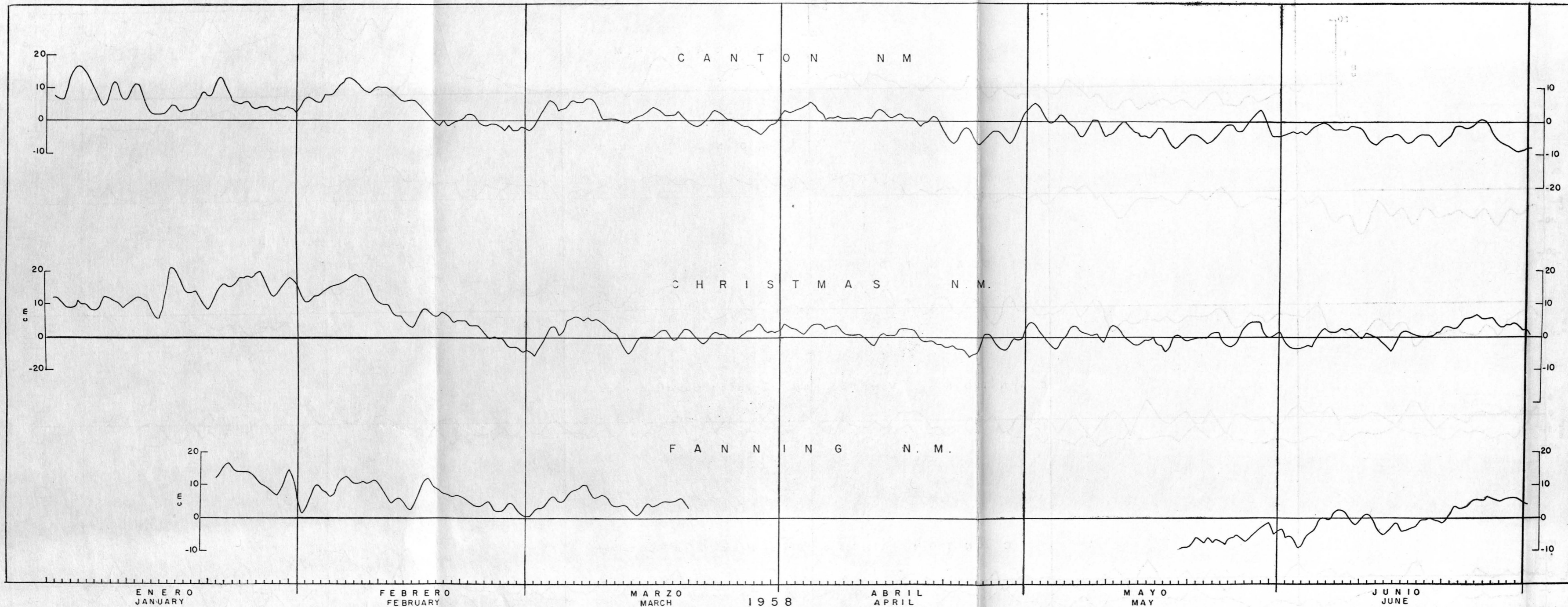


Fig. 3d

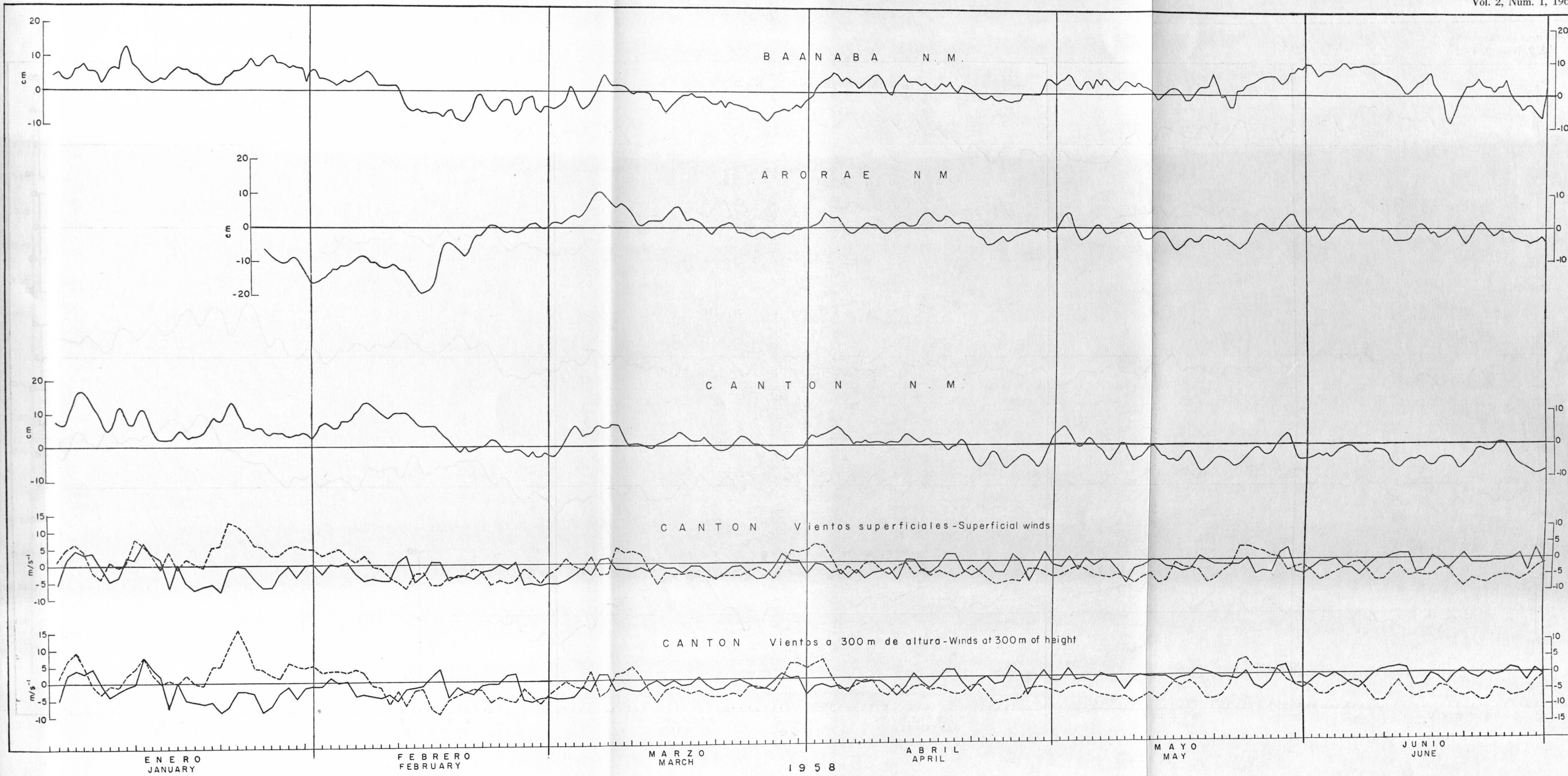
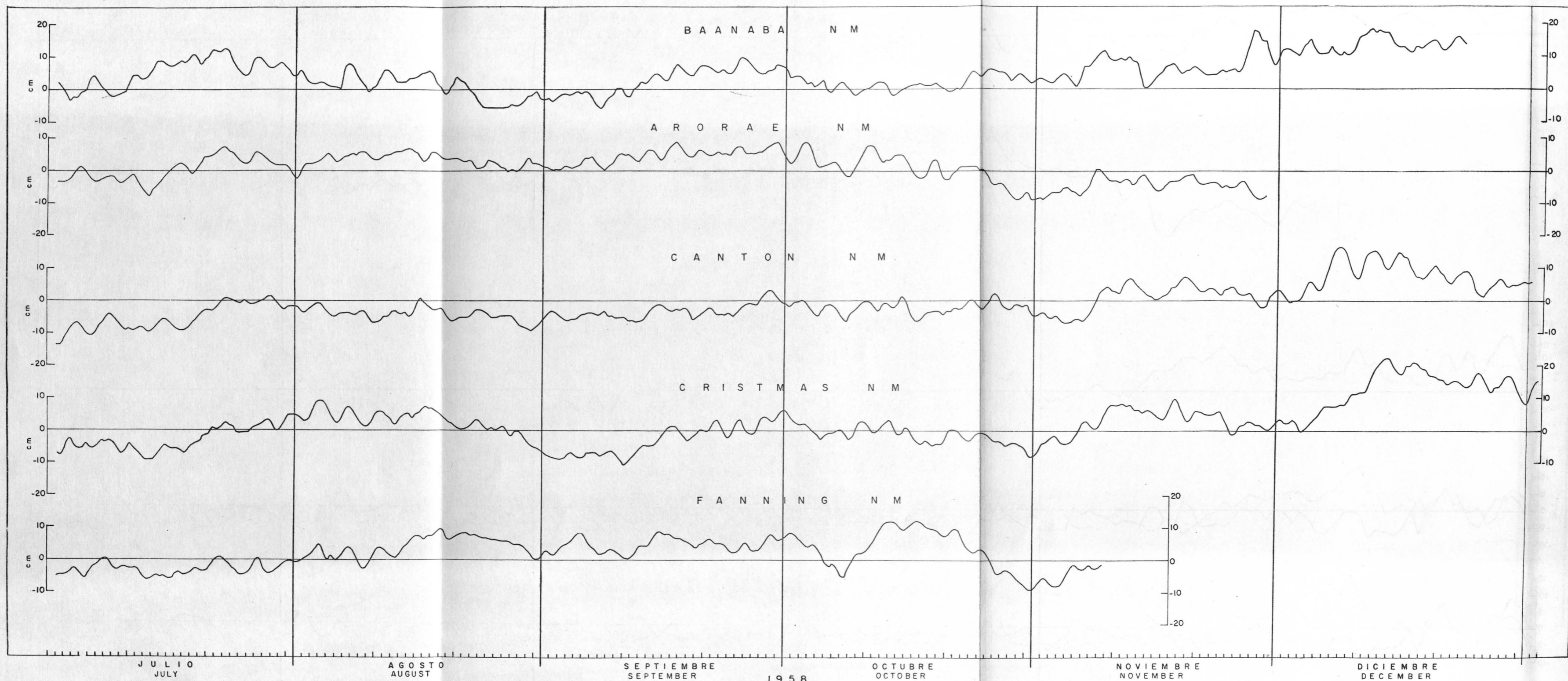


Fig. 3e



1958
Fig. 3f

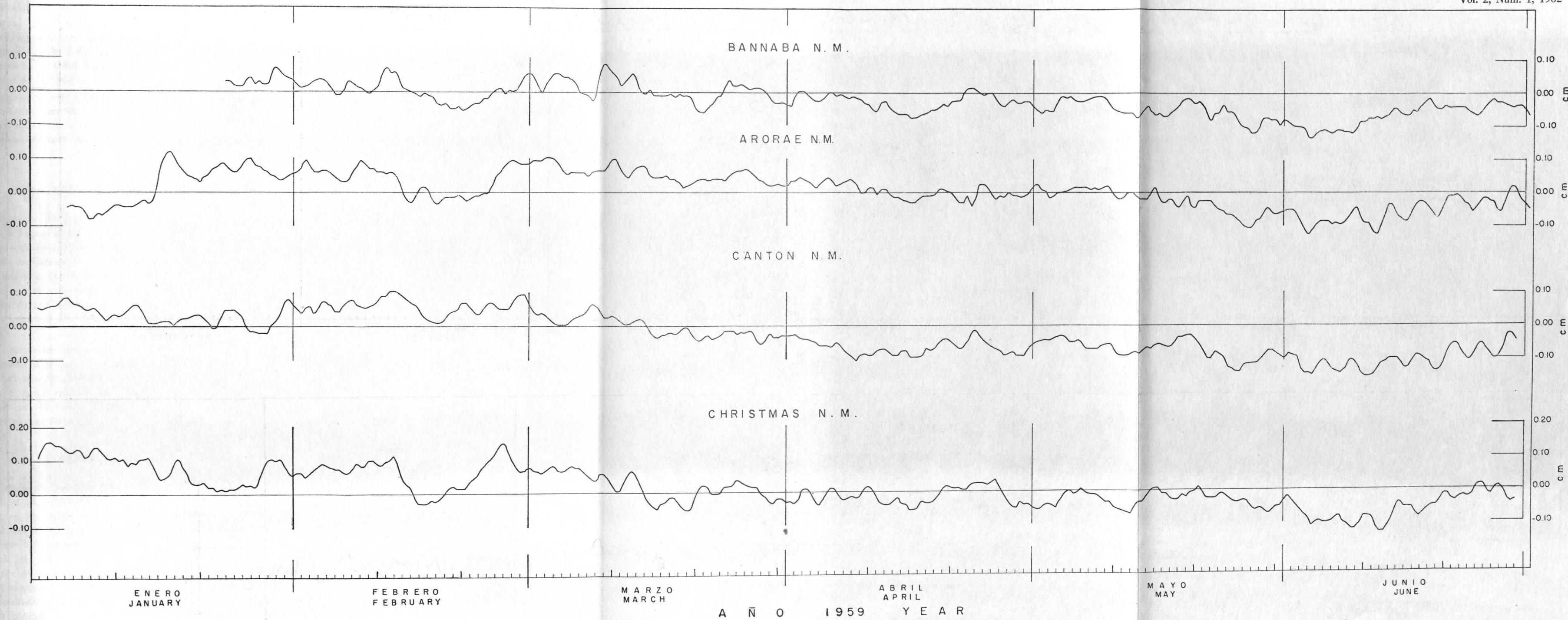
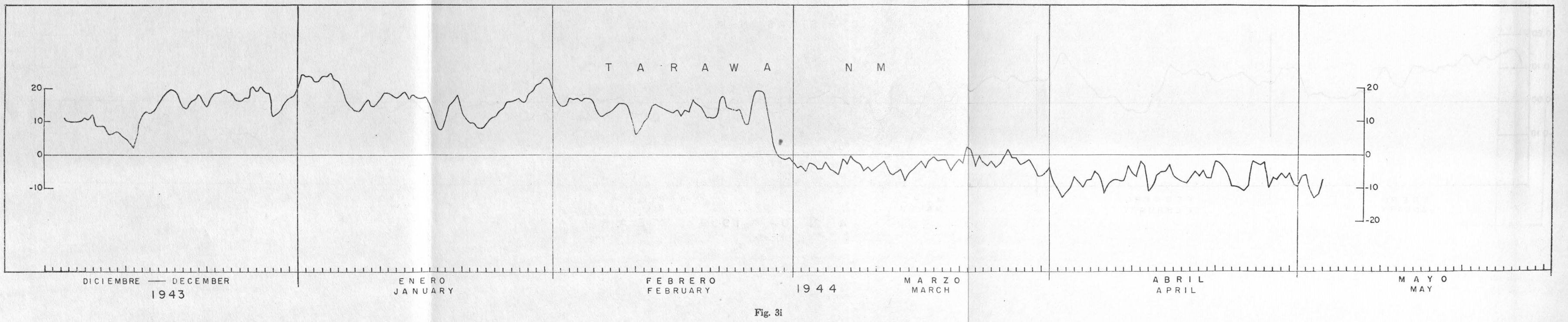
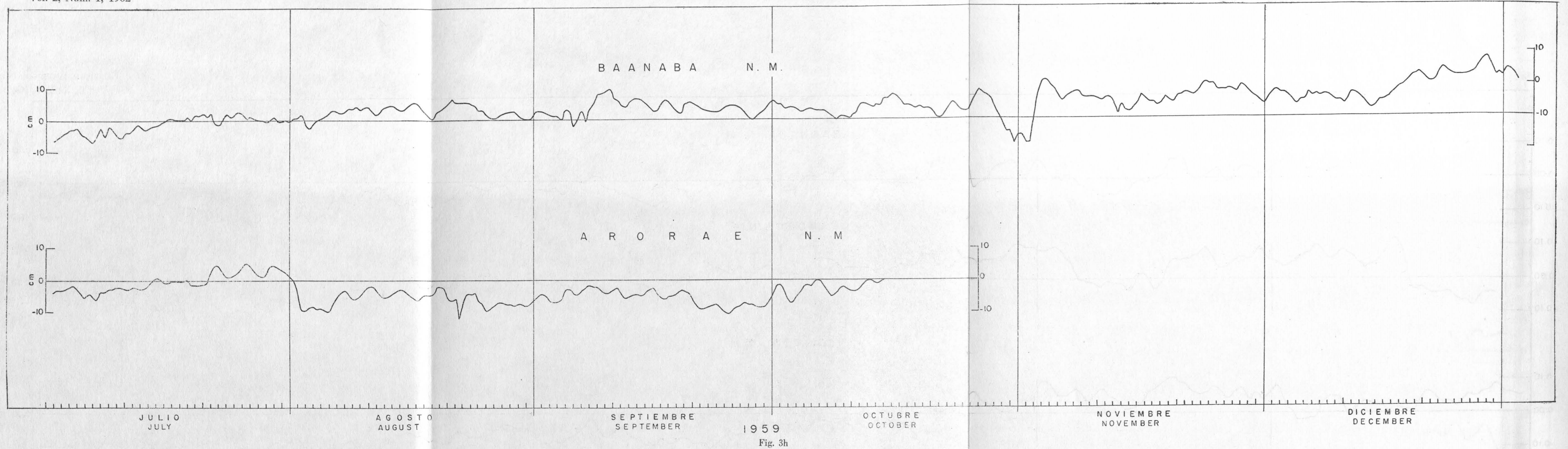


Fig. 3g



ción entre la ocurrencia del viento monzónico y el aumento en la actividad de cuatro días en Baanaba. La actividad de cuatro días en Arorae por lo regular no sobresale mucho sobre el ruido del fondo, pero cuando lo hace hay una sorprendente correlación con las crestas y valles de cuatro días en Canton, por ejemplo, durante los meses de Mayo y Junio de 1958 y Junio de 1959. Si aceptamos el movimiento progresivo hacia el oeste de estas ondas, entonces debemos asociar cada cresta de Canton con la *siguiente* cresta de Arorae y ¡no con la que ocurre casi simultáneamente con ella! Hay una gran actividad de cuatro días en Arorae desde mediados de Julio hasta mediados de Octubre de 1959, pero no se tenía registro correspondiente de Canton a la fecha de la publicación de este artículo.

El registro de cinco meses de Tarawa (Fig. 3i) generalmente muestra más alto nivel de ruido que oculta siempre cualquier actividad de cuatro días presente. Debido a que este registro es muy corto no se usó en el análisis estadístico.

LOS REGISTROS DEL VIENTO

Unicamente los registros de viento en Canton se ilustran en la Figura 3. La componente oeste a este no muestra ninguna relación obvia a ojo con los registros del nivel del mar, aún en Canton. Esta componente generalmente es negativa debido a que el viento usualmente proviene del este y a que el viento alisio es bastante constante. El viraje de dirección de esta componente se encuentra relacionado en algunas ocasiones con mal tiempo y tormentas monzónicas del oeste.

La componente sur a norte muestra generalmente una considerable actividad en el rango de cuatro días. En ocasiones hay una convincente correlación con las crestas aparentes de cuatro días en el nivel del mar, pero en otras ocasiones no. El viento en Arorae tiene aproximadamente las mismas características, pero no se muestra en la Fig. 3.

EL ANALISIS ESTADISTICO

Se analizaron pares de registros por el método de Tukey (Munk *et al.*, 1959; Tukey, 1949; Blackman y Tukey, 1958), en los cuales se hicieron cálculos de densidad espectral de potencia para cada registro; la coherencia y la fase entre los registros se graficaron como función de frecuencia. Las gráficas de la densidad espectral tal como se muestran no se han compensado por medio de la técnica de filtros numéricos para suprimir la marea. La seguridad estadística de estas estimaciones se determina por los *grados de libertad*

activity at Baanaba. The four-day activity at Arorae does not usually stand out markedly against the background, but when it does it appears surprisingly correlated with the four-day crests and troughs at Canton, for example, as during May and June, 1958, and June, 1959. If we are to believe in the westward, progressive nature of these waves, we must think of each Canton crest as having its identity related to the *following* Arorae crest, ¡not the one which occurs about simultaneously with it! There is prominent four-day activity at Arorae during mid-July — mid-October, 1959, but no corresponding Canton record had been obtained by the time this note was published.

The five-month record from Tarawa (Fig. 3i) shows a generally higher noise level which obscures whatever four-day activity is present. This record, being short, was not used in the statistical analyses.

THE WIND RECORDS

Only the wind record at Canton is presented here in Figure 3. The West to East component usually shows no obvious relation, by eye, to the sea-level records, even at Canton. This component is usually negative since the wind is usually from the East, the trade wind being rather steady. The times when this component reverses its direction are sometimes related to bad weather and westerly Monsoon storms.

The South to North component generally shows considerable activity in the four-day range. Sometime it appears convincingly correlated with the quasi four-day crests in sea-level, at other times not. The wind at Arorae has roughly the same characteristics but is not shown in Figure 3.

THE STATISTICAL ANALYSIS

Pairs of records were analyzed by the method of Tukey (Munk *et al.*, 1959; Tukey, 1949; Blackman and Tukey, 1958), in which estimates of power spectral density for each record, coherence and phase between records, are computed as a function of frequency. The spectral density plots as shown have not been compensated for the numerical filtering technique used to kill the tide. The statistical reliability of these estimates is determined by the *degrees of freedom*

$$v = 2N/m$$

donde N es el número de datos en cada registro, m el número de valores discretos de frecuencia para los cuales se

where N is the number of data values in each record, m the number of discreet values of frequency for which the

efectuó el cálculo (número de estimaciones espectrales). Cuanto mayor sea m mejor será la resolución de detalles en el espectro; cuanto mayor sea v mayor será la seguridad en cada estimación.

Las Figuras 4a a 4g muestran los resultados del análisis de Tukey. En todos los casos, U es la componente oeste a este, V es la componente sur a norte y NM significa el nivel del mar (a lo cual llamaremos posteriormente Z). La gráfica superior muestra los dos espectros de potencia. La gráfica central muestra el adelanto de fase de la segunda serie mencionada con relación a la primera. Por ejemplo, en la Figura 4a, si la fase es negativa significa que para esta frecuencia, Z se retrasa con respecto a V por cierto valor entre 0° a 180° . Los límites de seguridad aceptables para fase y coherencia fueron obtenidos por Goodman (1957; ver también Munk *et al.*, 1959, p. 293). En el presente estudio, la incertidumbre en fase es del orden de 25° en todos los casos.

La gráfica inferior muestra la coherencia entre los dos registros como función de la frecuencia. Para cualquier frecuencia dada, una coherencia unitaria significa una perfecta correlación para esa componente, aun cuando puede haber un cambio de fase. Unos registros infinitamente largos no relacionados darían una coherencia igual a cero y registros finitos darían una coherencia al azar, cuyo valor esperado es:

$$\sqrt{2/v}$$

(Tukey, comunicación personal). La línea discontinua en la gráfica de coherencia muestra el valor de:

$$2/\sqrt{v}$$

el cual será excedido casi por un 5% de los valores de coherencia derivados de registros relacionados al azar (Munk *et al.*, 1959, p. 307).

Los registros analizados por este modo fueron tomados de los que se muestran en la Figura 3, con excepción del único espectro de Canton, Figura 5, para el cual se usaron diez años de datos. Se analizaron muchos pares de registros y una cierta variable puede repetirse si está en pareja con otras diversas variables. Si la gráfica de su densidad espectral aparece un poco diferente en cada caso, se debe a que el período de los análisis está cambiado para cada miembro del par de igual longitud.

VIENTO Y NIVEL DEL MAR EN CANTON. (Figs. 4a y 4b). Los espectros del viento para U y V (y los vientos superiores U' y V') aparecen casi lisos en la vecindad de 0.25

calculation is made (number of spectral estimates). The larger the m the better the resolution of detail in the spectra; the larger v the greater the reliability of each estimate.

Figures 4a through 4g show the results of the Tukey analysis. In all cases, U means West to East wind component, V means South to North wind component, and NM means sea level (which we shall subsequently call Z). The upper graph shows the two power spectra. The middle graph shows the phase lead of the second named series relative to the first. For example, in Figure 4a, if the phase is negative it means that for that frequency Z lags behind V by an amount between 0° and 180° . Confidence limits for phase and coherence have been worked out by Goodman (1957; see also Munk *et al.*, 1959, p. 293). In the present study the uncertainty in phase is on the order of 25° in all cases.

The lower graph shows the coherence between the two records as a function of the frequency. For any given frequency a coherence of unity means perfect correlation for that component even though there may be a phase shift. Infinitely long, unrelated records would give coherence of zero, and finite records will give random coherence whose expected value is about

(Tukey, personal communication). The dashed line on the coherence plots show the value

which will be exceeded by approximately 5% of the coherence values derived from randomly related records (Munk *et al.*, 1959, p. 307).

The records analyzed in this way were all taken from those shown in Figure 3, with the exception of the single Canton spectrum, Figure 5, for which ten years of data were used. Many pairs of records are analyzed, and a certain variable may be repeated as it is paired with one, then another different variable. If the graph of its spectral density appears slightly different in each case, this is because the period of the analyses is changed to make each member of the pair of identical length.

WIND AND SEA LEVEL AT CANTON (Figures 4a and 4b). The wind spectra for both U and V (and the upper winds U' and V') appear almost flat in the vicinity of 0.25 cycles

Fig. 4a. — 4g. Resultados del análisis estadístico de pares de registros por el método de Tukey. La figura superior muestra el espectro de densidad potencial para cada registro. La figura central muestra el adelanto de fase del segundo registro (cuyo espectro es la curva discontinua) con relación al primer registro (cuyo espectro es la línea continua). La figura inferior muestra la coherencia. La línea horizontal da una aproximación de límites de confianza del 95% para la coherencia. Todo está en función de la frecuencia.

Figs. 4a. — 4g. Results of statistical analyses of paired records by Tukey method. The top figure shows spectral power density of each record. The middle figure shows the phase lead of the second record (whose spectrum is the dashed curve above) relative to the first record (whose spectrum is the solid curve). The bottom figures show the coherence. The horizontal dashed line gives an approximate 95% confidence limit for coherence. Everything is function of frequency.

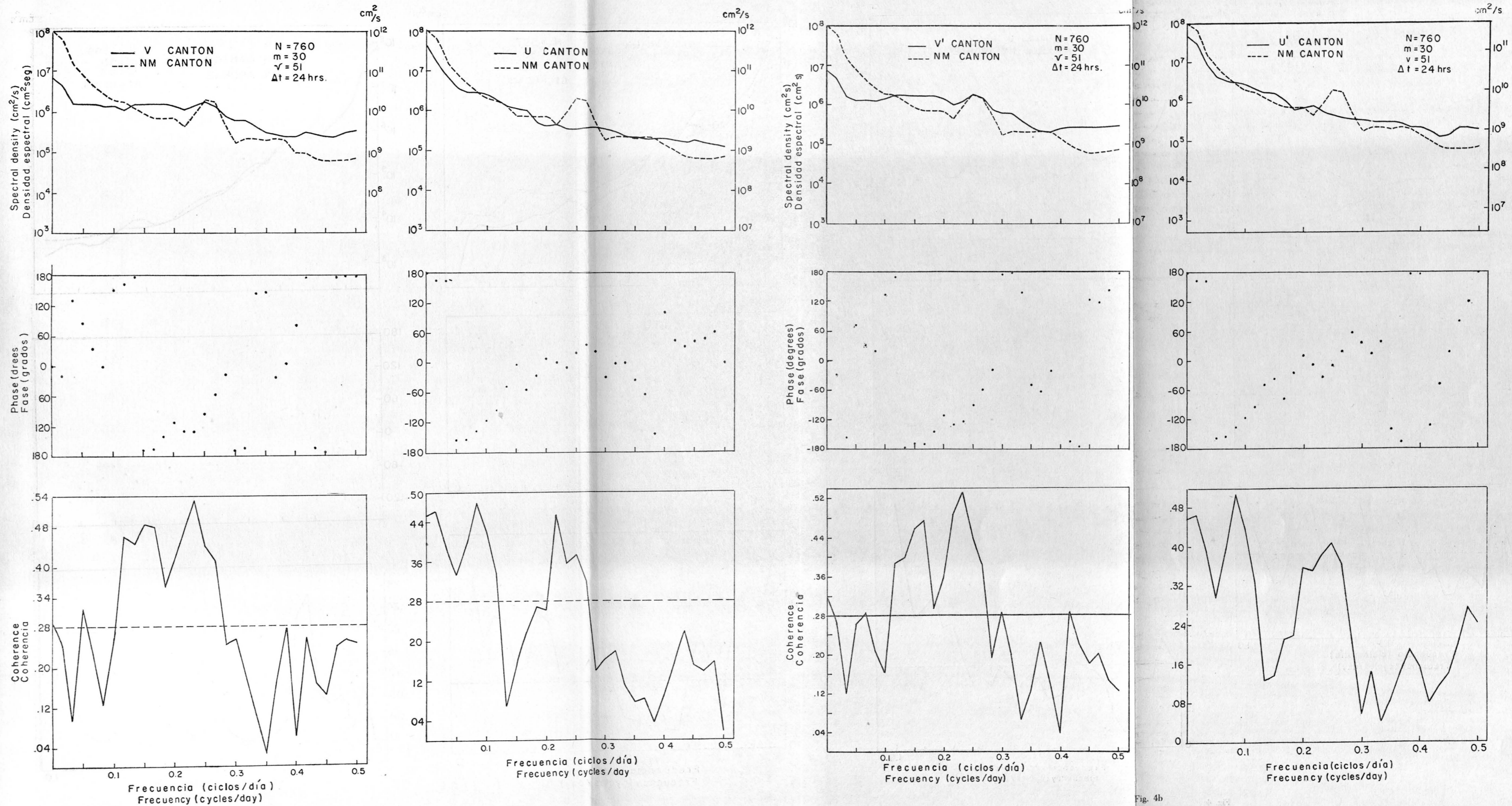


Fig. 4a

Fig. 4b

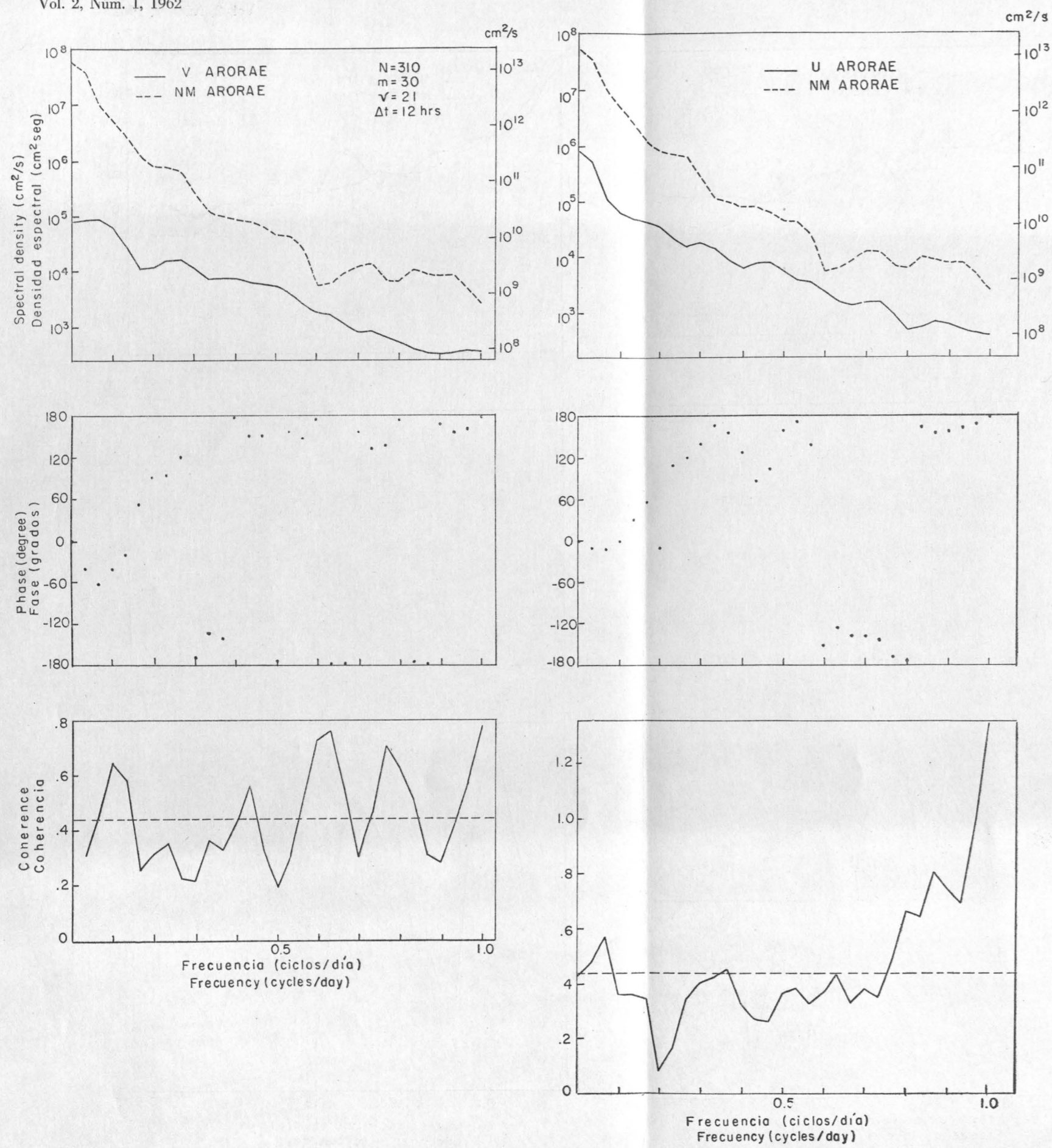


Fig. 4c

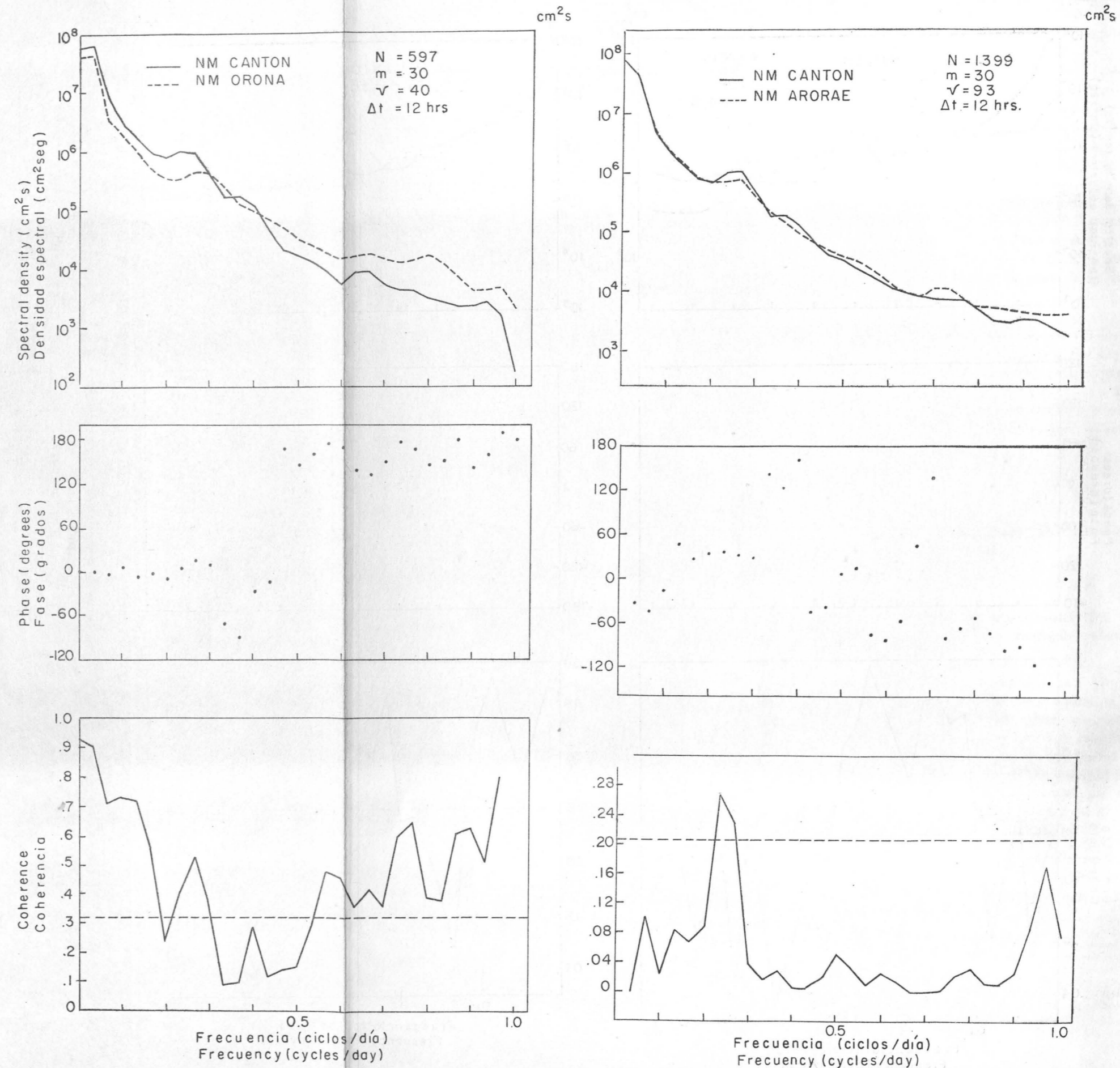


Fig. 4d

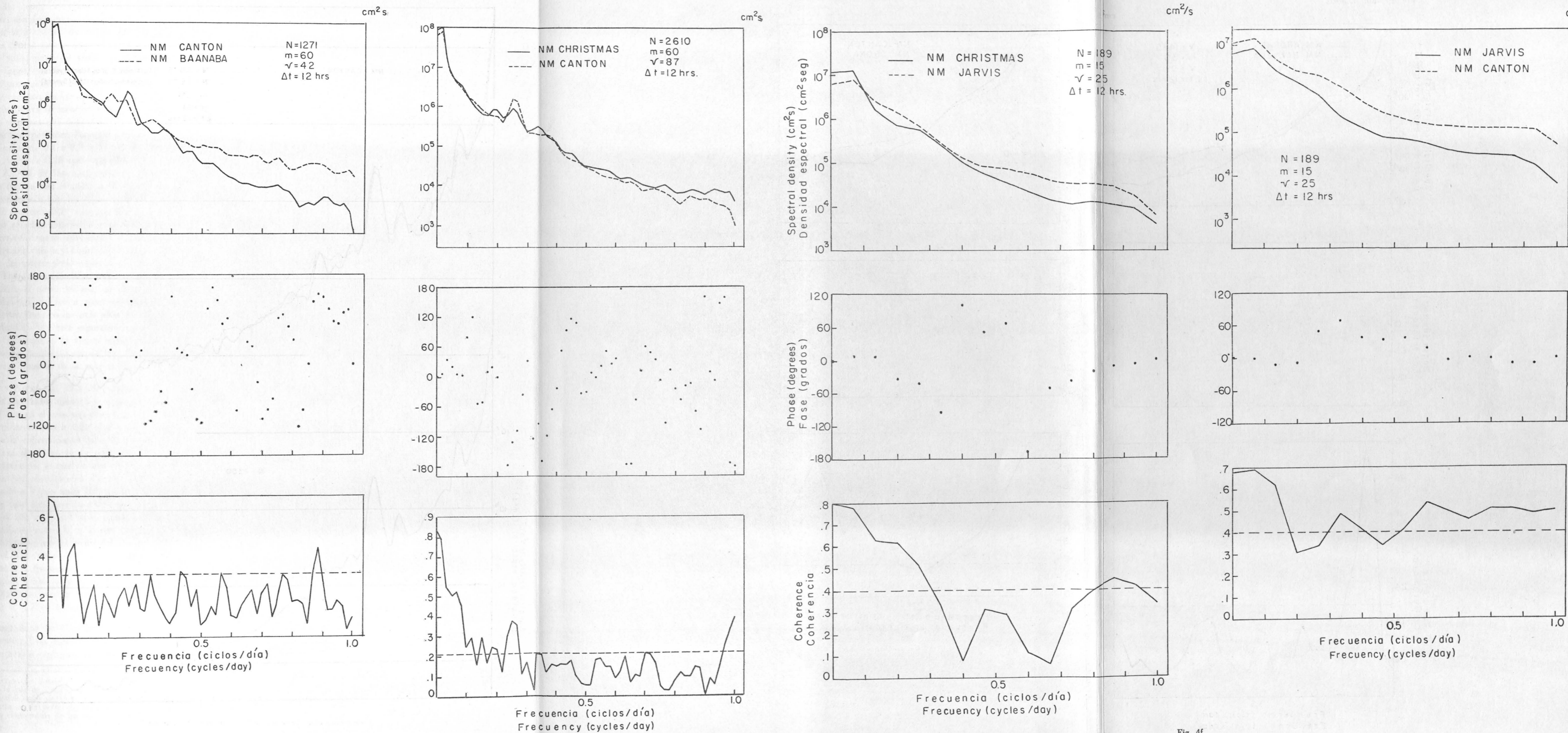


Fig. 4e

Fig. 4f

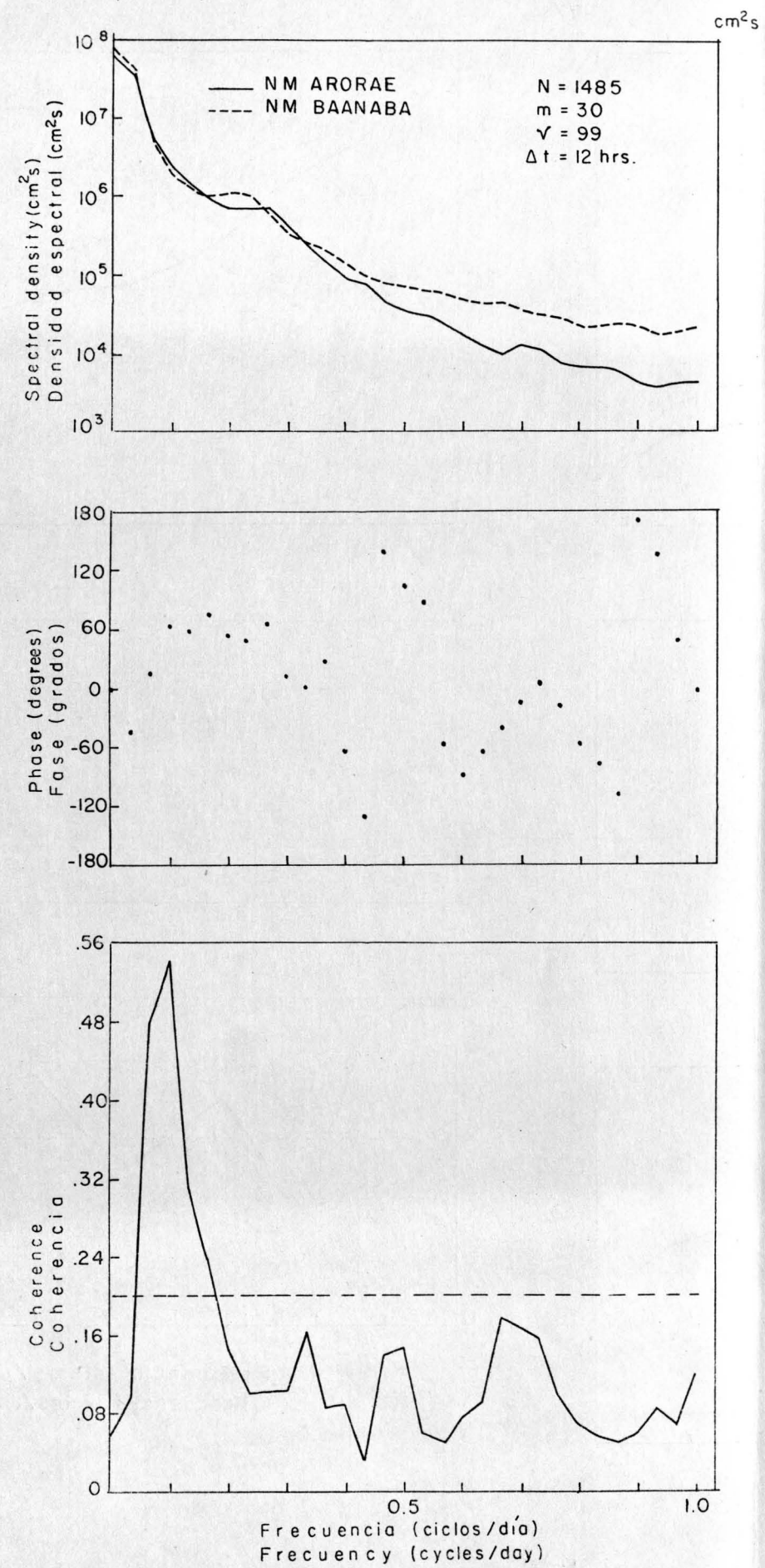


Fig. 4g

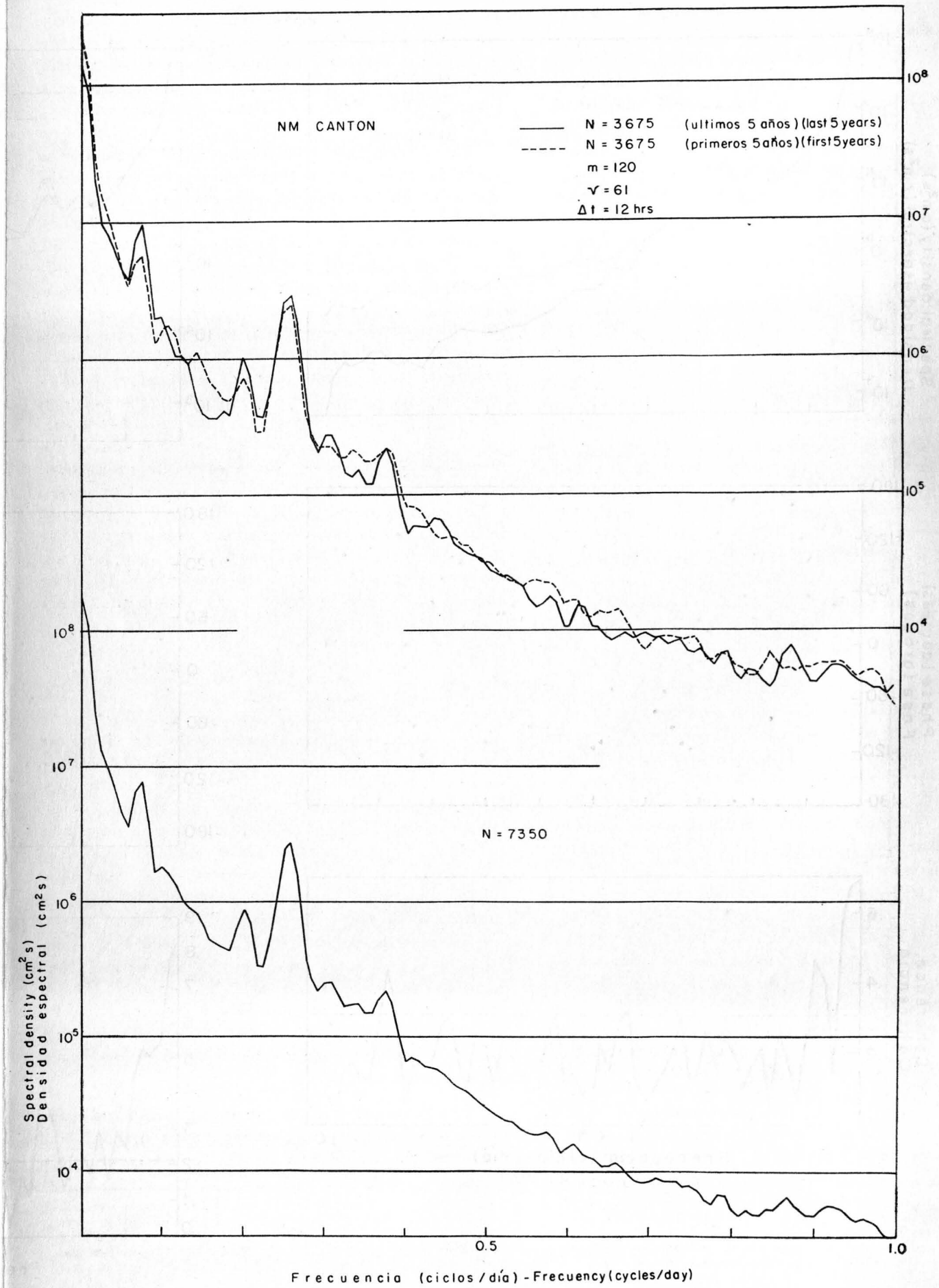
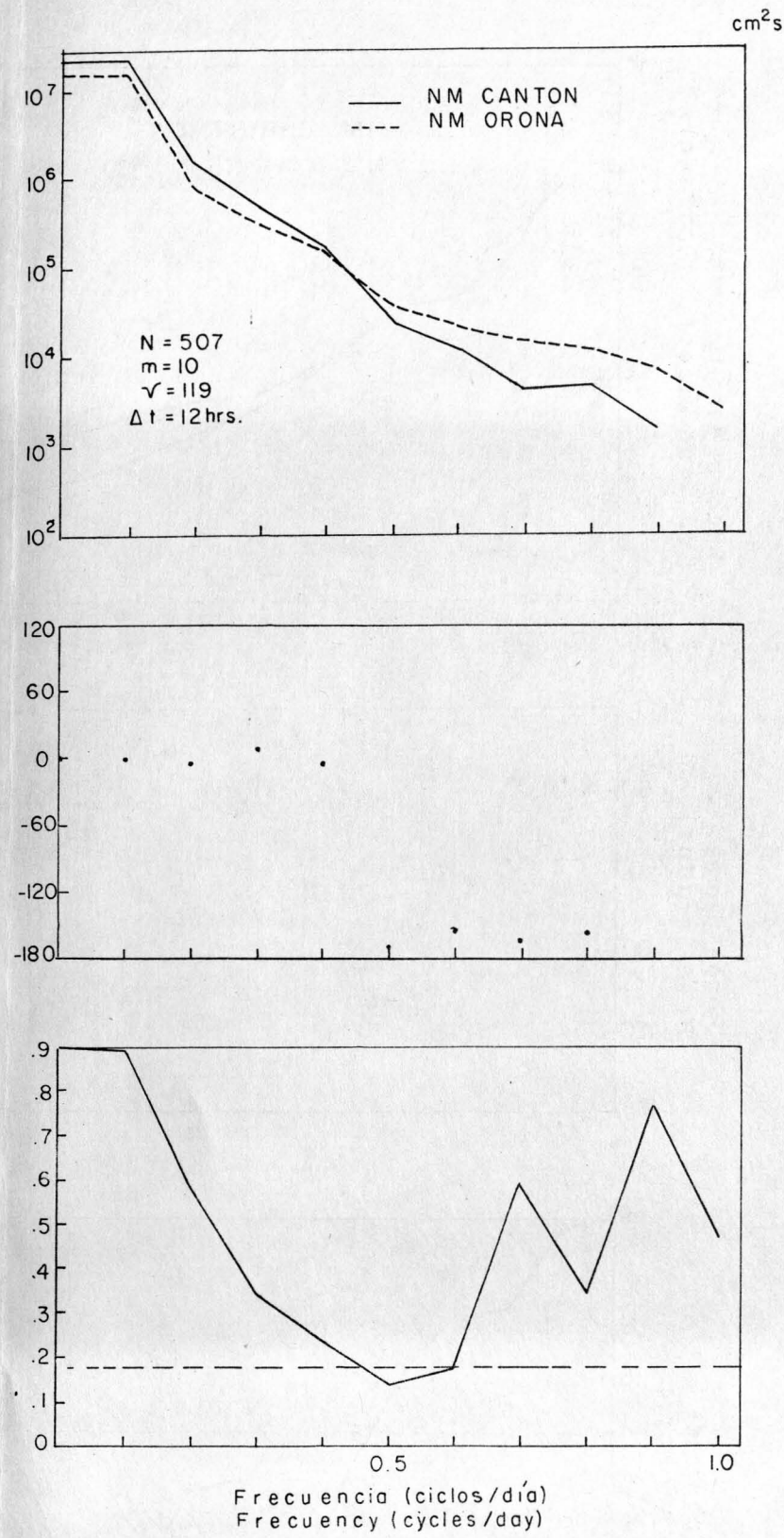


Fig. 5

ciclos por día (cpd), en tanto que el nivel del mar tiene un pico para esa frecuencia. Es muy difícil interpretar este aumento en la actividad de cuatro días en el océano. El resultado es casi el mismo que para el caso de una función forzada de ruido puro (el viento) actuando sobre un sistema (el océano) que tiene un período libre de cuatro días.

El nivel general de coherencia para todas las frecuencias es casi el mismo para los vientos superficiales y para los vientos superiores. Para frecuencias menores de 0.1 cpd (ciclos por día) o mayores que 0.3 cpd, V y Z parecen no estar relacionadas sino por azar. Hay una coherencia significativa para frecuencias de 0.1 a 0.3 cpd, con picos de coherencia justamente cerca de 0.25 cpd, coincidiendo con el pico espectral en Z. Ahí, la fase está entre -90° y -120° ; es decir, Z se retrasa con respecto a V de 90° a 120° . Esto está en discrepancia con los datos de la Fig. 1, donde V precede a Z por unos 30° (Groves, 1956). La componente U tiene una relación estadística muy diferente a la V, ya que hay una coherencia significativa con Z para bajas frecuencias al subir casi a 0.1 cpd. Esto sugiere un efecto en gran escala del viento alisio sobre el sistema de la corriente ecuatorial. Los valores de fase están esparcidos poco más o menos 180° , el nivel del mar se eleva al intensificarse el viento alisio. U vuelve a tener correlación significativa con Z a ciertas frecuencias más altas localizadas cerca de 0.25 cpd. Aquí la fase está esparcida cerca de 0° , el nivel del mar es alto cuando el viento alisio es débil. Hay una transición suave de los valores de fase, la cual permite confiar en la significancia de la coherencia.

VIENTO Y NIVEL DEL MAR EN ARORAE. (Fig. 4c). Aquí los registros analizados tienen únicamente una cuarta parte de longitud que en el caso anterior. No obstante, se pueden ver picos rudimentarios a 0.25 cpd en los espectros de V y Z aunque la coherencia es baja. La relación entre V y Z casi alcanza significancia en cualquier lugar en toda la gama de frecuencia, lo cual es algo dudoso. Los valores de fase resultan muy consistentes. Para la actividad de cuatro días Z precede a V por unos 70° a 145° . Para frecuencias más altas la fase está casi en 180° ; el viento del norte se asocia con el alto nivel del mar, como en Canton.

Las relaciones entre U y Z son todo lo contrario de Canton. En Arorae, un aumento del viento alisio está asociado con el bajo nivel del mar en altas frecuencias. La alta coherencia a frecuencias cercanas a un cpd no significa demasiado debido a la gran atenuación por prefiltración. Al igual que para la actividad de cuatro días la relación entre U y Z es incierta.

NIVEL DEL MAR EN CANTON Y ORONA (Fig. 4d). La densidad espectral no muestra picos importantes cerca de 0.25 cpd en ambos registros. La coherencia es muy signifi-

per day (cpd), while sea level has a peak there. It is very difficult to interpret this enhancement of four-day activity in the ocean. The result is almost the same as for the case of a white noise forcing function (the wind) acting on a system (the ocean) having a free period of four days.

The general level of coherence at all frequencies is about the same for surface winds as for the upper winds. For frequencies less than 0.1 cpd (cycles per day) or more than 0.3 cpd V and Z appear to be no more than randomly related. There is significant coherence for frequencies 0.1 to 0.3 cpd. with peak coherence at just about 0.25 cpd. coinciding with the spectral peak in Z. There, the phase is between -90° and -120° ; i.e., Z lags behind V by 90° to 120° . This disagrees with the earlier Figure 1 data, where V leads Z by about 30° (Groves, 1956). The U component has a greatly different statistical relationship than does V, in that there is significant coherence with Z for low frequencies up to about 0.1 cpd. This is suggestive for a large scale effect of the trade wind on the equatorial current system. The phase values are scattered about 180° ; sea level rises as the trade wind intensifies. U is again significantly correlated with Z at somewhat higher frequencies centered near 0.25 cpd. Here the phase is scattered about 0° ; sea level is high when the trade wind is weak. There is a smooth transition of the phase values, which gives credence to the significance of the coherence.

WIND AND SEA LEVEL AT ARORAE (Figure 4c). Here the records analyzed are only about a fourth as long as in the previous case. Still, rudimentary peaks at 0.25 cpd can be seen on both the V and Z spectra though the coherence is low. The relationship between V and Z is on the verge of significance elsewhere throughout the frequency range, which is somewhat puzzling. The phase appear remarkably consistent. For the four-day activity Z leads V by about 70° to 145° . At higher frequencies the phase is just about 180° : wind from the north is associated with high sea level, as at Canton.

The relationship between U and Z is just about the opposite as at Canton. At Arorae, an enhanced trade wind is related to lower sea level at high frequencies. The tremendous coherence at frequencies near one cpd is not too meaningful in view of the great attenuation by prefiltering. As for the four-day activity the relation between U and Z is dubious.

SEA LEVEL AT CANTON AND Orona (Figure 4d). The spectral density shows no significant peak near 0.25 cpd on either record. The coherence is very significant at low

Fig. 5. Espectros de densidad potencial del nivel del mar de diez años en la Isla de Cantón por el método Tukey. El registro se dividió en dos series de cinco años, cuyos espectros están registrados juntos en la parte superior de la figura. El espectro inferior es el promedio de los dos espectros de cinco años.

Fig. 5. Spectral power density of ten years of Canton sea-level data by Tukey method. The record was divided into two five-year series whose spectra are plotted together at top of figure. The spectrum at bottom is the average of the two five-year spectra.

cante en bajas frecuencias y la fase es cero; pequeños cambios en el nivel del mar ocurren simultáneamente. Separadamente hay un tipo de coherencia a 0.25 cpd, es decir, la actividad de cuatro días está mejor correlacionada que la actividad a frecuencias algo más bajas. Esto vuelve a sugerir que la actividad de cuatro días es un fenómeno diverso o que tiene un mecanismo diferente al "ruido de fondo". Aquí la fase es como de 14° ; si es verdad, significa que las crestas de cuatro días llegarían un poco antes a Orona que a Canton, pero estos valores tal vez no son muy diferentes de cero. Entre 0.3 y 0.5 cpd los registros parecen no ser mejores que las correlaciones al azar. Cerca de 0.5 cpd hay una mejor coherencia con el incremento de la frecuencia, aunque la densidad espectral sea muy baja (habiendo sido fuertemente atenuada por la aplicación de filtros antes del análisis). La fase aparece muy constante en esta región. En una primera aproximación los valores de fase están agrupados cerca de 180° e indican una relación inversa; Canton está alta cuando Orona está baja. Este resultado es completamente inesperado. Sin embargo, los valores de fase realmente se agrupan más cerca de 160° que de 180° y esta diferencia está casi cerca de la verdad. Eso significaría que cada componente se encuentra desplazada en tiempo (Canton con relación a Orona) por una cantidad proporcional a su período, siendo ello difícil de explicar.

El análisis se repitió (Fig. 4g) con una menor resolución y una mayor precisión, pero ninguna otra información fue obtenida con ello.

NIVEL DEL MAR EN CANTON Y ARORAE (Fig. 4d). Una débil semblanza de pico ocurre en 0.25 cpd en ambos espectros. Sin embargo, lo más notable del resultado es el prominente pico en coherencia para esta frecuencia. Los valores de fase son marcadamente estacionarios cerca de 30° . Las crestas de cuatro días ocurren en Arorae 30° antes que en Canton (o 330° primero en Canton que en Arorae). No hay otra relación significativa en otras frecuencias. Por alguna razón los valores de coherencia para la frecuencia cero no fueron calculados y parece extraño que la coherencia sea mala a bajas frecuencias, en tanto que las componentes de baja frecuencia de los registros del nivel del mar parecen algo relacionadas a simple vista. Es algo raro que la coherencia sea tan baja sobre casi toda la gama de frecuencias. Es aparentemente más baja que los valores esperados de los registros al azar.

NIVEL DEL MAR EN CANTON Y BAANABA (Fig. 4e). El pico de densidad espectral a 0.25 cpd es prominente en Canton y muy oscuro o ausente en Baanaba. La coherencia indica registros relacionados al azar para todas las frecuencias excepto las bajas, así como el esparcimiento de fase. Esto se debe a que Baanaba está muy retirada de Canton o que está fuera de la región de las ondas de cuatro días o ambas cosas.

NIVEL DEL MAR EN CHRISTMAS Y CANTON (Fig. 4e). Christmas tiene un pico débil de densidad espectral a 0.25

frecuencias and the phase is zero; slow sea-level changes occur simultaneously. There is a separate peak of coherence at 0.25 cpd; i. e., the four-day activity is better correlated than is activity at slightly lower frequencies. This is again suggestive that the four-day activity is a separate phenomenon, or that it involves a different mechanism than the "background noise". The phase here is about 14° ; if credible it would mean that the four-day crests arrive slightly sooner at Orona than at Canton, but perhaps this value is not significantly different from zero. From 0.3 to 0.5 cpd the records appear to be no better than randomly correlated. Above 0.5 cpd the coherence becomes significant with increasing frequency even though the spectral density is very low (having been strongly attenuated by the filtering applied before the analysis). The phase appears remarkably constant in this region. To a first approximation the phase values are clustered near 180° and indicate an inverse relationship; Canton is high when Orona is low. This result is completely unexpected. However, the phase values really cluster nearer to 160° than to 180° , and this difference is just on the verge of credibility. It would mean that each component is displaced in time (Canton relative to Orona) by an amount proportional to its period. This is difficult to explain.

The analysis was repeated (Figure 4g) with lower resolution and higher reliability, but no additional information was gained thereby.

SEA LEVEL AT CANTON AND ARORAE (Figure 4d). A weak semblance of a peak at 0.25 cpd occurs on both spectra. However, the most significant feature of the result is the prominent peak in coherence at this frequency. The phase values are remarkably steady, centered near 30° . The four-day crests occur at Arorae 30° before their occurrence at Canton (or at Canton 330° before Arorae). There are no significant relationships at other frequencies. For some reason the coherence value for zero frequency was not calculated, and it seems strange why the coherence is so bad at low frequencies while the low-frequency components of the sea-level records themselves appear somewhat related to the naked eye. It is also puzzling why the coherence is so low over most of the frequency range. It is apparently lower than the expected value from random records.

SEA LEVEL AT CANTON AND BAANABA (Figure 4e). The peak of spectral density at 0.25 cpd is prominent for Canton, very obscure or lacking at Baanaba. The coherence indicates randomly related records for all except the lowest frequencies, as does the phase scatter. Baanaba is either too far from Canton, outside the region of the four-day waves, or both.

SEA LEVEL AT CHRISTMAS AND CANTON (Figure 4e). Christmas has a weak peak of spectral density at 0.25 cpd,

cpd, pero está acompañado por un pico prominente en coherencia. La fase cambia rápidamente en este punto, pero cae aproximadamente entre -90° y -150° ; las crestas de cuatro días ocurren primero en Christmas y casi un día después o más en Canton. Existe la misma alta coherencia y pequeña fase para bajas frecuencias y aparentemente no hay relación significativa en las más altas frecuencias.

NIVEL DEL MAR EN JARVIS (Fig. 4f). Debido a que el registro de Jarvis fue muy corto, resulta imposible obtener una buena resolución en los análisis. Sin embargo, hubiese sido mejor sacrificar un poco la precisión para obtener una mejor resolución y por ello sería conveniente repetir este análisis en el futuro.

Hay una buena relación, casi simultánea, entre Jarvis y Christmas para bajas frecuencias en subida hasta 0.13 cpd. La coherencia no resulta significativa para frecuencias más altas. En la actividad de cuatro días, Christmas está adelante de Jarvis aproximadamente 40° .

La relación entre Jarvis y Canton resulta generalmente directa a través de toda la gama de frecuencias. La actividad de cuatro días tiene una baja resolución y la coherencia es baja. Una información de mayor significado se obtiene correlacionando los registros de Christmas y Canton, ambos bastante más largos que en el registro de Jarvis.

NIVEL DEL MAR EN ARORAE Y BAANABA (Fig. 4g). La coherencia es baja para todo el rango de frecuencias excepto entre 0.05 y 0.18 cpd aproximadamente. Para la actividad de cuatro días la diferencia de fase es más o menos de 60° con una incertidumbre de 40° debido a la mala coherencia. Es dudoso que pudiéramos considerar la actividad de cuatro días en Baanaba como el mismo fenómeno observado en los otros lugares.

DIEZ AÑOS DE REGISTROS DEL NIVEL DEL MAR EN CANTON. El resultado del análisis se muestra en la Fig. 5; no se muestra el registro completo del nivel del mar. Es posible obtener una mejor resolución que en los otros análisis debido a los registros más largos. Comenzando por el extremo de bajas frecuencias lo más notable es una rápida caída de energía con la frecuencia, seguida por un pico prominente cerca de 0.07 cpd. Esta es la marea quincenal que contiene elementos sin resolver. Después de unos cuantos encurvamientos de dudosa significancia hay un pico prominente a 0.20 cpd, el cual es de tomarse en cuenta ya que aparece en las dos curvas para los 5 años antes mencionados y está más arriba de los límites de confianza de 95% permitidos en las variaciones al azar para los puntos adyacentes. El siguiente pico, el más grande y prominente de la gráfica, está cerca de 0.26 cpd y representa "la actividad de cuatro días" previamente notada. La significancia de los siguientes dos picos es dudosa, pero el más cercano a 0.37 cpd resulta un poco más prominente en ambas curvas de 5 años aunque no excede el límite de confianza de 95% permitido. De todos estos rasgos interesantes, lo único co-

but this is accompanied by a prominent peak in coherence. The phase is rapidly changing at this point but lies between approximately -90° and -150° ; the four-day crests occur first at Christmas and about a day or so later at Canton. There is the usual high coherence and small phase for low frequencies, and apparently no significant relationship at the higher frequencies.

SEA LEVEL AT JARVIS (Figure 4f). The record from Jarvis was so short that it was impossible to obtain good resolution in the analyses. However, it would have been better to have sacrificed a little reliability to obtain better resolution, and it may be well to repeat this analysis in the future.

There is a good, almost simultaneous relation between Jarvis and Christmas for low frequencies up to about 0.3 cpd. At higher frequencies the coherence is not significant. For the four-day activity Christmas leads Jarvis by roughly 40° .

The relation between Jarvis and Canton appears generally to be direct throughout the entire frequency range. The four-day activity is not resolved, and the coherence is low. More meaningful information is obtained by correlating the Christmas and Canton records, both of which are a good deal longer than the Jarvis record.

SEA LEVEL AT ARORAE AND BAANABA (Figure 4g). The coherence is low everywhere except between 0.05 and 0.18 cpd, approximately. For the four-day activity the phase difference is about 60° with a 40° uncertainty due to the poor coherence. It is doubtful whether we should consider the four-day activity at Baanaba as the same phenomenon as that observed at the other places.

A TEN-YEAR SEA LEVEL RECORD AT CANTON. The result of the analysis is shown in Figure 5; the entire sea-level record itself is not shown. Much greater resolution is possible than on the other analyses owing to the longer record length. Beginning at the low-frequency end, the first feature is a rapid drop off of energy with frequency followed by a prominent peak at about 0.07 cpd. This is the fortnightly tide, containing many constituents unresolved. After a few wiggles of dubious significance there is a prominent peak at 0.20 cpd which looks quite credible since it appears on both of the 5-year curves above and stands higher than the 95% confidence limits on random variation for the neighboring points. The following peak, the largest and most prominent feature on the graph, is centered near 0.26 cpd and represents the "four-day activity" previously noted. The significance of the next two peaks is doubtful, but the one near 0.37 cpd looks suspiciously prominent on both the 5-year curves, but does not exceed the 95% confidence limits. Of all these interesting features the only thing now

nocido es que el pico de 0.07 cpd es marea mientras que el pico de 0.26 cpd está de algún modo relacionado con el viento.

Sería de gran interés saber con certeza si los cortos registros tomados durante el AGI fueron representativos de sus correspondientes observatorios. Si fueron representativos entonces se podría esperar que este largo análisis de Canton fuese esencialmente el mismo que los análisis más cortos de Canton mostrados en las Figuras 4a a 4d. Desgraciadamente, es difícil comparar estos espectros porque el número m de estimaciones espectrales es mucho mayor en este último caso. Puede hacerse una comparación tomando ciertos promedios ponderados en las ordenadas de la densidad espectral para observar cómo se vería el análisis del registro más largo para pequeños valores de m . Esto fue lo que se hizo y aparentemente este largo espectro de Canton no difiere apreciablemente del espectro corto obtenido durante el AGI. Aparentemente estamos tratando con registros representativos de los observatorios del AGI, no obstante el desplazamiento hacia el norte de la región de alta presión del Pacífico, pero sería muy conveniente repetir el análisis de Tukey para el registro largo de Canton con diferentes valores de m .

LA TEORIA DE LAS ONDAS OCEANICAS DE CUATRO DIAS

Uno de los autores (Groves, 1955) trató el tema por medio de un simple modelo matemático de ondas largas forzadas donde el parámetro de Coriolis varía linealmente con la distancia desde el ecuador, esperando explicar el aumento de la actividad de cuatro días en el nivel del mar en función de algún fenómeno de resonancia. No fue encontrada resonancia alguna en el rango apropiado de valores y los esfuerzos del viento requeridos para producir la amplitud observada en la oscilación de cuatro días en el nivel del mar eran grandes por órdenes de magnitud.

Ichiye (1959) investigó el movimiento de onda en el agua causada por un sistema de viento que sopla hacia el oeste a lo largo del ecuador en un océano de dos capas. El modelo de distribución del esfuerzo de viento sobre el agua está basado en las dimensiones conocidas de la onda del este en los vientos alisios (Palmer, 1952), excepto para la distribución en la dirección norte-sur. Aquí la parte variable del esfuerzo del viento y movimiento de la onda fue sinusoidalmente en la dirección de y (norte-sur) en lugar de concentrada cerca del ecuador, ya que se sabe que la onda ecuatorial es producida por el viento, así como que sus resultados pueden ser dudosos si se aplicaran a las ondas ecuatoriales. Ichiye encontró posibilidades de resonancia para (a) ondas barotrópicas de tipo planetario y también para (b) ondas gravitacionales-inerciales del tipo baroclínico (internas), considerando lo último como más probable. Ichiye también encuentra una línea nodal de la superficie del mar a lo largo del ecuador para el caso en que el campo de divergencia del viento se tomara anti-

known is that the 0.07 cpd peak is tide while the 0.26 cpd peak is somehow related to the wind.

It would be of great interest to be able to ascertain if the shorter records taken during IGY were representative of each respective observatory. If they were representative then it would be expected that this long Canton analysis would be essentially the same as the shorter Canton analyses shown in Figures 4a to 4d. Unfortunately, it is difficult to compare these spectra because the number m of spectral estimates is considerably greater in this last case. A comparison can be made by taking certain weighted averages of the spectral density ordinates to see how the analysis of the longer record would have looked for a smaller m value. This was done, and apparently this long Canton spectrum does not differ appreciably from the shorter IGY spectra. Apparently we are dealing with representative records from the IGY observatories in spite of the displaced North Pacific High, but it would be very advisable to actually repeat the Tukey analysis of the long Canton record with different m values.

THEORY OF THE FOUR-DAY OCEAN WAVE

One of the authors (Groves, 1955) looked at a simple mathematical model of long, forced waves, in which the Coriolis parameter varied linearly with distance from the equator, hoping to explain the enhancement of four-day sea-level activity in terms of some resonance phenomenon. No resonance in the appropriate range of values was found, and the wind stresses required to produce the observed amplitude of the four-day sea-level oscillation were too big by orders of magnitude.

Ichiye (1959) investigated the water wave motion caused by a progressive wind pattern moving westward along the equator in a two-layer ocean. The model of wind stress distribution over the water is based on the known dimensions of the easterly wave in the trade winds (Palmer, 1952), except for its distribution in the north-south direction. Here the variable part of the wind stress and wave motion were taken sinusoidal in the y direction (north-south) instead of concentrated near the equator as the equatorial wind wave is known to be, so that his results may be doubtful as applied to equatorial waves. Ichiye found possibilities for resonance for (a) planetary type barotropic waves, and also for (b) inertia-gravitational type baroclinic (internal) waves. He thought the latter were more likely. Ichiye also finds a nodal line of the sea surface along the equator for the case where the field of wind divergence is taken antisymmetrical about the equator

semétricamente con respecto al ecuador (lo cual parece razonable de acuerdo con los diagramas de Palmer, 1952).

(which seems reasonable according to Palmer's (1952) diagram).

DISCUSION

Consideremos primero únicamente la actividad de cuatro días y postulemos una onda forzada viajando hacia el oeste en el océano y veamos si esto es consistente con los datos. Considérense antes las relaciones de fase Z entre las diferentes islas. Si hay una línea nodal a lo largo del ecuador, la mejor prueba estaría en las Islas Line: Jarvis estaría aproximadamente 180° fuera de fase con respecto a Christmas y Fanning y con mucha más baja actividad. El registro de Jarvis es desgraciadamente corto, siendo únicamente de tres meses. El análisis de Tukey sugiere que la Z para Christmas precede a la Z para Jarvis por aproximadamente 40°. Como en la propagación hacia el oeste, vamos a suponer una onda de 15° (según Palmer, 1952). Esto daría elevaciones con las siguientes relaciones de fase:

DISCUSSION

Let us first consider only the four-day activity and hypothesize a westward-travelling forced wave in the ocean and see if this is consistent with the data. Consider first the phase relations between Z at the various islands. If there is a nodal line along the equator, the best direct test would be in the Line Islands: Jarvis should be approximately 180° less active. The Jarvis record is unfortunately short, being out of phase with Christmas and Fanning, and considerably only three months long. The Tukey analysis suggests that Christmas Z leads Jarvis Z by about 40°. As to the westward propagation, let us hypothesize a wavelength of 15° (after Palmer, 1952). This would give rise to the following phase relations:

				sin nodo — no node	con nodo — with node	observado — observed
Christmas	precede a leads	Jarvis	por by	45°	225°	15°— 65°
Christmas	precede a leads	Canton	por by	340°	160°	90°—150°
Canton	precede a leads	Orona	por by	10°	10°	—40°— 10°
Canton	precede a leads	Arorae	por by	270°	270°	350°—365°
Arorae	precede a leads	Baanaba	por by	180°	180°	260°—340°

(con pobre coherencia — with poor coherence)

Los valores de fase Christmas-Canton favorecen al nodo ecuatorial mientras los valores de Christmas-Jarvis favorecen grandemente su ausencia, pero hay una discrepancia en la fase Canton-Arorae en ambos casos. Una mejor rela-

The Christmas-Canton phase values favor the equatorial node while the Christmas-Jarvis values strongly favor its absence, but there is a discrepancy in the Canton-Arorae phase in either case. A somewhat better fit can be obtained

				para for L = 11°		para for L = 11.5°		observado — observed
				sin nodo — no node	con nodo — with node	sin nodo — no node	con nodo — with node	
Christmas	precede a leads	Jarvis	por by	58°	238°	56°	236°	15° — 65°
Christmas	precede a leads	Canton	por by	108°	288°	88°	268°	90° — 150°
Canton	precede a leads	Orona	por by	13°	13°	12°	12°	640° — 10°
Canton	precede a leads	Arorae	por by	6°	6°	351°	351°	305° — 355°
Arorae	precede a leads	Baanaba	por by	245°	245°	235°	235°	260° — 340°

(con pobre coherencia — with poor coherence)

ción puede obtenerse disminuyendo la longitud de onda L de 15° a 11° . Entonces obtendríamos:

Para la longitud de onda de 11° la fase Christmas-Canton concuerda muy bien para el caso sin nodo pero da una pequeña discrepancia en la fase Canton-Arorae. Con una longitud de onda de 11.5° se mejora la fase Canton-Arorae con detrimento en la fase Christmas-Canton. En ambos casos la evidencia favorece a un nodo ecuatorial defectuoso. La pequeña discrepancia en la fase Canton-Orona no es tan mala. Los valores de fase de Baanaba probablemente no deberían ser considerados, aunque se ajusten muy mal para el caso de 11° .

¿Es posible que las ondas superficiales del océano no sean realmente del todo progresivas? Para una onda estrictamente estacionaria todas las relaciones de fase tendrían que ser 0° o 180° . Estos valores se ajustan con menos precisión a los observados que la hipotética onda progresiva hacia el oeste.

Así como para la relación entre el viento y el nivel del mar en las ondas de cuatro días, la teoría de Ichiye (1959) tiene el nivel del mar en fase (o 180° fuera) con la divergencia del viento. Los diagramas de Palmer (1952) parecen mostrar una divergencia positiva en el Hemisferio Norte, divergencia negativa en el Hemisferio Sur y la componente del viento sur a norte negativa en un ecuador que coincida a lo largo de un meridiano. Esto nos daría a V en fase (o 180° fuera) con el nivel del mar, lo cual está también de acuerdo con Groves (1955). La concordancia con las observaciones podría difícilmente ser peor. De acuerdo con las observaciones:

V	precede a	Z	por
	leads		by
Canton (presente estudio — present study)		90° — 120°	
Arorae (presente estudio — present study)		215° — 290°	
Canton (Fig. 1)		$\pm 30^\circ$	

Esto debe ser tranquilizador ya que en los datos más decisivos (Canton, Fig. 1, donde la señal para la razón de ruido fue mayor) V y Z se aproximan en la fase.

El sistema de la corriente ecuatorial debe representar una gran parte del mecanismo causante de la onda oceánica de cuatro días cualquiera que lo sea. De acuerdo con Ichiye (1959), un sistema simplificado de corriente puede aumentar la frecuencia de resonancia de las ondas baroclinicas, poniéndola en perfecta concordancia con el pico de actividad del espectro observado. Ichiye considera que estas ondas tienen una despreciable influencia en las corrientes. Esto parece razonable, ya que las velocidades orbitales asociadas con la actividad observada de cuatro días en el nivel del mar muy pequeñas, al menos en el modelo de dos capas de Ichiye.

ALGUNOS OTROS PROBLEMAS

¿Está relacionada la actividad de cuatro días en el nivel del mar con una onda barotrópica planetaria o con una

by shrinking the wavelength L from 15° to about 11° . Then we would obtain:

For the 11° wavelength the Christmas-Canton phase agrees nicely for the no-node case but gives a small discrepancy in the Canton-Arorae phase. The 11.5° wavelength improves the Canton-Arorae phase at the expense of the Christmas-Canton phase. In both cases the evidence favor a lacking equatorial node. The slight discrepancy in the Canton-Orona phase is not too bad. The Baanaba phase values probably should not even be considered, even though they do not fit too badly for the 11° case.

Is it possible that the ocean surface wave is not progressive at all? For a strictly standing wave all the phase relations would have to be 0° or 180° . These values fit the observations even more poorly than the hypothesized westward progressive wave.

As for the relation between wind and sea level in the four-day wave, Ichiye's (1959) theory has sea level in (or 180° out of) phase with the wind divergence. Palmer's (1952) diagrams seem to show positive divergence in Northern Hemisphere, negative divergence in Southern Hemisphere and negative South to North wind component at equator all coinciding along a meridian. Thus we would have V in (or 180° out of) phase with sea level, which agrees also with Groves (1955). The agreement with the observations could hardly be worse. According to the observations:

It may be reassuring that the most conclusive data (Canton, Fig. 1, where the signal to noise ratio was highest) have V and Z nearest to being in phase.

Whatever the mechanism involved in the oceanic four-day wave the equatorial current system must play a part in it. According to Ichiye (1959) a simplified current system could increase the resonant frequency of the baroclinic waves, making it agree remarkably well with the observed spectral peak of activity. Ichiye believes that these waves have a negligible influence on the currents. This seems reasonable, as the orbital velocities associated with the observed four-day activity in sea level are negligibly small (at least in Ichiye's two-layer model).

SOME REMAINING PROBLEMS

Is the four-day activity in sea level related to a barotropic planetary wave or to a baroclinic inertia-gravitational

onda baroclínica gravitacional-inercial (interna ordinaria)? Probablemente los datos de temperatura subsuperficiales tomados por Van Doren en la Isla de Canton podrían ayudar a decidirlo.

¿Cuál es el mecanismo de las ondas oceánicas de cuatro días? Una posibilidad es la advección directa de agua superficial con densidad variable. La superficie del mar está más directamente relacionada con la componente sur-norte del viento, pues hay un fuerte gradiente superficial de temperatura norte-sur. De acuerdo con Gunnar Roden (comunicación personal) la temperatura superficial en Canton tiene relativamente una gran variación mensual. Una revisión de los registros diarios (mantenida por el U.S. Coast and Geodetic Survey) aclararía esta cuestión.

¿Qué fenómeno está asociado con la actividad de 0.5 a 1.0 cpd del nivel del mar en las Islas Phoenix con una diferencia de fase aproximada de 180° entre Canton y Orona?

¿Cuál es la causa de los pequeños detalles, especialmente los picos a 0.20 cpd y 0.37 cpd en el espectro del nivel del mar en Canton? ¿Son ellos locales o mundiales?

(ordinary internal) wave? Perhaps existing subsurface temperature data taken by William Van Dorn at Canton Island can help decide.

What is the mechanism of the oceanic four-day wave? One possibility is direct advection of surface water of varying density. The sea surface is more directly related to the south-north wind component while there is a strong North-South surface temperature gradient. According to Gunnar Roden (personal communication) the month-to-month surface temperature at Canton has relatively large variation. Examination of the day-to-day surface temperature record at the Canton tide station (maintained by U.S. Coast and Geodetic Survey) will settle the question.

What phenomenon is associated with 0.5 to 1.0 cpd sea-level activity in the Phoenix Islands with approximately 180° phase difference between Canton and Orona?

What is responsible for the fine detail, especially the peaks at .20 cpd and .37 cpd, on the spectrum of sea level at Canton? Are they local or worldwide?

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Walter Munk sus consejos y el estímulo para la realización de este estudio.

La cooperación de diversas organizaciones e individuos permitieron que las observaciones del nivel del mar pudieran ser realizadas. El Gobierno Colonial de las Islas Gilbert y Ellice y los Comisionados de la British Phosphate y la Real Fuerza Aérea de Nueva Zelandia dieron gran ayuda con el transporte y comunicaciones para el establecimiento de los observatorios en Orona, Arorae y Baanaba. Matiota Tewita sirvió como intérprete. Los observadores Kabiri Bobai y Teribata en Orona, Amara Makaea, Neemia Matiota y Torume en Arorae y los Capitanes Steve Dexter y Dave Hackworth, en Baanaba, obtuvieron con buen resultado excelentes datos y mantuvieron los instrumentos en operación generalmente en circunstancias muy adversas. Los mareógrafos en Fanning y Jarvis fueron instalados y operados bajo la dirección de Martin Vitousek. El procesamiento y tabulación de los datos del nivel del mar fueron realizados por miembros del grupo de la Institución Scripps de Oceanografía para el Año Geofísico Internacional bajo la dirección de June Pattullo. Otros datos del nivel del mar fueron obtenidos en el U.S. Coast and Geodetic Survey y los datos meteorológicos fueron obtenidos en el U.S. Weather Bureau y la Oficina Meteorológica de Nueva Zelandia.

La mayor parte del procesamiento preliminar de los datos fue realizado por Ruth Opdycke, Dorothy Burgess y Anita Smith. La reducción y preparación posterior de los datos fue realizada por el Centro Electrónico de Cálculo de la Universidad Nacional Autónoma de México y los autores están particularmente agradecidos con el señor Luis Ottalengo, de este establecimiento. El análisis estadístico fue hecho en la Computational Facility de la Universidad de

ACKNOWLEDGEMENT

The authors are grateful to Walter Munk for advice and encouragement to make this study.

Cooperation from many organizations and individuals enabled the observations of sea level to be made. The Government of the Gilbert and Ellice Islands Colony, the British Phosphate Commissioners and the Royal New Zealand Air Force were very helpful in providing facilities, transportation and communications for establishing the observatories at Orona, Arorae and Baanaba. Matiota Tewita served as interpreter. The observers Kabiri Bobai and Teribata at Orona, Amara Makaea, Neemia Matiota and Torume at Arorae, and Captain Steve Dexter and Dave Hackworth at Baanaba, successfully obtained excellent data and kept the instruments in operation, usually under very adverse circumstances. The sea-level recorders on Jarvis and Fanning were installed and operated under the direction of Martin Vitousek. The processing and tabulating of the sea level data were carried out by members of the IGY staff of the Scripps Institution of Oceanography under the direction of June Pattullo. Additional sea-level data were obtained from the U.S. Coast and Geodetic Survey, and weather data were obtained from the U.S. Weather Bureau and the New Zealand Meteorological Office.

Most of the preliminary data processing was done by Ruth Opdycke, Dorothy Burgess and Anita Smith. Further data reduction and preparation was done by the Centro Electrónico de Cálculo of the Universidad Nacional Autónoma de México, and the authors are particularly indebted to Luis Ottalengo of that establishment. The statistical analyses were done at the Computational Facility at the University of California at La Jolla by Frank Snodgrass

California, en La Jolla, por Frank Snodgrass y Gaylard Miller. Los autores aprovecharon las discusiones sostenidas por Takashi Ichiye y John Tukey. El trabajo fue generosamente sostenido por la National Science Foundation, por medio de su contribución a la Institución Scripps de Oceanografía para el Año Geofísico Internacional y por el U.S. Bureau of Commercial Fisheries a través de su contrato con el Programa de Investigaciones Oceánicas del Atun en la Institución Scripps.

and Gaylord Miller. The authors benefited from helpful discussions with Takashi Ichiye and John Tukey. The work was generously supported by the National Science Foundation through its grant to the Scripps Institution of Oceanography for the International Geophysical Year, and by the U.S. Bureau of Commercial Fisheries through its contract with the Tuna Oceanography Research Program at the Scripps Institution.

BIBLIOGRAFIA

BLIBLIOGRAPHY

- BLACKMAN, R. A. & J. W. TUKEY. 1959. The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering. *Bell System Tech. Jour.* 37 (Part I):185-282; (Part II):485-570.
- GOODMAN, N. R. 1957. On the joint estimation of the spectra, cospectrum and quadrature spectrum of a two-dimensional stationary Gaussian process. *New York University, Scientific Paper No. 10, Engineering Statistics Laboratory*.
- GROVES, G. W. 1955. Numerical filters for discrimination against tidal periodicities. *Trans. American Geophys. Union*, 36(6):1073-1084.
- 1956. Periodic variation of sea level induced by equatorial waves in the east-lies. *Deep-Sea Res.*, 3(4):248-252.
- ICHIYE, T. 1959. On long waves in a stratified, equatorial ocean caused by a traveling disturbance. *Deep-Sea Res.*, 6(1):16-37.
- MUNK, W. H., F. E. SNODGRASS & M. J. TUCKER. 1959. Spectra of low-frequency ocean waves. *Bull. Scripps Inst. Oceanogr. Univ. California* (La Jolla, California), 7(4):283-362.
- PALMER, C. H. 1952. Tropical meteorology. *Quart. Jour. Meteor. Soc.* 78(336):
- TUKEY, J. W. 1949. The sampling theory of power spectrum estimates. Symp. Appl. Autocorrelation analysis to Phys. Probl., NAVEKOS-P-735, Office of Naval Research, Washington, D. C.