

# 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. 1

México, D. F., 1o. de Julio de 1961

Núm. 3

## *SOBRE UN PICO NOTABLEMENTE AGUDO EN EL ESPECTRO DEL NIVEL DEL MAR EN ACAPULCO*

W. MUNK \* y H. CEPEDA \*\*

### RESUMEN

Los mareogramas en Acapulco y Salina Cruz, han sido analizados para el maremoto del 28 de Julio de 1957 y para un período típico de ruido de origen meteorológico. En Acapulco los espectros del maremoto y del ruido revelan un pico agudo a los 2 ciclos por hora.

### INTRODUCCION

El gran temblor mexicano de 1957 ha sido descrito por Merino y Coronado (1957). El epicentro fue localizado a 84 Km al oeste de Acapulco y a 402 Km al oeste de Salina Cruz. La Figura 1 muestra el registro de mareas en Acapulco, comenzando 12 horas antes del arribo del maremoto, siendo notable en dicho registro la gran regularidad de las oscilaciones antes y después de su llegada con un período de media hora. La regularidad del registro no es comparable a ninguna otra estación de mareas conocida por nosotros y esto nos llevó a emprender un análisis más detallado que será descrito en este trabajo. En Salina Cruz, la actividad es más baja y menos regular (Figura 2).

### ANALISIS

Los registros han sido analizados de acuerdo con el método de Tukey (Blackman y Tukey, 1958). Para los detalles

\* Instituto de Geofísica, La Jolla, California. Mucho de este trabajo fue hecho durante una visita al Instituto de Geofísica, U.N.A.M., en el mes de Diciembre de 1957. Este autor está profundamente agradecido al Ing. Ricardo Monges López y al Dr. Julián Adem por haber hecho posible esta visita y al Dr. J. Merino y Coronado por las muchas y fructíferas discusiones.

\*\* Instituto de Geofísica, U.N.A.M.

## *CONCERNING A REMARKABLY SHARP PEAK IN THE SEA LEVEL SPECTRA AT ACAPULCO*

W. MUNK \* and H. CEPEDA \*\*

### ABSTRACT

Tide gauge records at Acapulco and Salina Cruz have been analyzed for the tsunami of 28 July 1957 and for a typical period of meteorologically induced background. At Acapulco the tsunami spectrum and background spectrum both reveal a sharp peak at 2 cycles per hour.

### INTRODUCTION

The Great Mexican Earthquake of 1957 has been described by Merino y Coronado (1957). The epicenter was located 84 Km west of Acapulco and 402 Km west of Salina Cruz. Figure 1 shows the tide record at Acapulco, commencing 12 hours prior to the tsunami arrival. The remarkable feature of the Acapulco record is the great regularity of the oscillations, both before and after the arrival of the tsunami, with a period of 1/2 hour. The regularity of the record is unmatched at any other tide station known to us, and this prompted us to undertake the more detailed analysis to be described in this note. At Salina Cruz the activity is lower and less regular (Figure 2).

### ANALYSIS

The records have been analyzed according to the method of Tukey (Blackman and Tukey, 1958). For details con-

\* Institute of Geophysics, La Jolla, California. Much of this work was done during a visit to the Institute of Geophysics, U.N.A.M., during the month of December 1957. This author is greatly indebted to Ing. Ricardo Monges Lopez and Dr. Julian Adem for making this visit possible, and to Dr. J. Merino y Coronado for many fruitful discussions.

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

relativos al método y anotación nos referimos a Munk, Snodgrass y Tucker (1959). Los resultados aparecen en la Figura 3; los datos pertinentes están resumidos en la Tabla 1. Las series de tiempo fueron obtenidas leyendo el registro de mareas al centésimo de pie, a intervalos de cinco minutos y perforando en tarjetas los valores resultantes. Fueron entonces verificadas en una IBM 650 para errores (usando el

cerning method and notation we refer to Munk, Snodgrass, and Tucker (1959). The results are shown in Figure 3; pertinent data are summarized in Table 1. The time series were obtained by reading the tide record at five-minute intervals to the nearest hundredth of a foot and punching the resulting values on cards. The time series were then checked on an IBM 650 for errors (using a first-difference cri-

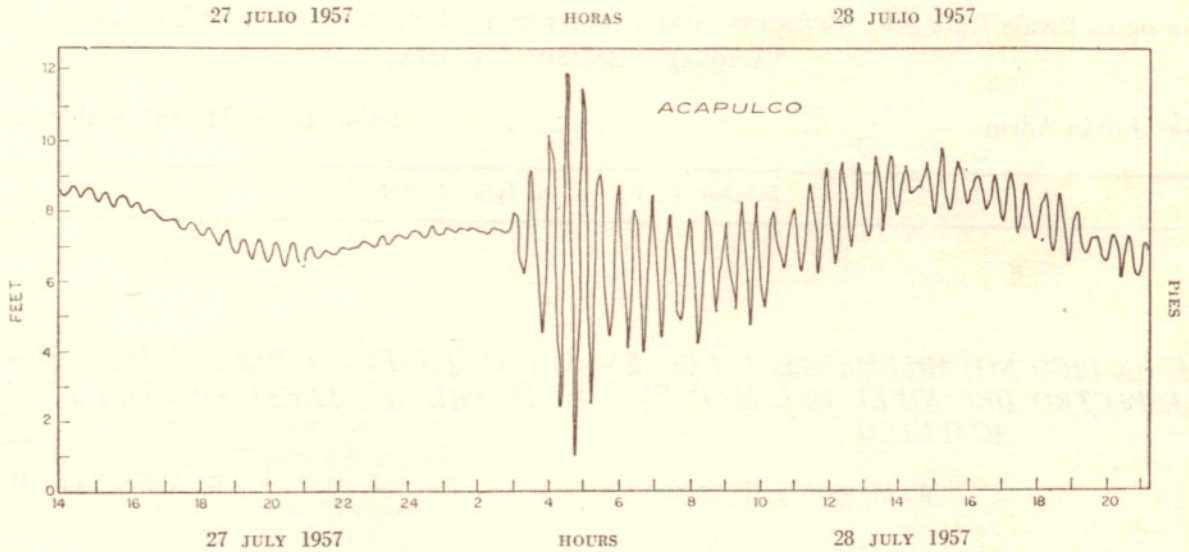


Fig. 1. Mareograma de Acapulco.

Fig. 1. The tide record at Acapulco.

critorio de la primera diferencia). La marea fue reducida por medio de un filtro de banda alta con 201 factores ponderados y se calculó el espectro de potencia de los registros filtrados. Las últimas dos operaciones fueron realizadas en la computadora IBM 709 del Western Data Processing Center, Universidad de California, Los Angeles. La coherencia y la fase son trazadas para resoluciones alta y baja y el

terion). The tide was reduced by means of a high-pass filter with 201 weight factors and the power spectra of the filtered records obtained. The last two operations were performed on the IBM 709 computer at the Western Data Processing Center, University of California, Los Angeles. Coherence and phase are plotted for high and low resolution, the remaining spectra for high resolution. At low

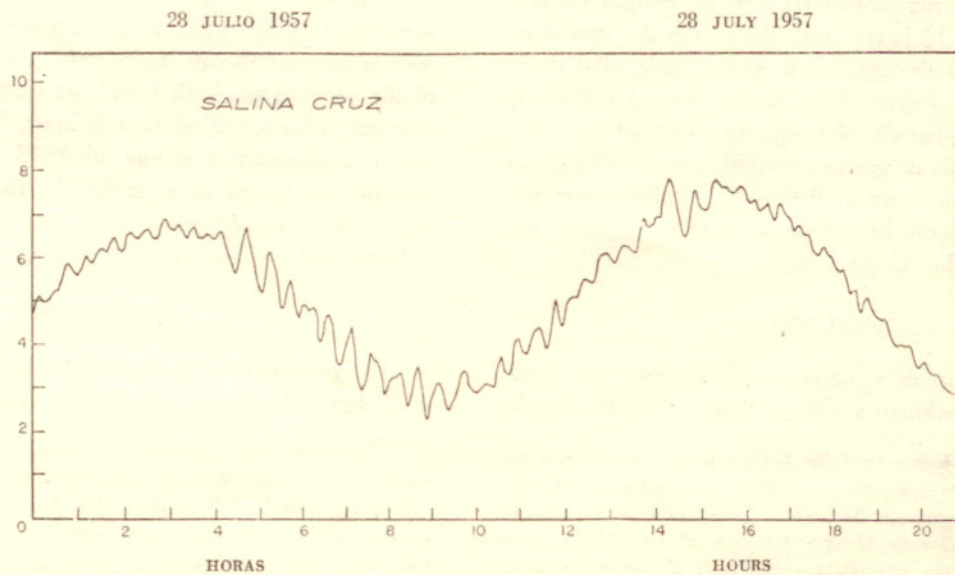


Fig. 2. Mareograma de Salina Cruz.

Fig. 2. The tide record at Salina Cruz.

resto de los espectros para la resolución alta. En frecuencias bajas, los espectros están muy contaminados por las mareas debido a la infortunada selección de los factores ponderados de banda alta. Para la frecuencia de la marea semi-diurna (.022 cpks), la energía es reducida únicamente por un factor 5 y el pico del espectro entre .02 y 0.20 cpks representa la "difusión" esperada de las mareas. El análisis es significativo sólo por encima de 0.25 cpks.

frequencies the spectra are badly contaminated by the tides owing to an unfortunate choice of the high-pass weight factors. At the frequency of the semi-diurnal tide (.022 cpks) energy is reduced only by a factor 5, and the shoulder of the spectrum between .02 to 0.20 cpks represents the expected "diffusion" from the tides. The analysis is meaningful only above 0.25 cpks.

TABLA I. PARAMETROS

TABLE I. PARAMETERS

Espectros Spectra	Desde From	Hasta To	N	m	$\nu$
<b>RUIDO: BACKGROUND:</b>					
Acapulco I	0020 27 Dic. 56	2235 31 Dic. 56	1420	100	28
Acapulco II	2150 31 Dic. 56	1935 5 Ene. 57	1414	100	28
Salina Cruz I	0020 17 Jul. 59	2005 21 Jul. 59	1390	100	28
Salina Cruz II	1920 21 Jul. 59	1540 26 Jul. 59	1397	100	28
<b>MAREMOTO: TSUNAMI:</b>					
Acapulco-Salina Cruz	0320 28 Jul. 57	2235 28 Jul. 57	232	100 25	4.6 19

Valor mínimo: 0.001 pies = .0305 cm  
 Least count: 0.001 feet

$\Delta t$ : 300 sec

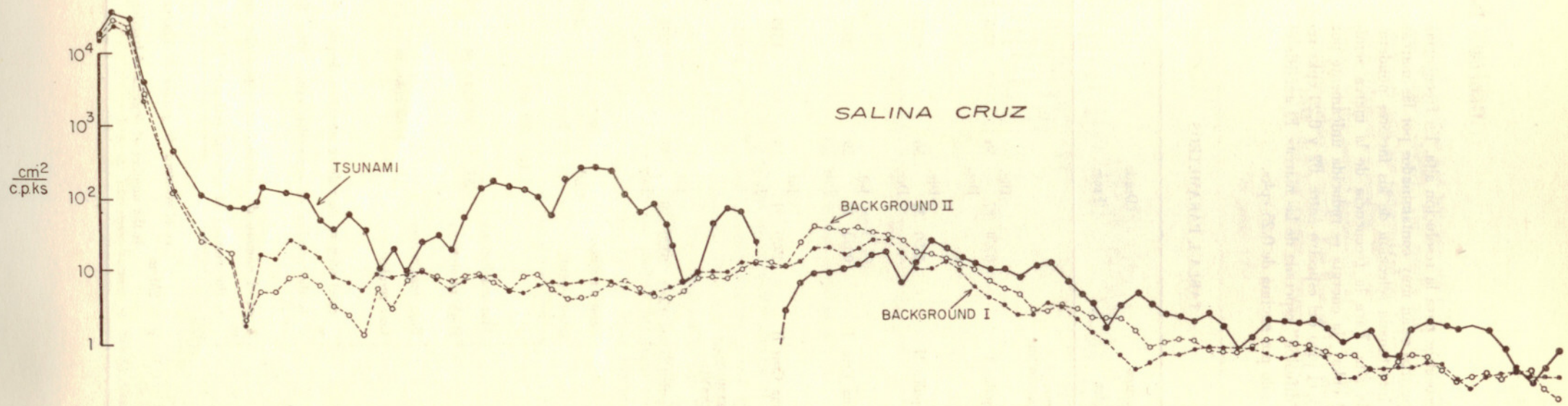
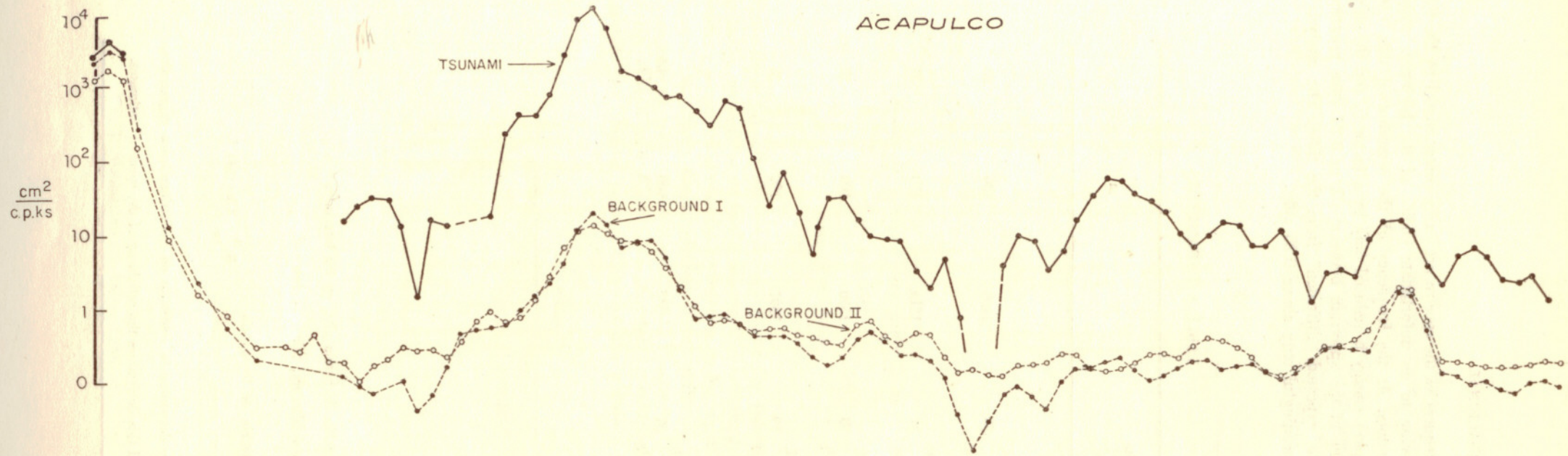
Alta resolución:  $\Delta f = 1/60$  cpks,  $m = 100$   
 High resolution:

Baja resolución:  $\Delta f = 1/15$  cpks,  $m = 25$   
 Low resolution:

N es el número de valores sucesivos después de filtración de banda alta, en los intervalos  $\Delta t$ .  
 N is the number of successive values after high-pass filtering, taken at interval  $\Delta t$ .

m es el número de estimaciones espectrales en la escala de frecuencia  $0^a$  to  $(2m \Delta t)^{-1}$ .  
 m is the number of spectral estimates in the frequency range

$\nu = 2M/m$  es el número de grados de libertad que determina la confianza en las estimaciones espectrales.  
 $\nu$  is the number of degrees of freedom, and this determines the reliability of the spectral estimates.



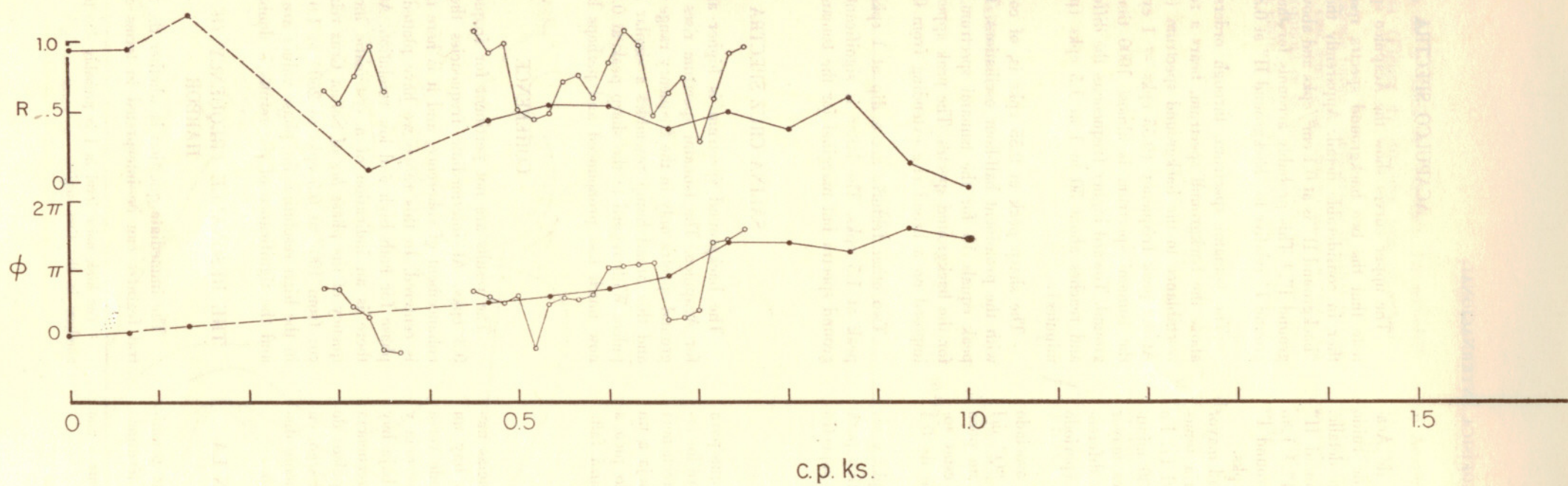


Fig. 3. *Superior:* Espectros de potencia en los registros de Acapulco durante el maremoto (líneas continuas) y para otros dos períodos. La frecuencia está en ciclos por kilos segundo (cpks) y la densidad espectral en  $\text{cm}^2/\text{cpks}$ .  
*Medio:* Espectros de Salina Cruz.  
*Inferior:* La coherencia R (no  $R^2$ ) entre los registros del maremoto de Acapulco y Salina Cruz y el retraso de fase en Salina Cruz relativo a Acapulco. La flecha vertical muestra el límite de incertidumbre de 95% para los espectros de ruido y de maremotos.

Fig. 3. *Top:* Power spectra of Acapulco records during the tsunami (solid lines) and for two other periods. The frequency is in cycles per kilosecond (cpks) and the power density in  $\text{cm}^2/\text{cpks}$ .  
*Middle:* Spectra for Salina Cruz.  
*Bottom:* The coherence, R (not  $R^2$ ) between the Acapulco and Salina Cruz tsunami records, and the phase lag of Salina Cruz relative to Acapulco. The vertical arrow shows the 95% uncertainty limits for the background and tsunami spectra.

## ESPECTROS DE ACAPULCO

Las curvas superiores muestran los espectros de Acapulco. Primero notamos que los dos espectros de ruido (*back-ground*) se asemejan uno a otro con bastante detalle. Aparentemente el nivel del ruido en el "background II" está a  $0.1 \text{ cm}^2/\text{cpks}$  y encima del "background I".<sup>1</sup> Esto probablemente explica las depresiones del "background I" con relación al "background II" a 0.35 y 1.0 cpks.

El espectro del maremoto, en orden de magnitud mayor que el espectro del ruido, tiene una extraordinaria semejanza con el espectro de ruido (particularmente el I). En la frecuencia máxima ( $0.55 \text{ cpks} = 1 \text{ ciclo en } 30 \text{ minutos}$ ), el espectro del maremoto es casi 1000 veces mayor que el del ruido. Hacia frecuencias más altas la diferencia disminuye hasta ser de 30 a 1 para 1.5 cpks (período de casi 10 minutos).

El pico agudo a 0.55 cpks está naturalmente asociado con oscilaciones prominentes de media hora. La "Q" del pico equivale a 15 en el espectro del maremoto, un poco menos para el espectro del ruido. El pico parece estar sobrepuesto a una elevación ancha que se extiende de 0.4 a 0.8 cpks.

Se ven otros dos rasgos: una depresión a 1 cpks y un segundo pico a 1.5 cpks. El último es significativo para los espectros de los ruidos, pero marginal para el espectro del maremoto.

## ESPECTROS DE SALINA CRUZ

El espectro del ruido es más alto y más plano que para Acapulco. El espectro del maremoto se levanta sobre los espectros de los ruidos únicamente en el rango de frecuencia de 0.4 a 0.7 cpks y esta amplia elevación se asemeja a un rasgo similar en Acapulco. Con relación al agudo pico a 0.55 cpks, ahora mucho menos pronunciado y quizá falte completamente.

## COHERENCIA

Los resultados no son pertinentes para frecuencias menores de 0.3 cpks. Para frecuencias intermedias hay un gran acrecentamiento de coherencia y es aquí donde versa nuestro interés. En este rango hemos trazado coherencia y fase para resolución alta y baja. Para resolución baja hay una indicación de un aumento sistemático con frecuencia del retraso de fase de Salina Cruz, relativo a Acapulco: de  $100^\circ$  para 0.5 cpks a  $260^\circ$  para 1.0 cpks. Sin embargo, en la resolución alta los valores de fase están sumamente dispersos y el significado de los resultados es dudoso.

## LA FRECUENCIA DE LA RESONANCIA EN LA BAHIA DE ACAPULCO

La pregunta inmediata es si las características prominentes del espectro pueden ser interpretadas en términos

<sup>1</sup> El alto nivel del ruido en el I se debe probablemente a uno o dos valores equivocados en las series de tiempo.

## ACAPULCO SPECTRA

The upper curves show the Acapulco spectra. We first note that the two background spectra resemble one another in considerable detail. Apparently the noise level in "background II" is at  $0.1 \text{ cm}^2/\text{cpks}$  and above that of "background I".<sup>1</sup> This probably accounts for the dips of "background I" relative to "background II" at 0.35 and 1.0 cpks.

The tsunami spectrum, through orders of magnitude above the background spectrum, bears a remarkably close resemblance to the background spectrum (particularly I). At the peak frequency ( $0.55 \text{ cpks} = 1 \text{ cycle in } 30 \text{ min}$ ) the tsunami spectrum is almost 1000 times above background. Toward higher frequencies the difference decreases and reaches about 30 to 1 at 1.5 cpks (period about 10 minutes).

The sharp peak at 0.55 cpks is, of course, associated with the prominent half-hour oscillations. The "Q" of the peak equals 15 for the tsunami spectrum, somewhat less for the background spectra. The peak appears to be superimposed on a broad rise extending from 0.4 to 0.8 cpks.

Two other features are a dip at 1 cpks and a second peak at 1.5 cpks. The latter is significant for the background spectra but marginal for the tsunami spectrum.

## SALINA CRUZ SPECTRA

The background spectrum is higher and flatter than for Acapulco. The tsunami spectrum rises over the background spectra only in the frequency range 0.4 to 0.7 cpks, and this broad hump resembles a similar feature at Acapulco. With regard to the sharp peak at 0.55 cpks, this is now much less pronounced and perhaps lacking entirely.

## COHERENCE

The results are not pertinent for frequencies less than 0.3 cpks. At intermediate frequencies there is a broad enhancement of coherence, and it is here that our interest is centered. In this range we have plotted coherence and phase for both high and low resolution. At low resolution there is an indication of a systematic increase with frequency of the phase lag of Salina Cruz relative to Acapulco: from  $100^\circ$  at 0.5 cpks to  $260^\circ$  at 1.0 cpks. However in the high resolution the phase values are badly scattered and the significance of the results is doubtful.

## THE RESONANCE FREQUENCY OF ACAPULCO HARBOR

The immediate question is whether the prominent spectral features can be interpreted in terms of the geometry

<sup>1</sup> The high noise level in I is probably due to one or two bad numbers in the time series.

de la geometría de la Bahía de Acapulco. La complejidad de la bahía (Figura 4) dificulta una contestación definitiva.

Se hace un cálculo burdo reemplazando la bahía por un canal uniforme, con adecuadas características medias. La profundidad apropiada es la que requiere el mismo tiempo de recorrido entre la boca y el extremo interior:

$$\int_0^L \frac{dx}{C(x)} = \int_0^L \frac{dx}{\sqrt{gh(x)}} = \frac{L}{\sqrt{g\bar{h}}}$$

de modo que:

so that

$$[\bar{h}]^{-1/2} = \frac{1}{L} \int_0^L [h(x)]^{-1/2} dx \tag{1}$$

Los valores aproximados son:

Approximate values are

$$\bar{h} = 29 \text{ m}, \quad \bar{C} = 17.1 \text{ m/sec}, \quad L = 5000 \text{ meters,}$$

of Acapulco Harbor. The complexity of the harbor (Fig. 4) makes it difficult to give a definite answer.

The roughest of calculation is made by replacing the harbor with a uniform channel, having some appropriate average characteristics. The appropriate depth is one requiring the same travel time from the open mouth to the inner end:

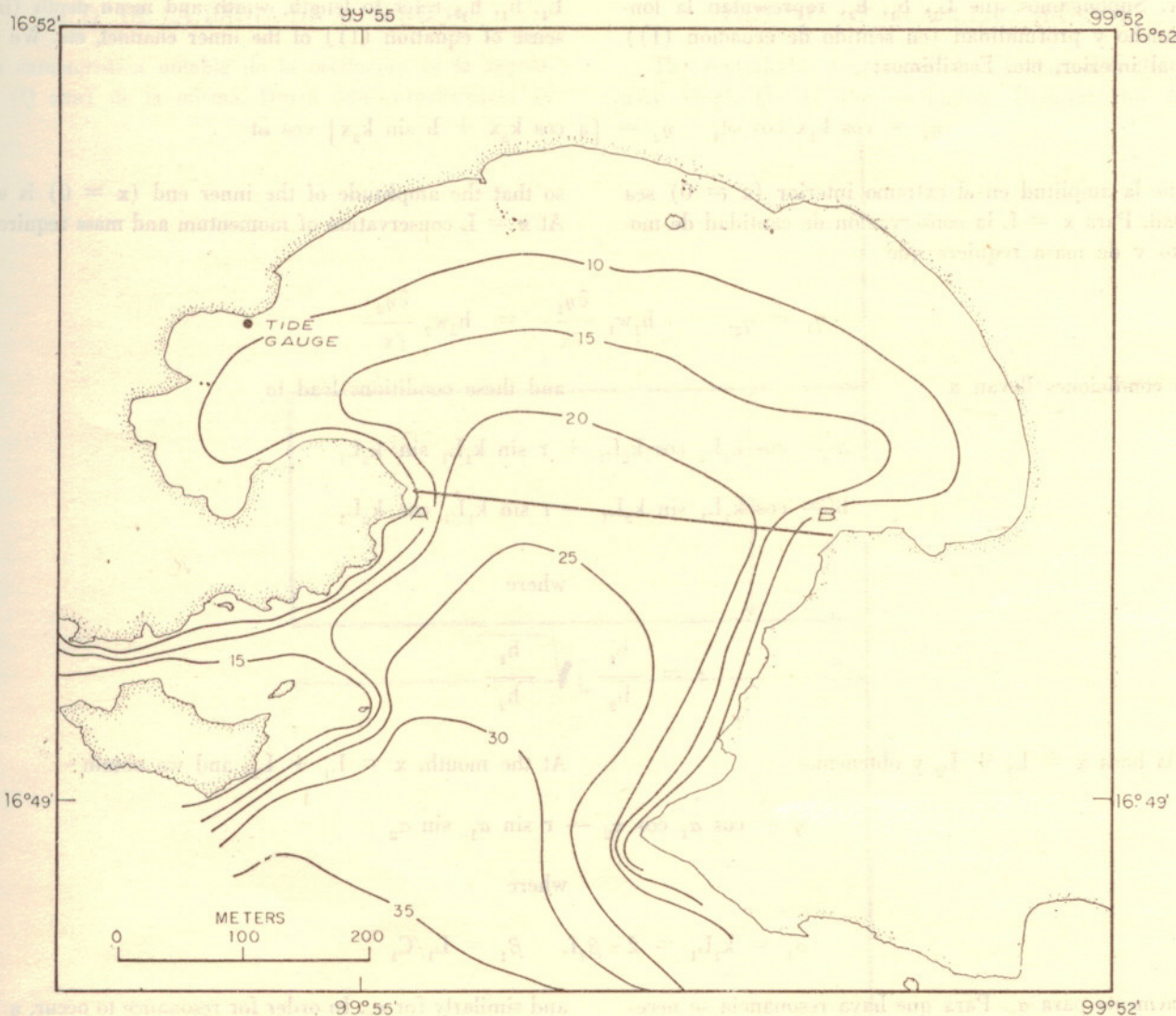


Fig. 4. Bahía de Acapulco.

Fig. 4. Acapulco harbor.

y estos dan

$$f_0 = \frac{1}{4} \frac{C}{L} = 0.86 \text{ cpks}$$

$$f_1 = \frac{3}{4} \frac{C}{L} = 2.58 \text{ cpks} \tag{2}$$

para las frecuencias de la armónica fundamental y de la primera armónica. Se aplica "corrección" de entrada, la cual modifica algo estos valores. La "longitud efectiva" es dada por (Miles y Munk, 1961)

and these give  
for the frequencies of the fundamental and first harmonic. Apply entrance "correction". These values are somewhat modified by applying an entrance correction. The "effective length" is given by (Miles and Munk, 1961).

$$L \left[ 1 + \pi^{-1} \frac{b}{L} (1.051 + \log \frac{L}{b}) \right]$$

donde b es el ancho de la bahía. Para Acapulco bien podemos poner  $L = 2b$  y esto da una longitud efectiva de  $1.28L$  para la bahía. Las frecuencias corregidas son consecuentemente 28% más bajas que en (2).

where b is the harbor width. For Acapulco we may set  $L = 2b$ , and this gives an effective harbor length of  $1.28L$ . The corrected frequencies are accordingly 28% lower than in (2).

Podemos lograr mejores resultados dividiendo la bahía a través de la línea A - B en una sección interior y una exterior. Supongamos que  $L_1, b_1, h_1$ , representan la longitud, ancho y profundidad (en sentido de ecuación (1)) del canal interior, etc. Escribimos:

We may do somewhat better by dividing the harbor along the line A - B into an inner and outer section. Let  $L_1, b_1, h_1$ , refer to length, width and mean depth (in the sense of equation (1)) of the inner channel, etc. We write

$$\eta_1 = \cos k_1 x \cos \omega t_1 \quad \eta_2 = [a \cos k_2 x + b \sin k_2 x] \cos \omega t$$

para que la amplitud en el extremo interior ( $x = 0$ ) sea la unidad. Para  $x = L$  la conservación de cantidad de movimiento y de masa requiere que

so that the amplitude of the inner end ( $x = 0$ ) is unity. At  $x = L$  conservation of momentum and mass require that

$$\eta_1 = \eta_2, \quad h_1 w_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} = h_2 w_2 \frac{\partial \eta_2}{\partial x}$$

y estas condiciones llevan a

and these conditions lead to

$$a = \cos k_1 L_1 \cos k_2 L_1 + r \sin k_1 L_1 \sin k_2 L_1$$

$$b = \cos k_1 L_1 \sin k_2 L_1 - r \sin k_1 L_1 \cos k_2 L_1$$

donde

where

$$r = \frac{b_1}{b_2} \sqrt{\frac{h_1}{h_2}}$$

En la boca  $x = L_1 + L_2$  y obtenemos

At the mouth,  $x = L_1 + L_2$ , and we obtain

$$\eta = \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 - r \sin \alpha_1 \sin \alpha_2$$

donde

where

$$\alpha_1 = k_1 L_1 = 2\pi \beta_1 f, \quad \beta_1 = L_1 / C_1$$

y similamente para  $\alpha_2$ . Para que haya resonancia se necesita  $\eta = 0$  y  $r \tan_1 \tan \alpha_2 = 1$ . Usando valores numéricos

and similarly for  $\alpha_2$ . In order for resonance to occur,  $\eta = 0$ , and  $r \tan_1 \tan \alpha_2 = 1$ . Using the numerical values



$$L_1 = 2500 \text{ m}$$

$$\bar{h}_1 = 20 \text{ m}$$

$$b_1 = 6000 \text{ m}$$

$$f_0 = 0.79 \text{ cpks,}$$

obtenemos

para los dos módulos más graves (sin corrección de entrada). Para una onda *transversal* en la bahía interior, podemos fijar  $C = 17 \text{ m seg}^{-1}$ .  $L = 6000 \text{ m}$  y ello da

$$f_0 = \frac{1}{2} \frac{\bar{C}}{L}$$

Los picos observados están a 0.55 y a 1.5 cpks. Las frecuencias calculadas están ciertamente en el orden correcto, aunque aparecen ligeramente altas. Para establecer una identificación definitiva (si hay alguna) será necesario hacer trabajo numérico muy cuidadoso o posiblemente experimentos con modelos.

LA "Q" DE LA BAHIA DE ACAPULCO

La característica notable de la oscilación es la regularidad (Q alta) de la misma. Quizá esta característica (y

$$L_2 = 2500 \text{ m}$$

$$\bar{h}_2 = 47.5 \text{ m} \quad r = 1.3$$

$$b_2 = 3000 \text{ m}$$

we obtain

$$f_1 = 2.6 \text{ cpks}$$

for the two gravest modes (without entrance correction).

For a *transverse* wave in the inner harbor, we may set  $C = 17 \text{ m sec}^{-1}$ .  $L = 6000 \text{ m}$ , and this gives

$$= 1.42 \text{ cpks}$$

The observed peaks are at 0.55 and 1.5 cpks. The computed frequencies are certainly in the right order, though they appear a bit too high. To establish a definite identification (if there is one) will call for some careful numerical work or possibly model experiments.

THE "Q" OF ACAPULCO HARBOR

The remarkable feature of the oscillation is the regularity (high Q) of the oscillation. Perhaps this feature

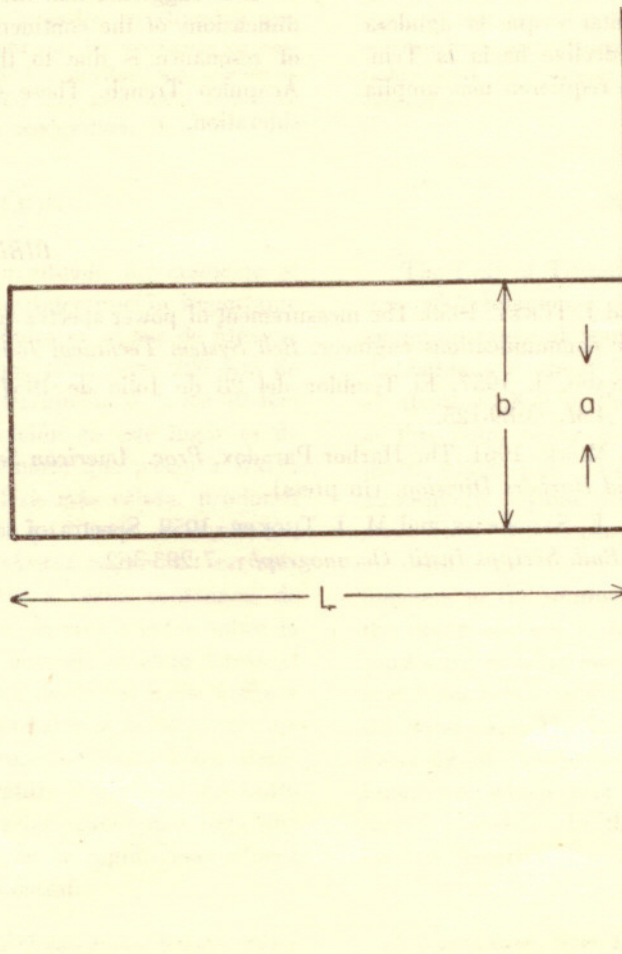


Fig. 5. Configuración de la bahía para el cálculo de "Q".

Fig. 5. Harbor configuration for the calculation of "Q".

no la frecuencia) pueda ayudarnos a decidir si el pico espectral está asociado con la resonancia de la bahía o con alguna otra característica.

La  $Q$  de una bahía es determinada por la cantidad de fuga por la abertura más bien que por disipación interna. Más precisamente,  $2\pi/Q$  equivale a la energía radiada por la abertura en un período de onda, dividida por la energía en la bahía.

Miles y Munk (1961) han evaluado la  $Q$  en bahías rectangulares. Para Acapulco proponemos (Figura 5)  $b = 2a = L$ . La teoría da entonces  $Q = 2.5$ . Aunque la configuración supuesta de la bahía difiere mucho de la verdadera geometría, la discrepancia entre la  $Q$  observada de 15 y la  $Q$  computada de 2.5 es demasiado grande para ser consecuencia de inexactitudes en el modelo.

### CONCLUSIONES

La sorprendente agudeza del pico de 0.55 cpks está asociada con oscilaciones del nivel del mar *fuera* de la bahía. La bahía por sí misma no podría dar lugar a oscilaciones de resonancias tan regulares como las observadas, y con tal base (y no solamente por la frecuencia), la bahía puede ser eliminada como la causa del pico espectral de 0.55 cpks.

Se sugiere que la resonancia está asociada con las dimensiones de la plataforma continental y que la agudeza de la resonancia se debe al fuerte declive hacia la Trincheras de Acapulco. Estas sugerencias requieren más amplia consideración.

(rather than the frequency) can help us decide whether the spectral peak is associated with the harbor resonance, or with some other feature.

The  $Q$  of a harbor is determined by the amount of leakage through the gap rather than by internal dissipation. More precisely, the  $2\pi/Q$  equals the energy radiated through the gap in one wave period, divided by the energy in the harbor.

Miles and Munk (1961) have evaluated the  $Q$  for rectangular harbors. For Acapulco we set (Fig. 5)  $b = 2a = L$ . The theory then gives  $Q = 2.5$ . Although the assumed harbor configuration differs widely from the true geometry, the discrepancy between the observed  $Q$  of 15 and the computed  $Q$  of 2.5 is much too large to be due to inaccuracies in the model.

### CONCLUSIONS

The remarkably sharp resonance peak of 0.55 cpks is associated with oscillations of sea level *outside* the harbor. The harbor itself could not give rise to resonance oscillations tuned anywhere near as sharply as observed, and it is on this basis (rather than on the basis of frequency) that the harbor can be eliminated as a source of the 0.55 cpks spectral peak.

It is suggested that the resonance is associated with the dimensions of the continental shelf, and that the sharpness of resonance is due to the precipitous drop-off into the Acapulco Trench. These suggestions require further consideration.

### BIBLIOGRAFIA

- BLACKMAN, R. and J. TUKEY. 1958. The measurement of power spectra from the point of view of the communications engineer. *Bell System Technical Journal*, 37:185.
- MERINO Y CORONADO, J. 1957. El Temblor del 28 de Julio de 1957. *Anal. Inst. Geofisic. U.N.A.M.*, 3:89-125.
- MILES, J. and W. MUNK. 1961. The Harbor Paradox. *Proc. American Soc. Civ. Eng., Waterways and Harbors Division*. (in press).
- MUNK, W. H., F. E. SNODGRASS and M. J. TUCKER. 1959. Spectra of low frequency ocean waves. *Bull. Scripps Instit. Oceanography*, 7:283-362.

### BIBLIOGRAPHY