

VK 567
.018

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C.

ORGANISMO DESCENTRALIZADO DE INTERÉS PÚBLICO



Km 107 Carretera Tijuana-Ensenada * TEL.: (646) 175-0500 * FAX: (646) 175-0547
Ensenada, Baja California, México * RFC: CIC-730918-9G8

Mareas y Nivel del Mar

Dr. Modesto Ortiz Figueroa
Departamento de Oceanografía Física, CICESE

Curso impartido del 9 al 14 de julio del 2012, en la Dirección General Adjunta de Oceanografía Hidrografía y Meteorología de la Secretaría de Marina, Armada de México (SEMAR), con el auspicio de la Secretaría de Gobernación (SEGOB), en el marco del Convenio de Colaboración para la Red Sísmica Mexicana Segunda Fase, suscrito por SEGOB-SEMAR y SEGOB-CICESE, en coordinación con el Sistema Nacional de Protección Civil y el Centro Nacional de Prevención de Desastres. El curso ampara un total de 24 horas de teoría y 24 horas de laboratorio.

MAREAS Y NIVEL DEL MAR

Dr. Modesto Ortiz-Figueroa
Departamento de Oceanografía Física, CICESE

El objetivo general del curso es el de abrir el gran catálogo de los diferentes estudios del nivel del mar que explican una variedad de causas por las que el nivel del mar experimenta cambios en escalas de horas, días, meses, años y siglos. Se describen brevemente los métodos e instrumentos empleados en la observación cronológica del nivel del mar e informalmente se describen los métodos empleados en el análisis de las variaciones del nivel del mar y en la predicción de la marea astronómica, sin dejar de mencionar la importancia social de los cambios en el nivel del mar. Cada uno de estos temas ha formado parte de disciplinas científicas especializadas y continúan siendo temas de actualidad en ciencia e ingeniería. Con esta información se pretende que los participantes del curso adquieran un panorama general que les facilite administrar proyectos que de una u otra manera estén relacionados con el nivel del mar. Se espera que quienes directamente estén relacionados con el manejo de bancos de datos geodésicos y/o de nivel del mar puedan encontrar una gama de literatura de apoyo.

El objetivo particular es capacitar al personal del Centro de Alerta de Tsunamis (CAT) de la Secretaría de Marina Armada de México, en la observación e interpretación de los datos del Nivel del Mar que se reciben tiempo real en el CAT. Este conocimiento es fundamental para la emisión y en su caso, para la cancelación de alertas de tsunami.

CONTENIDO TEMÁTICO:

1. CAMBIOS PERIÓDICOS EN EL NIVEL DEL MAR

Marea astronómica
Teoría de mareas
Marea de período largo
Cambios en el eje de rotación del planeta

2. CAMBIOS EN EL NIVEL DEL MAR DEBIDO A EFECTOS ATMOSFÉRICOS Y OCEANOGRÁFICOS

Presión atmosférica – nivel del mar
La fuerza de arrastre del viento – apilamiento por tormenta
Densidad del agua de mar – nivel medio del mar
Corrientes costeras
Evaporación-Precipitación-Ríos

3. VARIACIONES GLOBALES EN EL NIVEL MEDIO DEL MAR

El fenómeno del Niño
Calentamiento Global
Variabilidad interdecadal

4. CAMBIOS SÚBITOS Y DE PERÍODO LARGO EN EL NIVEL DEL MAR

Movimientos verticales de la corteza terrestre
Efecto de terremotos en el nivel medio del mar
Tsunamis

5. DETERMINACIÓN DEL NIVEL MEDIO DEL MAR

6. ANÁLISIS ARMÓNICO Y PREDICCIÓN DE MAREAS

6.1 Representación armónica y espectral de la marea.

6.2 Método de Mínimos Cuadrados para calcular las constantes armónicas de la marea.

7. Visualización automática de las observaciones del nivel del mar de la Red Mareográfica del CICESE, de la SEMAR y de otras redes.

Participantes del curso:

CAP. FRAG. CG. EO. Miguel Ángel Reyes Martínez

TTE. NAV. CG. EO. Andrés Aguirre Hernández

TTE. NAV. SIA. I. GEOL. Miguel Ángel Sócrates Ibarra Fernández

TTE. NAV. CG. EO. Álvaro Rivera Ríos

TTE. NAV. SMAM. OCEAN. Roberto Roa Mendoza

TTE. FRAG. CG. EO. Jesús Alberto Guerrero Bernal

TTE. FRAG. SMAM. OCEAN. Román Rodolfo Vera Mendoza

TTE. FRAG. SIA. I. GEOG. Juan Guadarrama Ramírez

TTE. FRAG. SMAM. OCEAN. Rosario Martínez Olvera

TTE. CORB. SMAM. OCEAN. Miguel Enciso Ramos

TTE. CORB. SMAM. OCEAN. José Antonio Jiménez Quiñonez

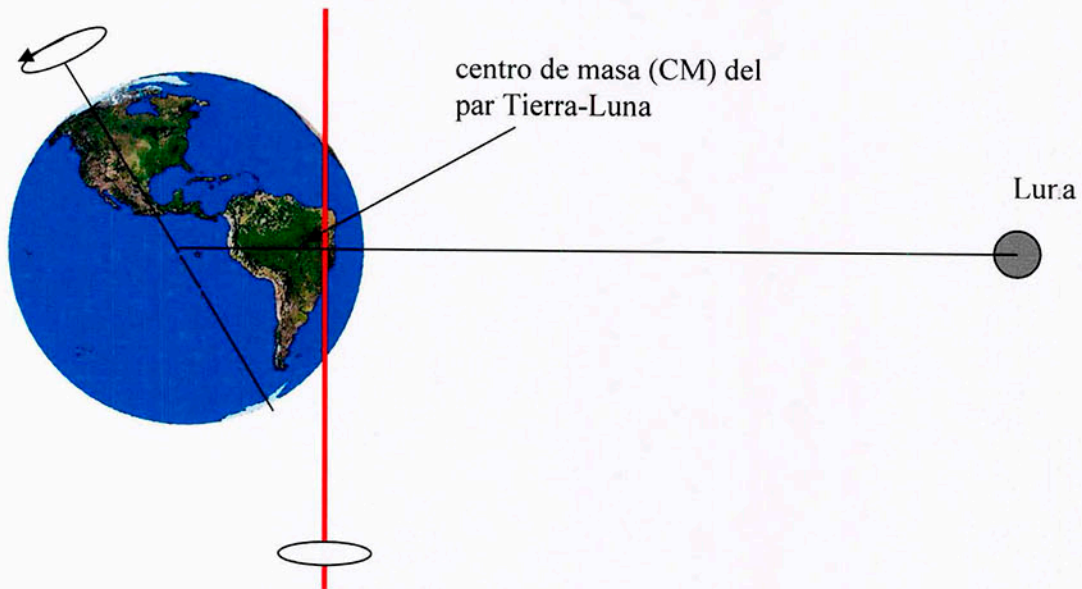
TTE. CORB. SMAM. OCEAN. Carlos Alberto Rivas García

CAP. NAV. CG. DEM. Luis I. Islas Martínez de Pinillos

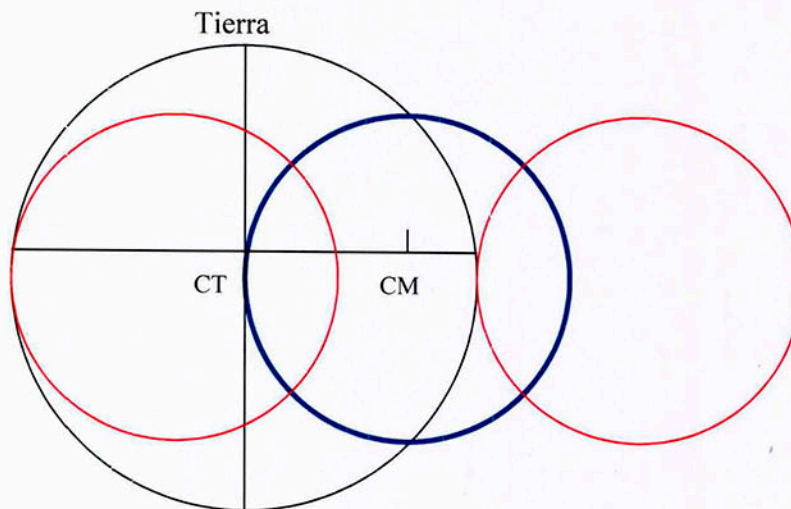
1. CAMBIOS PERIÓDICOS EN EL NIVEL DEL MAR

MAREA ASTRONÓMICA

Analicemos la fuerza centrífuga en la Tierra debido a la rotación del par Tierra-Luna:



La rotación del par Tierra-Luna alrededor del centro común de masa genera una fuerza centrífuga en la Tierra que tiene la misma magnitud en cada punto del planeta. Observando este sistema desde \rightarrow arriba, sin considerar la rotación diaria del planeta sobre su eje, vemos que el centro de la Tierra (CT) describe una trayectoria circular alrededor del centro de masa del par Tierra-Luna durante cada ciclo lunar o mes lunar. Cualquier otro punto (P) de la Tierra describe trayectorias circulares semejantes. A esto se debe que la fuerza centrífuga sea igual en cualquier punto de la Tierra, ya sea en su interior o en su superficie.



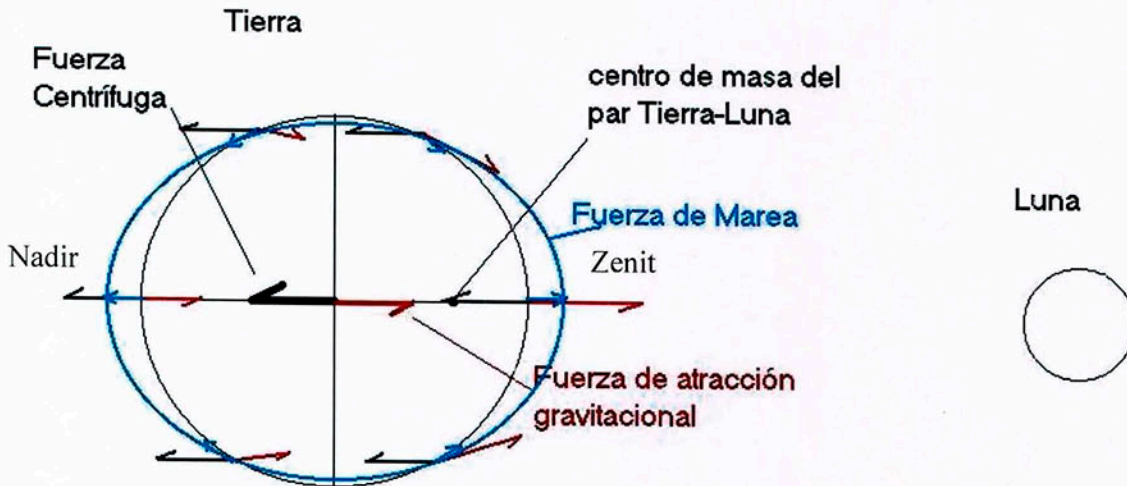
La fuerza centrífuga en este sistema de dos astros tiende a separarlos pero la fuerza de atracción gravitacional entre ellos no permite que se separen.

La teoría de la gravitación universal de Newton es uno de los productos más grandiosos del intelecto humano y permite definir la fuerza de atracción entre dos astros de masas m_1 y m_2 separados por una distancia r .

$$F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

TEORÍA DE MAREAS (LA MAREA DE EQUILIBRIO)

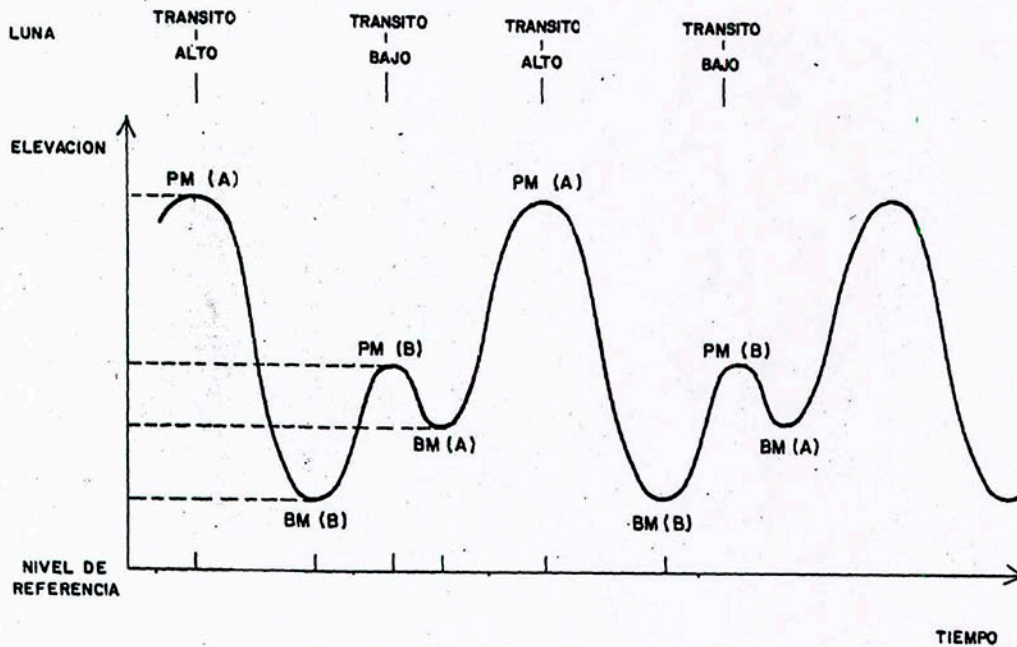
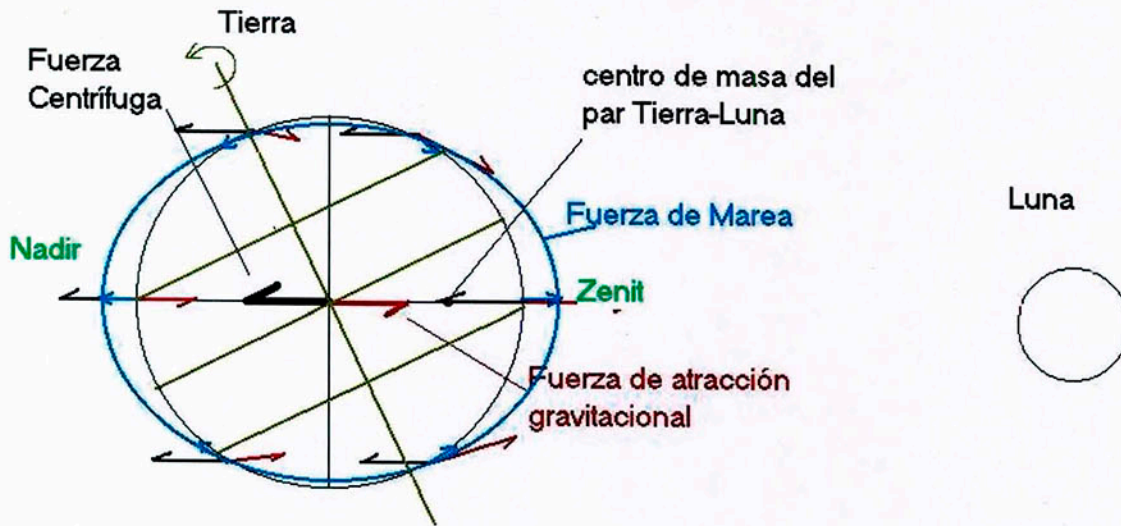
La fuerza de marea que la Luna ejerce sobre la Tierra es la suma vectorial de la fuerza de atracción gravitacional y de la fuerza centrífuga del par Tierra-Luna. Esta suma de fuerzas permite definir la marea de equilibrio en la Tierra.



	Zenit	Centro de la Tierra	Nadir	
Fuerza de Atracción		$Gm/(r-a)^2$	Gm/r^2	$Gm/(r+a)^2$
Fuerza Centrífuga		$-Gm/r^2$	$-Gm/r^2$	$-Gm/r^2$
Fuerza de Marea		$Gm[1/(r-a)^2 - 1/r^2]$	0	$Gm[1/r^2 - 1/(r-a)^2]$

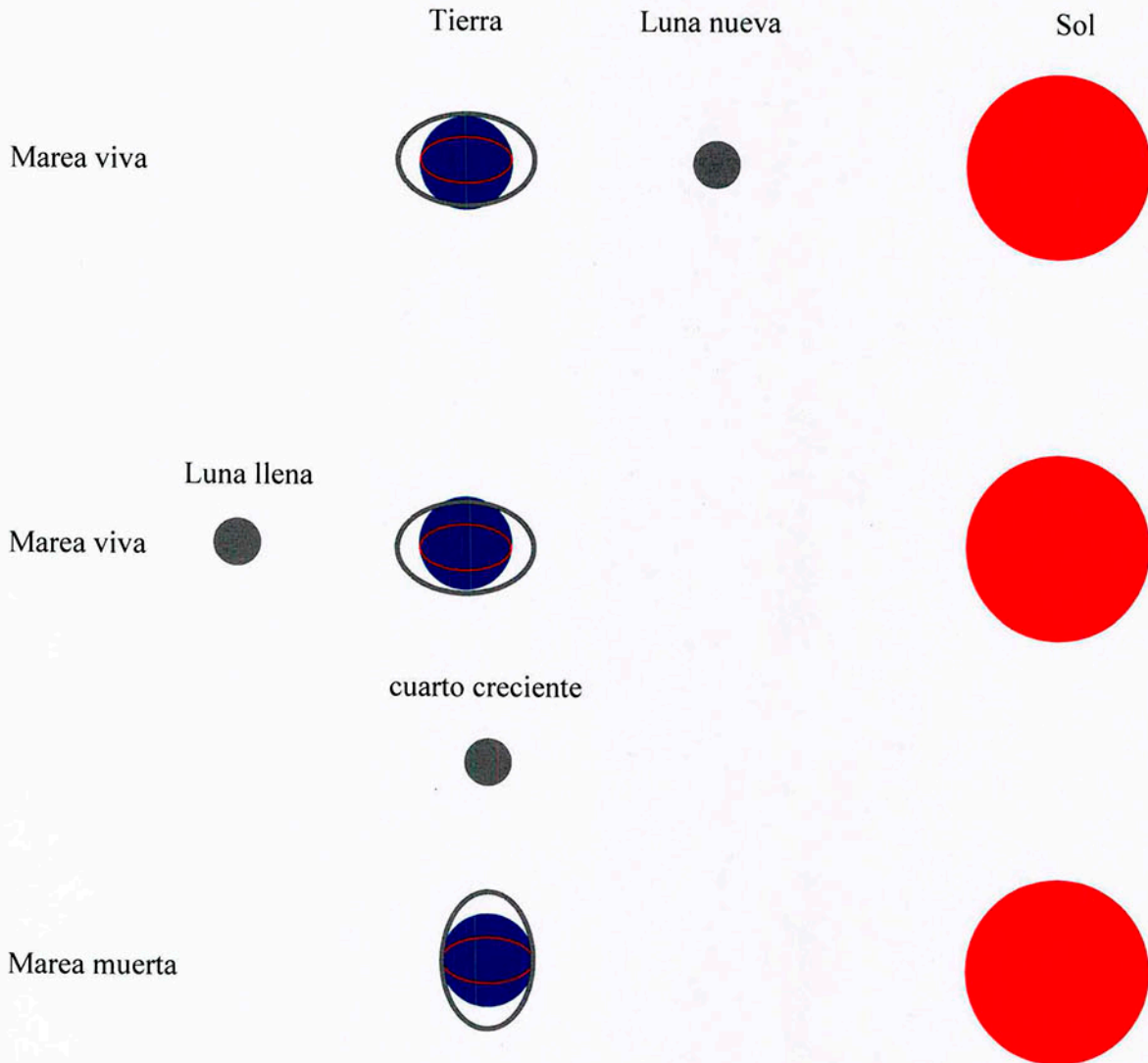
en donde "r" es la distancia de la Luna con masa "m" a un punto de masa unitaria en una Tierra de radio "a".

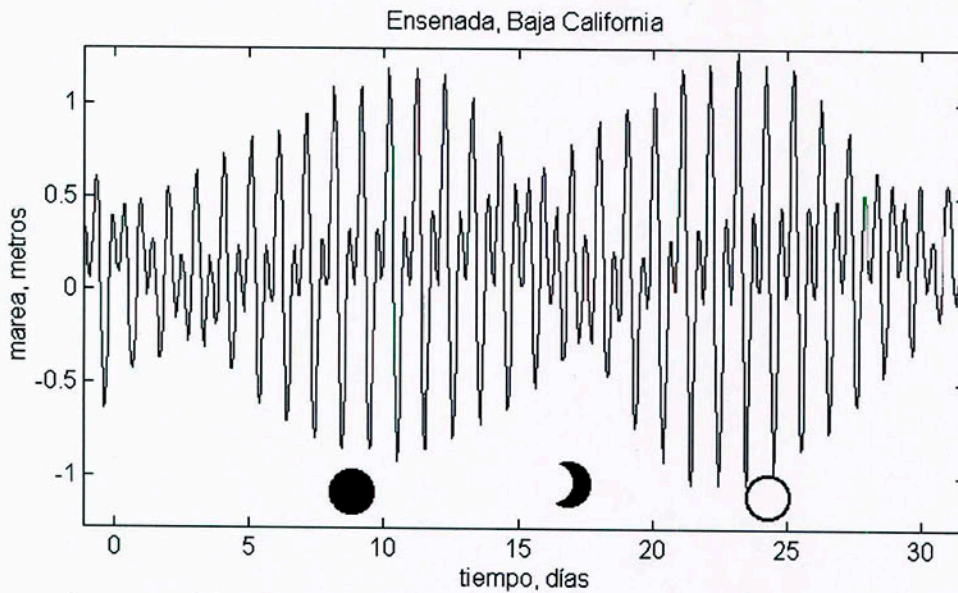
La inclinación del eje de rotación de la tierra con respecto a la eclíptica permite explicar la desigualdad diaria de la fuerza de marea en un punto sobre la superficie de la Tierra.



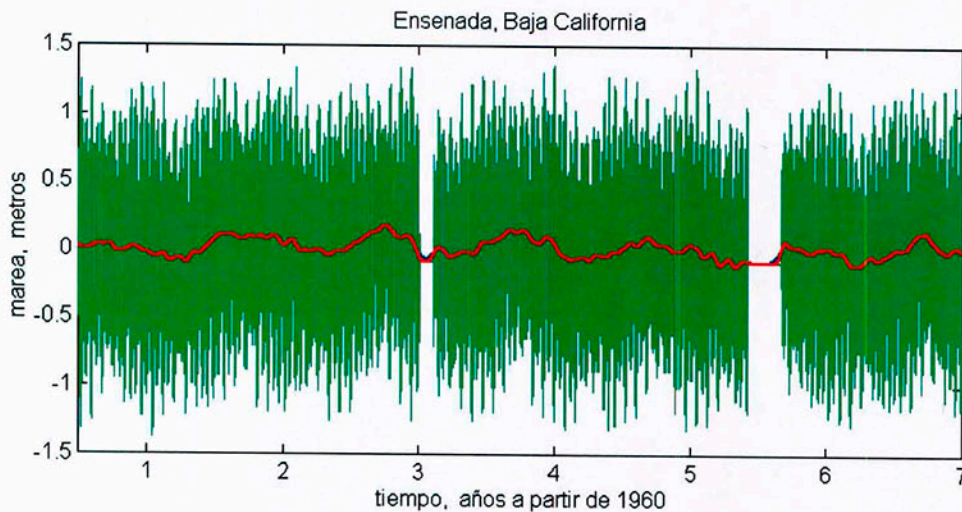
Con fines prácticos se puede considerar que el Sol y la Luna son los dos astros que generan la marea en la Tierra. La fuerza de marea generada por el Sol es 2.17 veces menor que la fuerza de marea generada por la Luna. Sin embargo, la fuerza de atracción directa del Sol es aproximadamente 180 veces más grande que la ejercida por la Luna.

La posición relativa de la Tierra el Sol y la Luna permite explicar la periodicidad de las “mareas vivas (spring tides)” y de las “mareas muertas (neap tides)” que ocurren 2 veces cada mes lunar. La mareas grandes o mareas vivas ocurren cuando el Sol y la Luna están alineados con la Tierra, ya sea en Luna Llena o en Luna nueva, debido a la marea de equilibrio. La mareas pequeñas ocurren cuando el Sol y la Luna están en cuadratura con respecto a la Tierra.





La fuerza de marea del Sol depende de la distancia entre el Sol y la Tierra durante el año. Por ejemplo, en el Hemisferio Norte la marea es mayor en invierno que en verano y es igual durante los equinoccios. Estas posiciones generan períodos de semianuales y anuales en la fuerza de marea.



El período largo más significativo en la fuerza de marea es originado por la variación en la inclinación de la órbita de la luna relativa al ecuador terrestre. Esta inclinación varía de 18.5° a 28.5° completando un ciclo cada 18.6 años. Este es el motivo por el que es importante observar las mareas durante varios periodos de 18.6 años para obtener una estadística significativa en todo el espectro de mareas.

Otro período largo pero más sutil que el anterior es el que produce la variación en la inclinación del eje de rotación del planeta: varía 3 segundos de arco con respecto a su posición geográfica media en un período de 435 días. Esta variación es conocida como el

Efecto Chandler en honor a Seth Chandler que en 1891 confirmó la existencia de este fenómeno. Este efecto es también conocido como “marea polar”.

El esfuerzo y la dedicación de Darwin (1907) y Doodson (1921), entre otros, estudiando la ecuación de la Fuerza de Marea, ha resultado en el conocimiento del espectro de la Fuerza de Marea, también conocido como el conjunto de constantes armónicas de la marea.

TABLA I. Algunas de las cientos de constantes armónicas de la marea

Símbolo	Frecuencia grados por hora	Periodo	Amplitud relativa
M_N	0.0022	6818.2 días	0.0655
Sa	0.0411	364.96 días	0.0118
Ssa	0.0821	182.70 días	0.0729
MSm	0.4715	31.81 días	0.0158
Mm	0.5444	27.55 días	0.0825
MSf	1.0159	14.76 días	0.0137
Mf	1.0980	13.66 días	0.1564
MfN	1.1002	13.63 días	0.0648
Mt	1.6424	9.13 días	0.0300
Mtt	1.6446	9.12 días	0.0124
Q_1	13.3987	26.86 horas	0.0722
O_1	13.9430	25.81 horas	0.3769
P_1	14.9589	24.06 horas	0.1785
K_1	15.0411	23.93 horas	0.5305
J_1	15.5854	23.09 horas	0.0296
OO_1	16.1391	22.30 horas	0.0162
$2N_2$	27.8953	12.90 horas	0.0230
μ_2	27.9682	12.87 horas	0.0278
N_2	28.4397	12.65 horas	0.1739
ν_2	28.5126	12.62 horas	0.0330

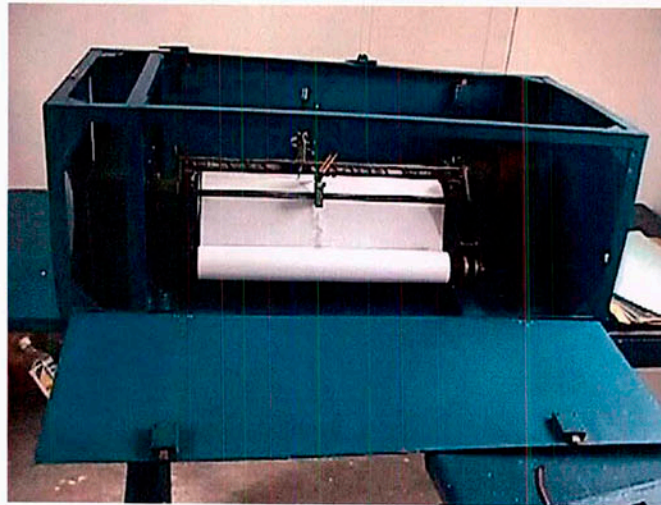
M ₂	28.9841	12.42 horas	0.9081
L ₂	29.5285	12.19 horas	0.0257
T ₂	29.9589	12.01 horas	0.0248
S ₂	30.0000	12.00 horas	0.4236
K ₂	30.0821	11.96 horas	0.1151

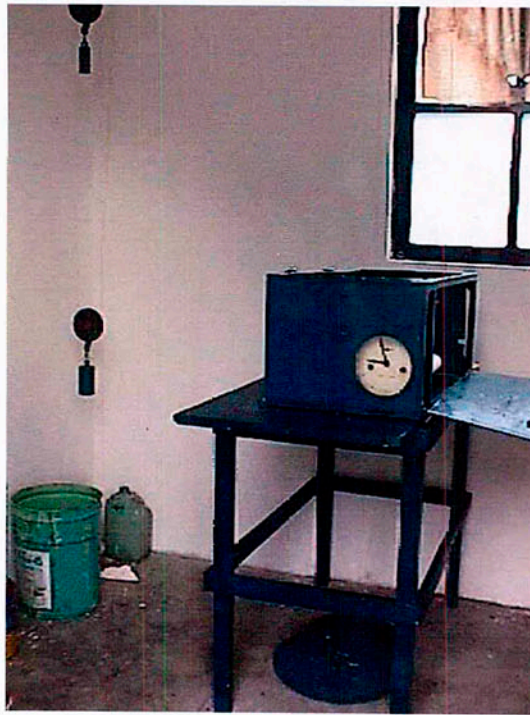
Darwin G.H., 1907. Reports on a Committee for the harmonic analysis. Univ. Press, Cambridge, 1907.

Doodson A.T., 1921. The harmonic development of the tide-generation potential. Proc. Roy. Soc. London, 1921.

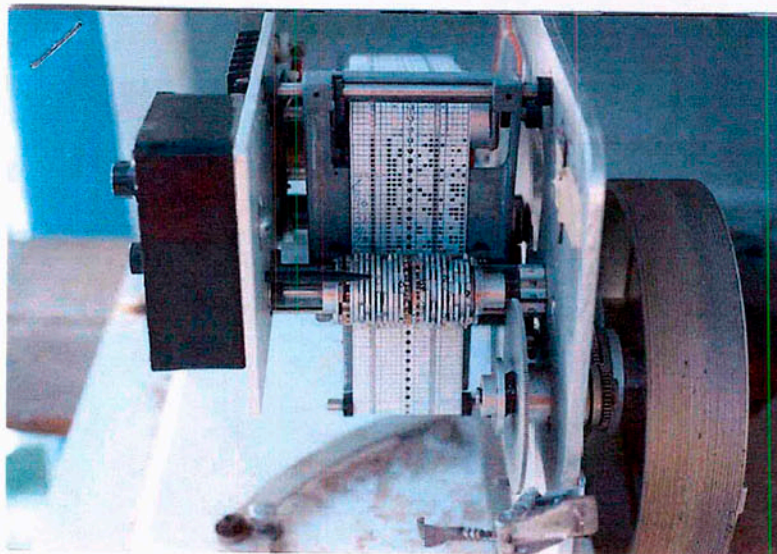
Nota: Al finalizar la etapa descriptiva se continuará con ejercicios en laboratorio para calcular las constantes armónicas de la marea con el método de Mínimos Cuadrados y posteriormente se procederá al cálculo de predicciones de marea.

TIPOS INSTRUMENTOS (MAREÓGRAFOS) PARA MEDIR EL NIVEL DEL MAR





MAREÓGRAFO ANALÓGICO (Matarani, Perú)





Mareógrafo analógico con registro digital en papel perforado
(Bahía de Los Angeles, Baja California)

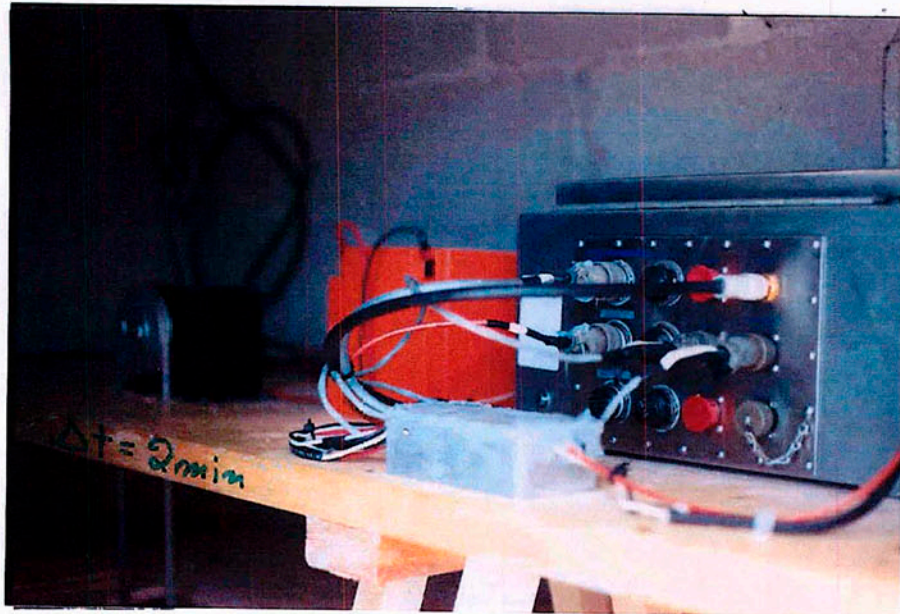


ARMADO DE LA LOSA CON VAPILLA DE 3/4" AMARRADA AL ARMADO DEL "DUQUE DE ALBA". SE INSTALAN BARRAS DE ACERO INOXIDABLE QUE ATRAVIESAN LOS TUBOS DE ASBESTO PARA EVITAR DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DE LOS MISMOS.

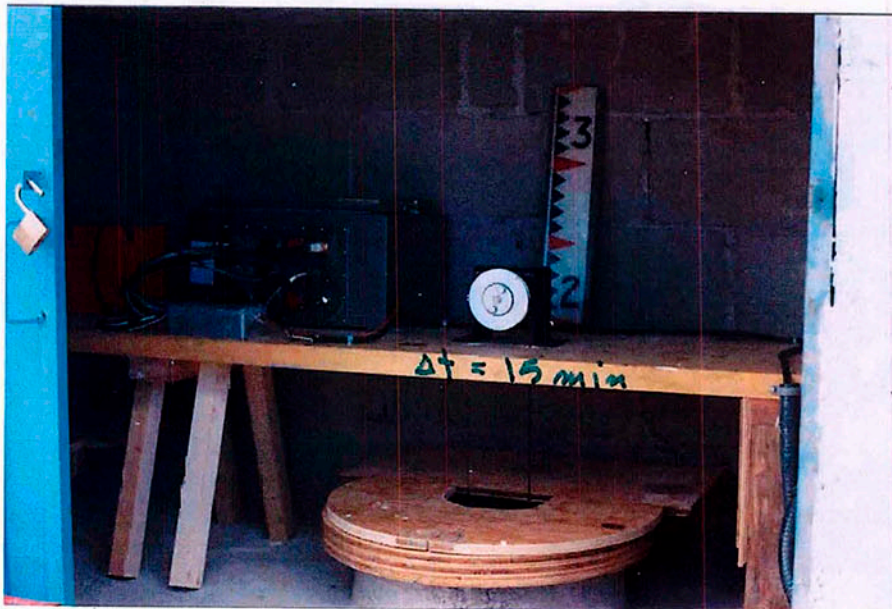


EN EL BORDE DE LA LOSA DE 20 CM. DE ESPESOR SE CONSTRUYO UNA CASETA DE BLOQUES CON CAPELLLOS ENCAJADOS.

Estación mareográfica en construcción (Cabo ^SSan Lucas, Baja California Sur)



VISTA SUPERIOR DE LA ESTACION EN CABO SAN LUCAS, B.C.S.
DE IZQUIERDA A DERECHA: CODIFICADOR CON INTERVALO DE MUESTREO DE 2 MIN.;
BATERIA DE 12 V.; ESTACION HUIDAR; AL FRENTE APARECE EL REGULADOR DE
VOLTAJE.

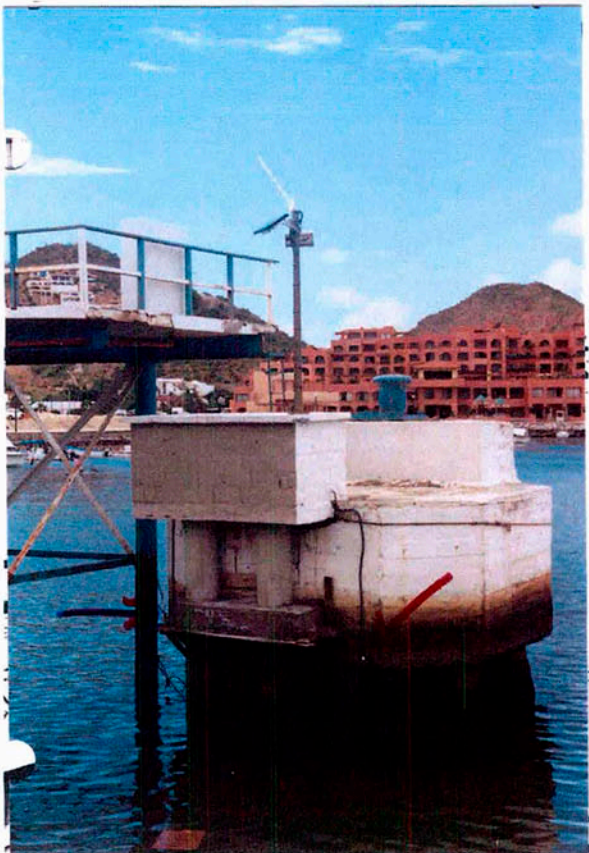


A LA DERECHA SE APRECIA EL SEGUNDO CODIFICADOR DIGITAL DEL NIVEL DEL MAR
CON INTERVALO DE MUESTREO DE 15 MIN.

Mareógrafo analógico con registro digital electrónico
(Cabo San Lucas, Baja California Sur)



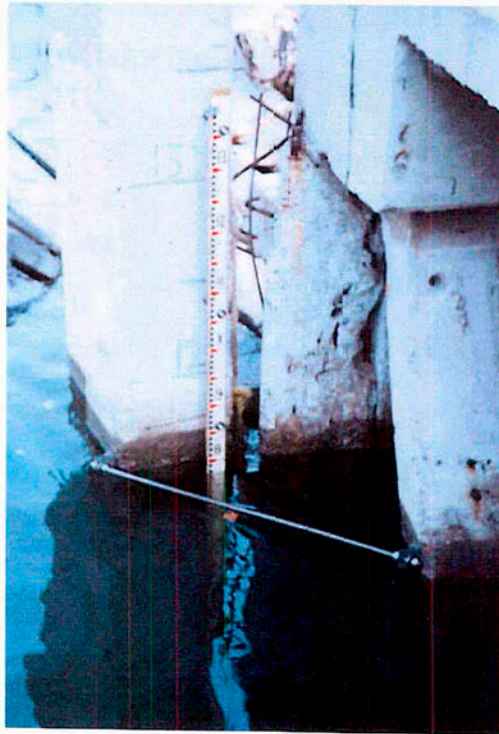
VISTA DE FRENTE DE LA ESTACION MAREOGRAFICA EN CABO SAN LUC (ARRIBA).



VISTA POSTERIOR DE LA ESTACION MAREOGRAFICA EN CABO SAN LUC. SE MARCAN CON FLECHAS LOS OBJETOS ELECTRONICOS.

Primer estación mareográfica México con telemetría
(Cabo San Lucas, Baja California Sur, 1990)





Primer mareógrafo digital acústico en México
(Manzanillo, Colima 1992)



BAHÍA VARGAS LOZANO, ISLA SOCORRO Rev. Dic. 1991.
SE INDICAN, EL LUGAR EN DONDE SE INSTALARA LA CASETA DEL MAREÓGRAFO Y EL LUGAR EN DONDE SE INSTALARAN
LOS SENSORES DE LA ESTACION.



Líneas de nitrógeno para medir la presión diferencial

Isla Socorro, México. 1992

2. CAMBIOS EN EL NIVEL DEL MAR DEBIDO A EFECTOS ATMOSFÉRICOS Y OCEANOGRÁFICOS

PRESIÓN ATMOSFÉRICA – NIVEL DEL MAR

En el lugar en donde se hacen observaciones de nivel del mar es muy importante medir la presión atmosférica. Esto se debe a que una variación de 1 milibar en la presión atmosférica produce una variación de 1 centímetro en el nivel del mar. Es como un barómetro invertido. Un aumento de 1 milibar hace que el nivel del mar disminuya 1 centímetro. Este efecto es difícil de observar directamente debido a que en general los cambios de presión atmosférica están acompañados por el viento que a su vez genera cambios en el nivel del mar.

Considerando una presión atmosférica estándar de 1000 milibares como referencia, la diferencia entre el promedio anual de presión atmosférica y la presión estándar ($P - 1000$) produce cambios de hasta 10 centímetros en el nivel del mar.

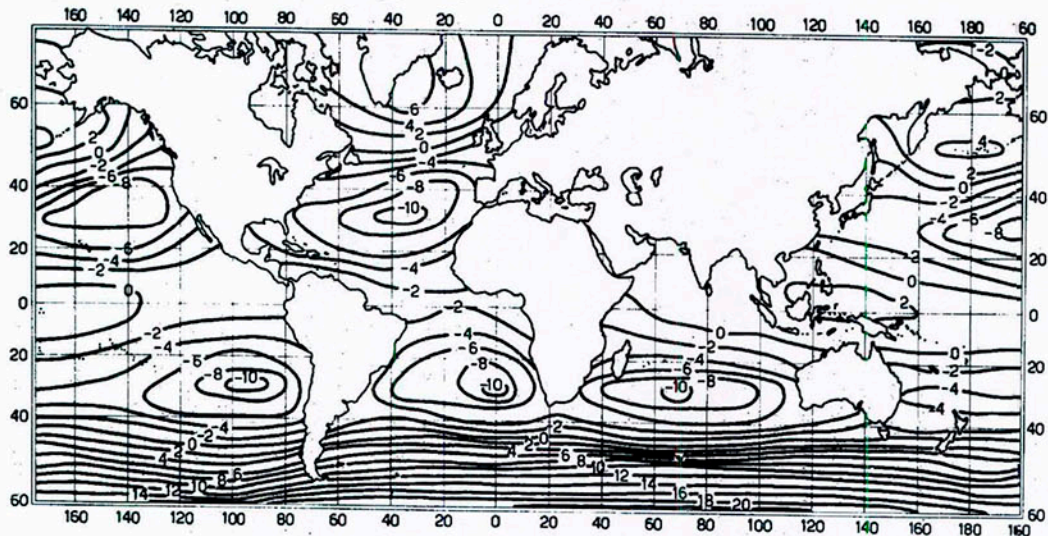
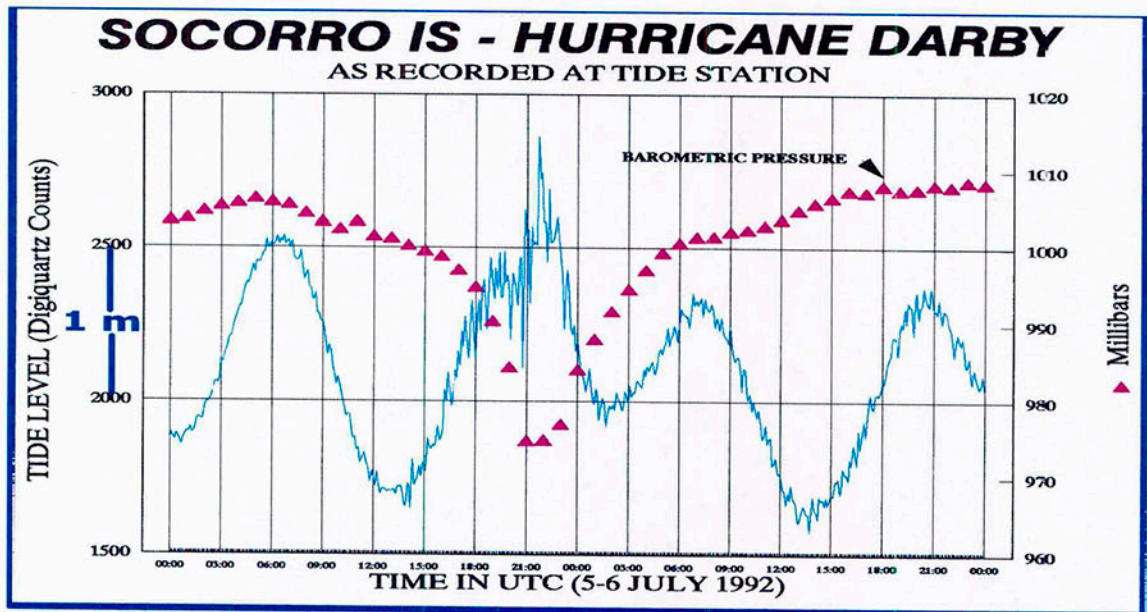


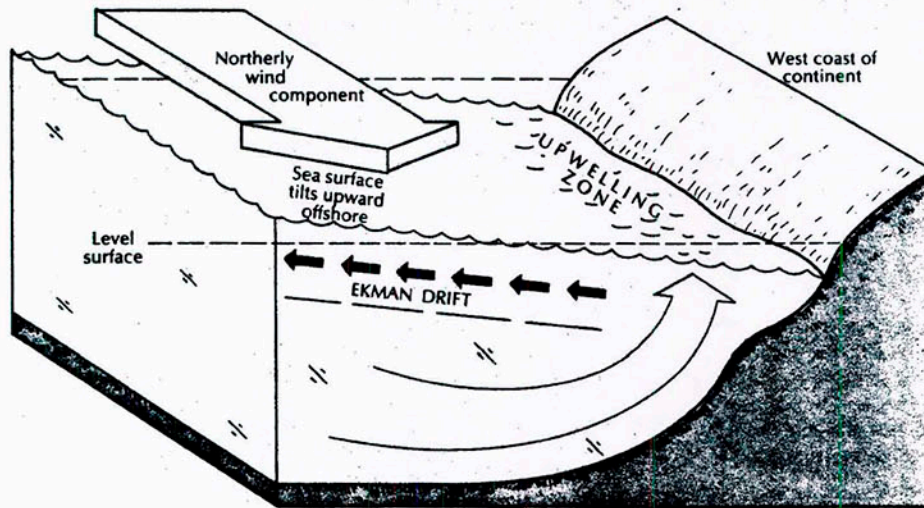
Fig. 15. The distribution of the average sea-level differences (in cm) caused by atmospheric pressure (Lisitzin, 1961b).

Al paso de los huracanes disminuye drásticamente la presión atmosférica y se puede observar el correspondiente cambio en el nivel del mar (+20cm) combinado con el cambio en el nivel del mar debido al apilamiento de agua por la tracción del viento.



ARRASTRE DEL VIENTO – NIVEL DEL MAR – SURGENCIA!!!

Cuando un viento moderado casi constante ejerce tracción sobre la superficie del mar genera un transporte neto de agua en dirección perpendicular a la dirección del viento y genera un cambio en el nivel del mar. Ambos efectos se deben a la rotación del planeta. En el siguiente esquema se ilustran los efectos de un viento soplando en dirección paralela a la costa en el Hemisferio Norte.



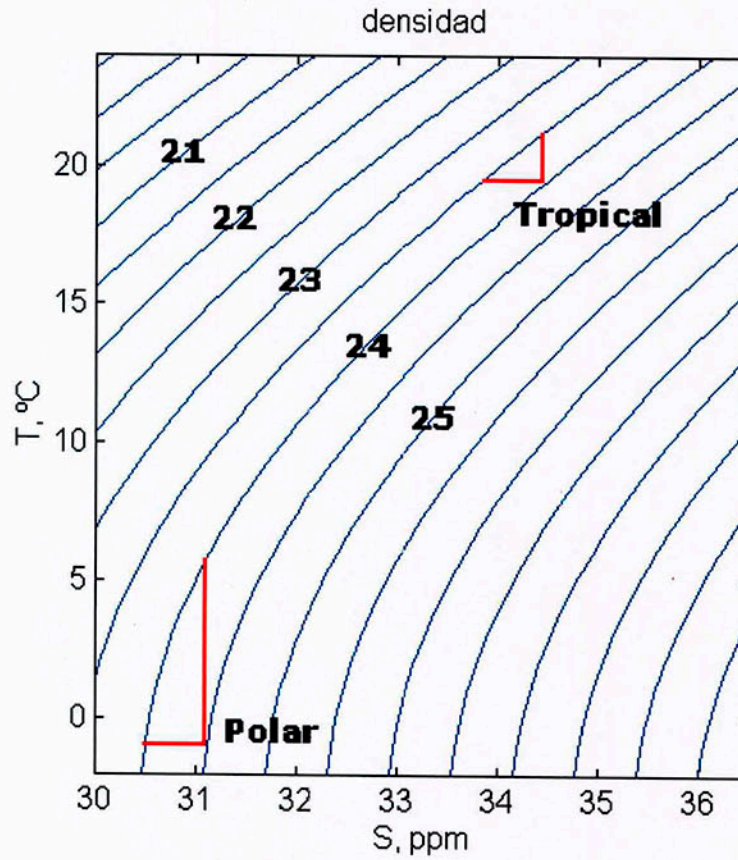
DENSIDAD DEL AGUA DE MAR – NIVEL DEL MAR

La densidad del agua de mar depende de la Temperatura, de la Salinidad y de la Presión.

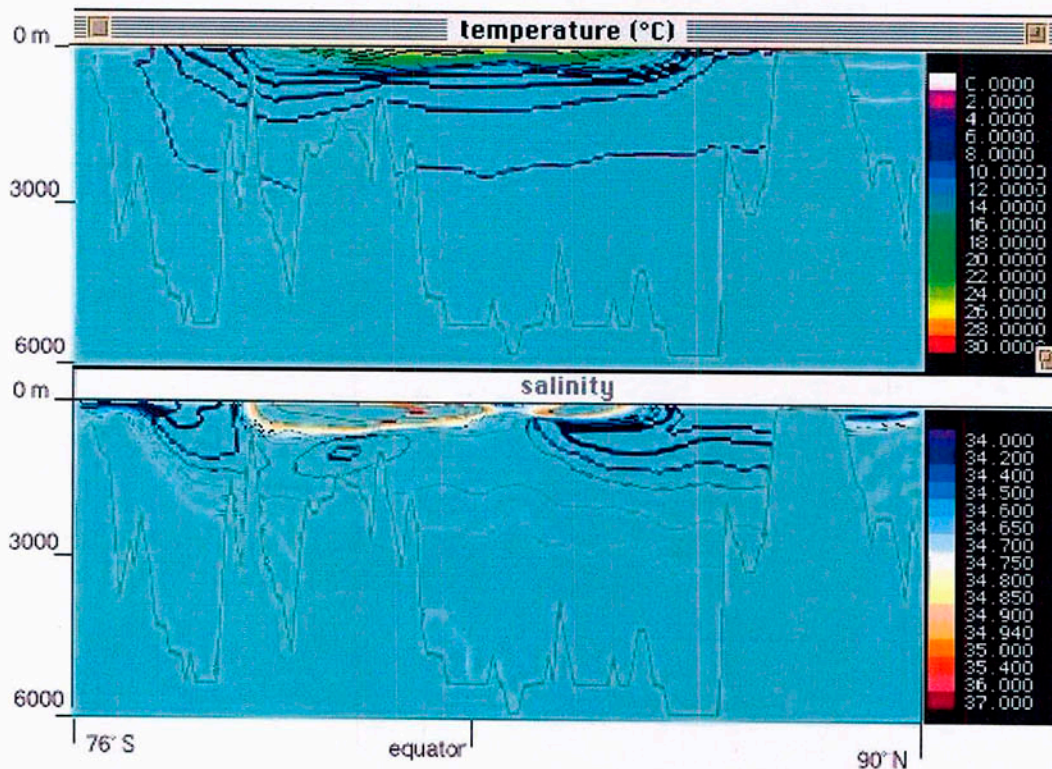
Una forma práctica de representar la densidad del agua de mar es en unidades sigma-t:

$$\sigma_t \equiv [\rho(T, S, 0) - 1] \times 1000.$$

En un diagrama de densidad en unidades sigma-t se puede apreciar la importancia de los cambios de Temperatura y de Salinidad en las diferentes latitudes. En las regiones polares se requiere un mayor cambio en la temperatura para cambiar la densidad del agua, mientras que en ambas regiones (polar y tropical) los cambios en la salinidad producen cambios similares en la densidad.



En el mar existen dos capas de agua. Una capa superficial bien mezclada por el viento hasta profundidades de 200 a 500 metros y una capa profunda desde la termoclina hasta el fondo del mar que mantiene su temperatura casi constante. En la capa superior del mar es en donde ocurren los mayores intercambios de calor masa y momento con la atmósfera.



Los cambios en la densidad de la capa superior producen cambios en el nivel del mar. Los cambios a mayor escala geográfica en la densidad se deben principalmente a cambios en la temperatura. En regiones particulares del mar ocurren cambios importantes en la densidad por procesos de evaporación-precipitación y aporte de agua por ríos.

Cuando la capa superior del mar tiene una profundidad “D”, un incremento “ ΔT ” en la temperatura produce un incremento “ Δh ” en el nivel del mar:

$$\Delta h = \alpha D \Delta T$$

Región	Temp. °C	ΔT °C	$\alpha 10^{-3}$	D(m)	Δh (cm)
Trópicos	30	1	3.4	100	3.4
Lat-Medias	10	3	1.7	400	20
Polos	0	4	0.8	1000	32

3. VARIACIONES GLOBALES EN EL NIVEL MEDIO DEL MAR

EL NIÑO 1982-1983

En los siguientes esquemas observaremos las variaciones en el nivel medio del mar (en milímetros) en el Océano Pacífico. Estas variaciones se deben principalmente a cambios en

la temperatura de la capa superior del mar. En julio-82 se observa una anomalía positiva mayor que 100 mm en el Pacífico Central. Esta anomalía en el nivel medio del mar nos indica la presencia de una gran "alberca" de agua caliente. En los meses subsecuentes la "alberca" de agua caliente se desplaza hacia el Oeste y llega a Perú en diciembre afectando drásticamente las pesquerías y aumentando el nivel medio del mar unos 40 cm. Dirían los peruanos... ¡Mira nomás el regalito que nos hizo el Niño Dios! Así se le dio el nombre al Fenómeno del Niño. En los siguientes meses el agua caliente se desplaza tanto al Norte como al Sur por las márgenes continentales de América alterando los patrones climáticos de temperatura ambiente y precipitación e intensificando los huracanes y aumentando el nivel medio del mar en su recorrido tanto al Norte como al Sur.

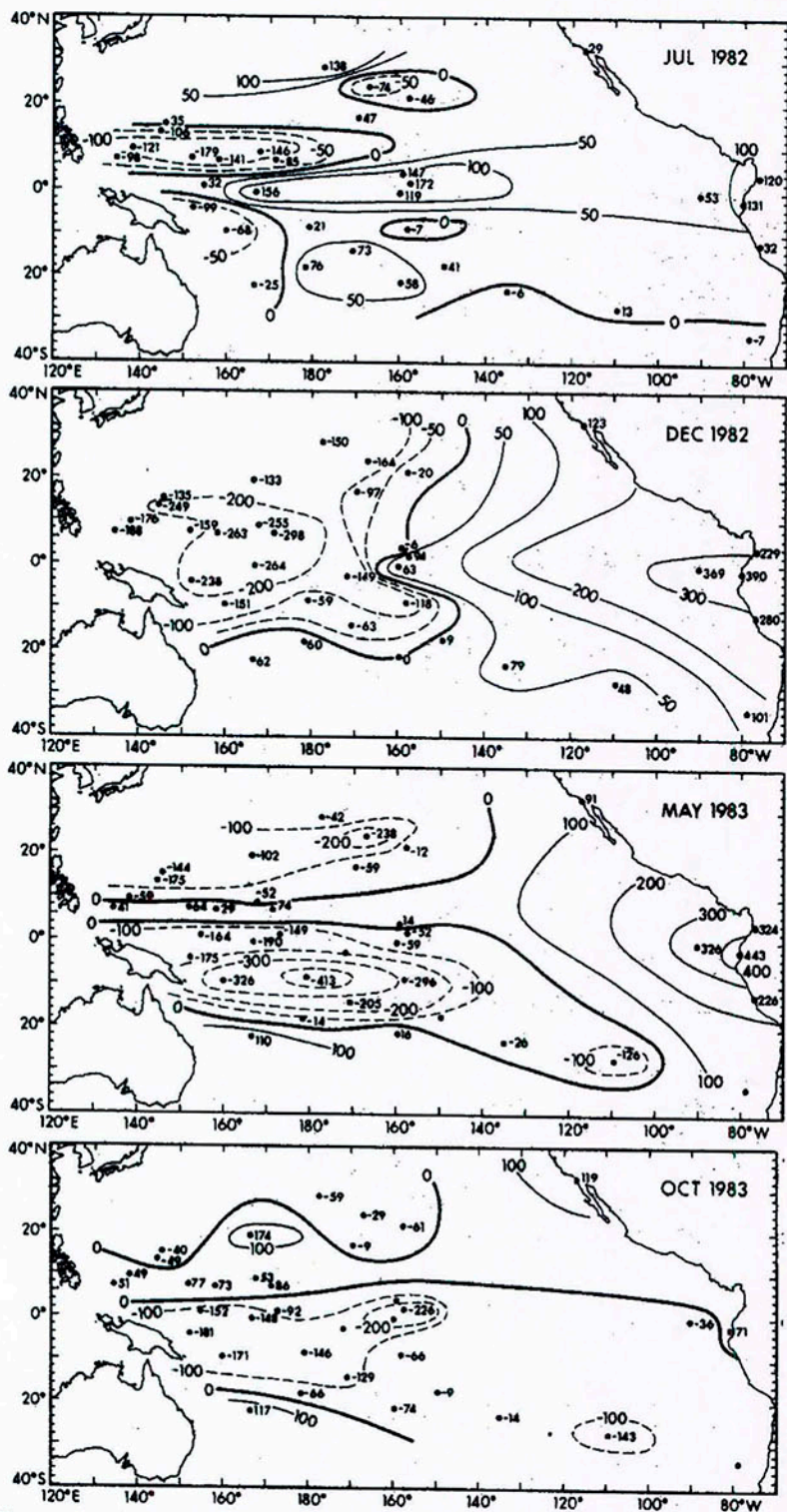


Fig. 2. Anomaly of monthly mean sea level in July 1982, December 1982, May 1983 and October 1983 in mm.

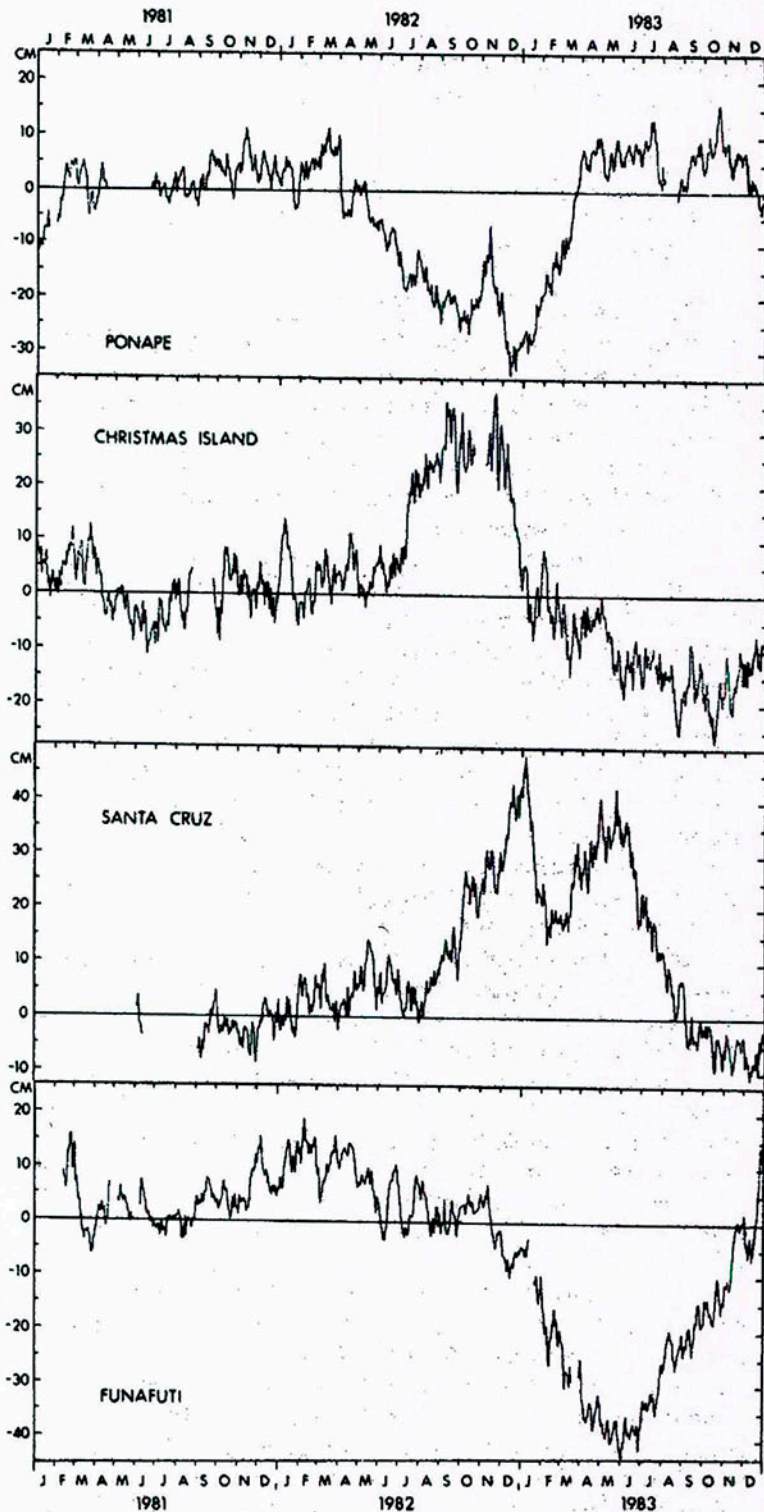


Fig. 1. Daily mean sea level at Ponape, Christmas Island, Santa Cruz and Funafuti from 1981 to 1983 in cm relative to the long term mean

Variaciones en el nivel medio del mar y en la temperatura superficial propagándose al Sur en los años 1950 a 1979.

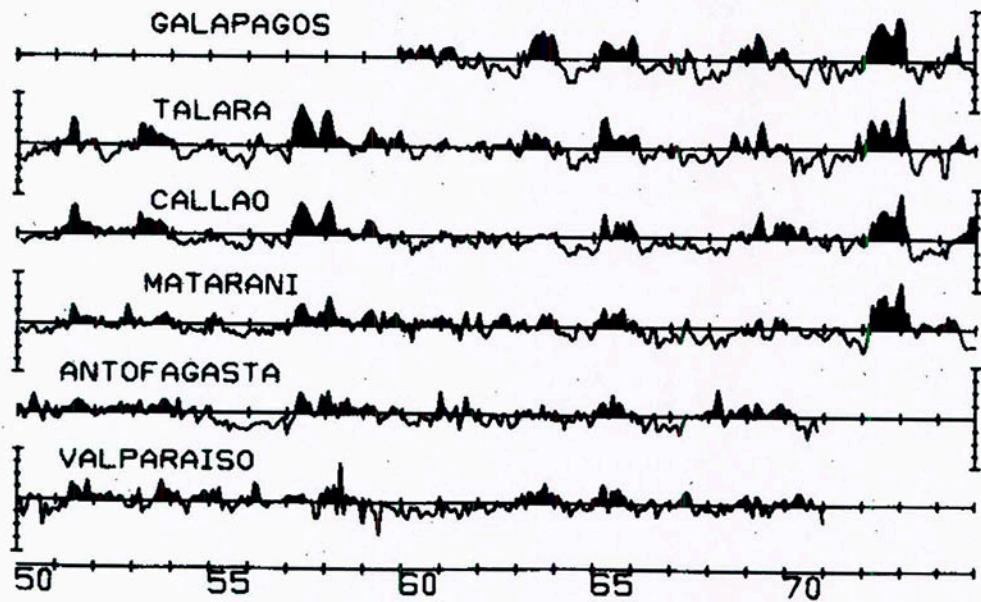
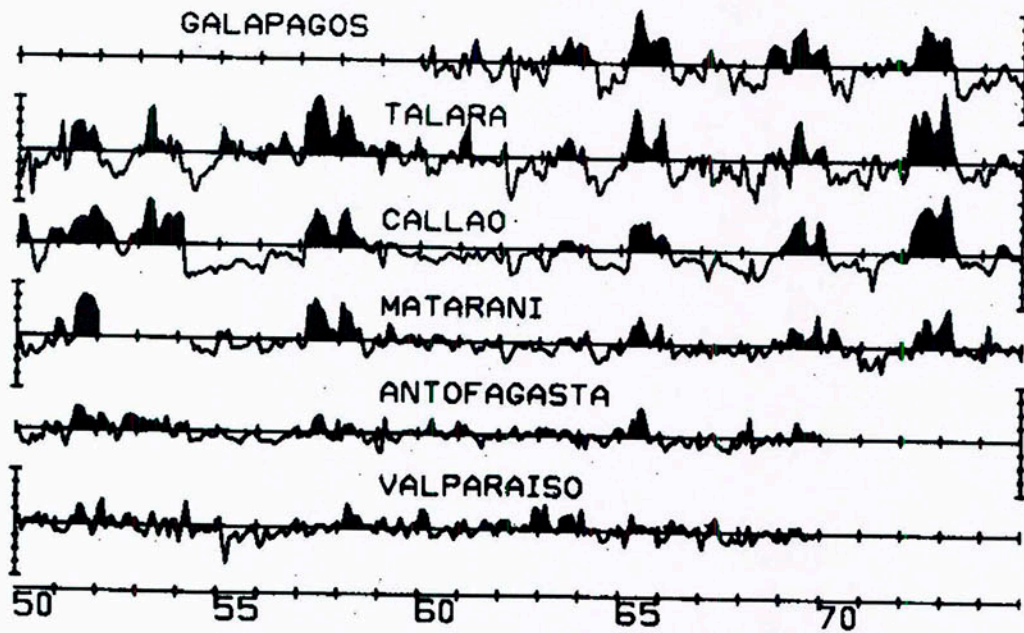


FIG. 4a. Time series of monthly anomalies of sea level from 1950 to 1974, inclusive. Positive anomalies are shaded black.



shore temperatures.

¿NIVEL MEDIO DEL MAR? (Calentamiento Global - Variabilidad Interdecadal)

En algunos lugares se iniciaron observaciones sistemáticas del nivel del mar hace más de 100 años con la finalidad de establecer un Datum (nivel de referencia) de partida para nivelaciones geodésicas y para hacer predicciones de marea. La dedicación y la constancia con las que se ha logrado obtener estos registros hacen que sea realmente un privilegio analizar el nivel del mar. Estos registros de período largo (100 años) han sido y son objeto de estudio para determinar cambios en el nivel del mar inducidos por el calentamiento del planeta y por movimientos verticales de la corteza terrestre. En el esquema observaremos los promedios anuales en 6 de estos registros partiendo del año 1890 hasta 1980. En general se puede decir que el nivel del mar tiene una tendencia a aumentar 1.5 mm por año. Sin embargo, la variabilidad interdecadal tiene una desviación estándar de hasta 7 centímetros. Observando la siguiente figura nos hacemos la pregunta: ¿QUÉ NIVEL TIENE EL NIVEL MEDIO DEL MAR?

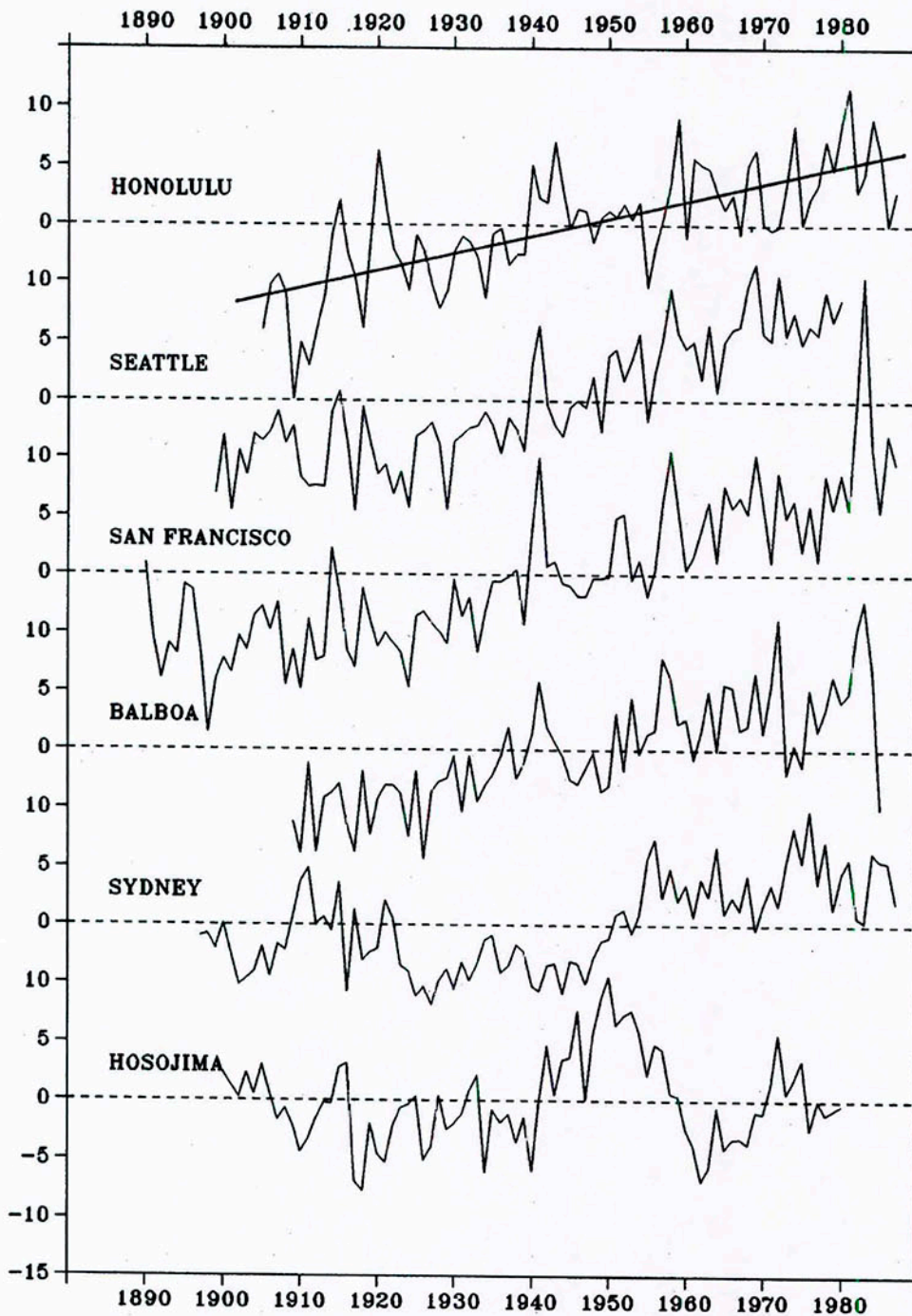


FIGURE 2. Annual mean sea level (in centimeters) at six stations on the Pacific Ocean with long records. The linear trend of sea level rise at Honolulu is 1.5 mm per year or 15 cm per century.

Para estudiar con certidumbre la tendencia en el nivel del mar es muy importante obtener registros continuos y de período largo (¿siglos?). En la siguiente figura se puede apreciar la influencia de la variabilidad interdecadal en el cómputo de la tendencia global del nivel del mar. La tendencia en lapsos de 10 años es variable y en algunos lapsos es negativa!

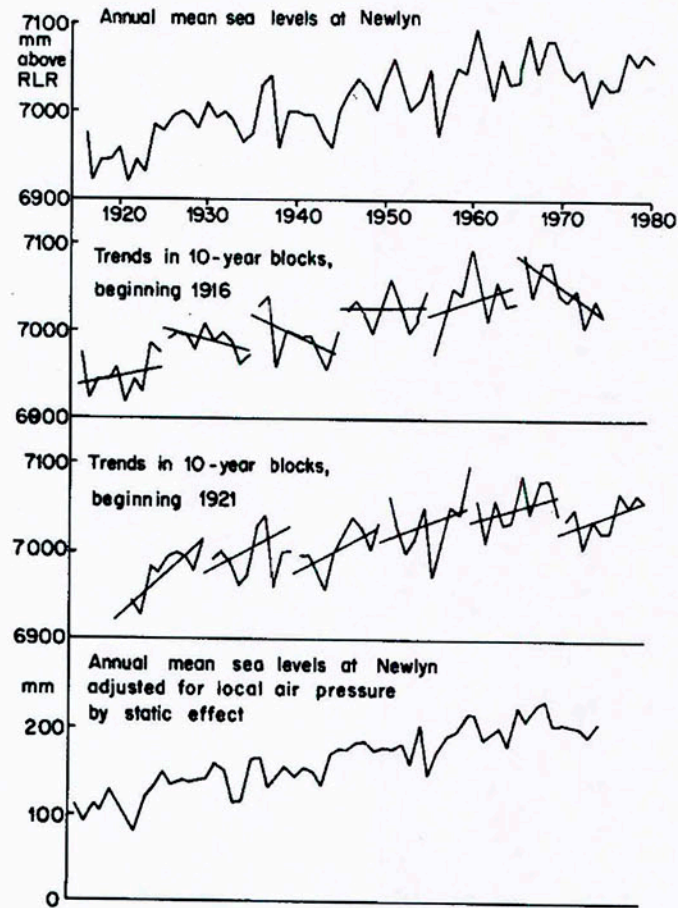


FIGURE 3. Comparison of trends in annual mean sea level at Newlyn, England, taking successive 10-yr blocks from 1916 and from 1921. The figure at bottom shows the reduction in noise that results after correcting for the mean annual air pressure. (From Pugh 1987: used by permission)

4. CAMBIOS SÚBITOS Y DE PERÍODO LARGO EN EL NIVEL DEL MAR

Movimientos verticales de la corteza terrestre
Efecto de terremotos en el nivel medio del mar
Tsunamis

En algunos casos el análisis de la tendencia en el nivel del mar indica sin lugar a dudas la influencia de los movimientos verticales en la corteza terrestre. En la siguiente figura se muestra el caso particular de Honolulu y Hilo (Hawaii). La tendencia en el nivel del mar en Honolulu es 1.5 mm/año mientras que en Hilo es 3.8 mm/año. ¿Se está hundiendo Hilo debido al continuo afloramiento de lava?

Review Article: Sea Level Rise—WYRTKI

5

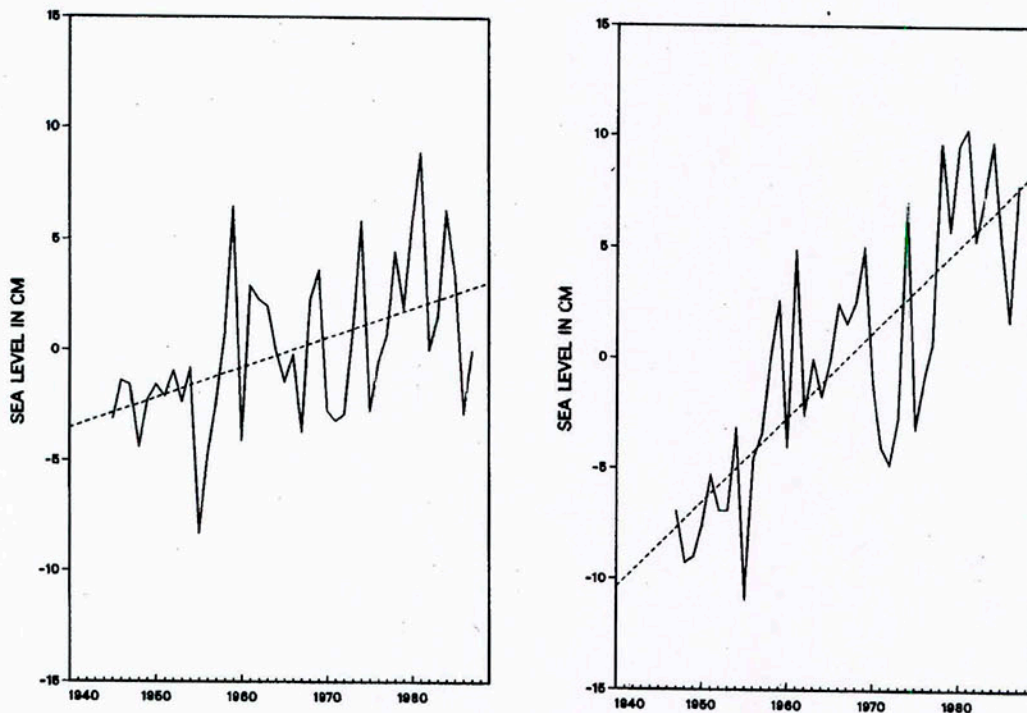
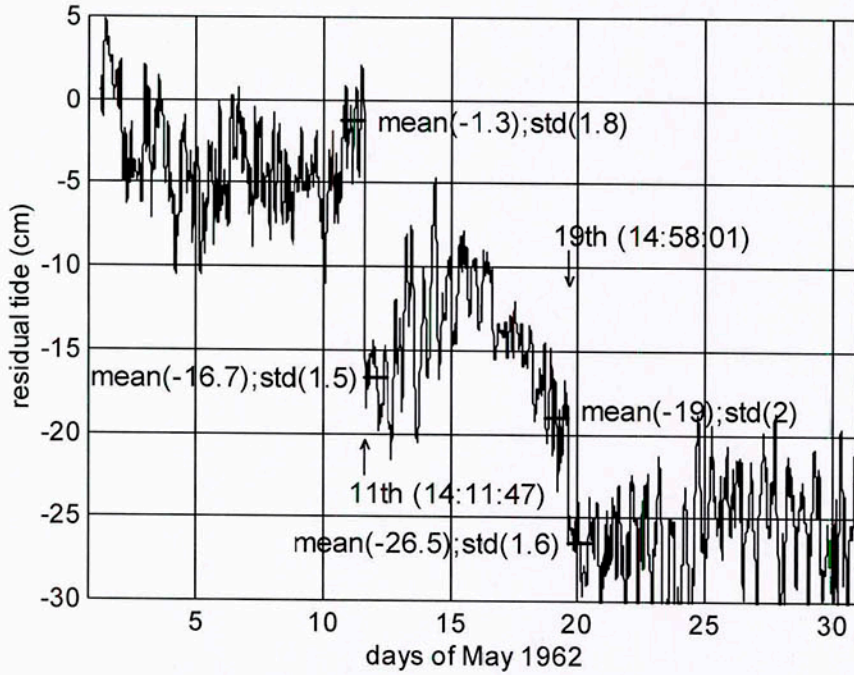


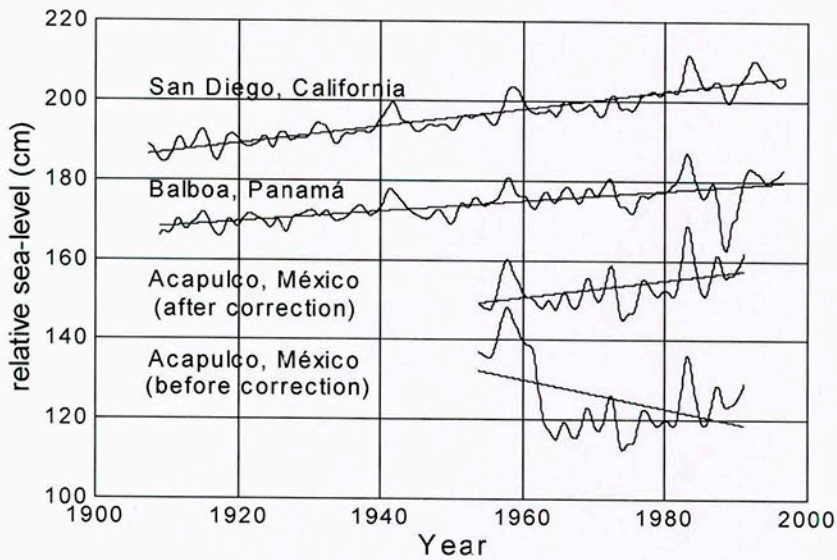
FIGURE 4. Annual mean sea level (in centimeters) at Honolulu (left) and Hilo (right) in the Hawaiian Islands from 1947 to 1987, and linear trend.

Se debe tener mucho cuidado en el cómputo de tendencias en el nivel del mar en regiones con actividad sísmica. En estas regiones la corteza terrestre experimenta elevaciones súbitas que van desde escasos centímetros hasta varios metros. Por ejemplo, los sismos de

Acapulco del 11 y del 19 de mayo de 1962 provocaron elevaciones en la corteza de 15 y de 7 centímetros respectivamente.

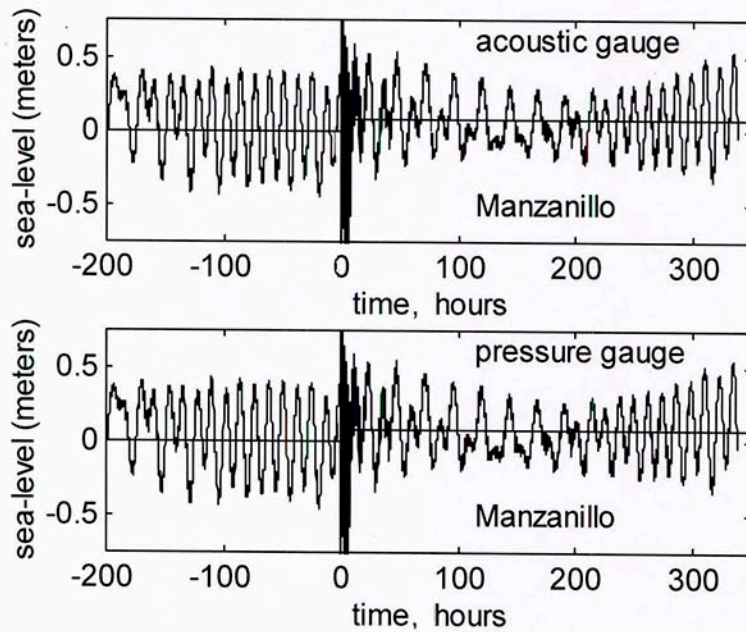


Nivel del mar en Acapulco indicando elevación de la corteza terrestre de 15 cm y de 7 cm inducida por los sismos del 11 y del 19 de mayo de 1962.

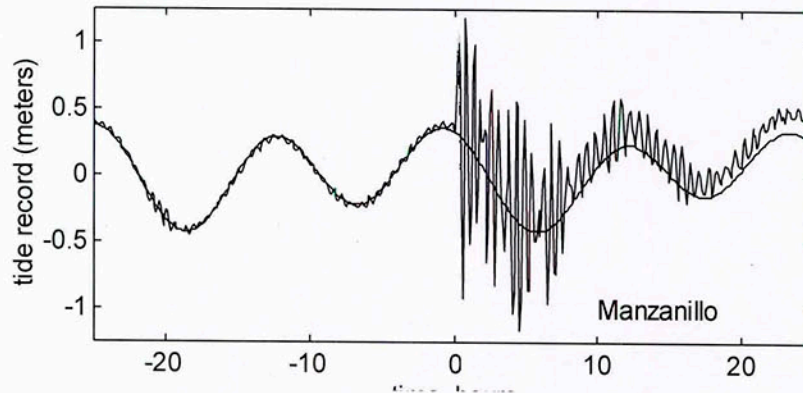


La tendencia en el nivel medio del mar en Acapulco es significativamente diferente cuando se corrige por el levantamiento de la corteza terrestre.

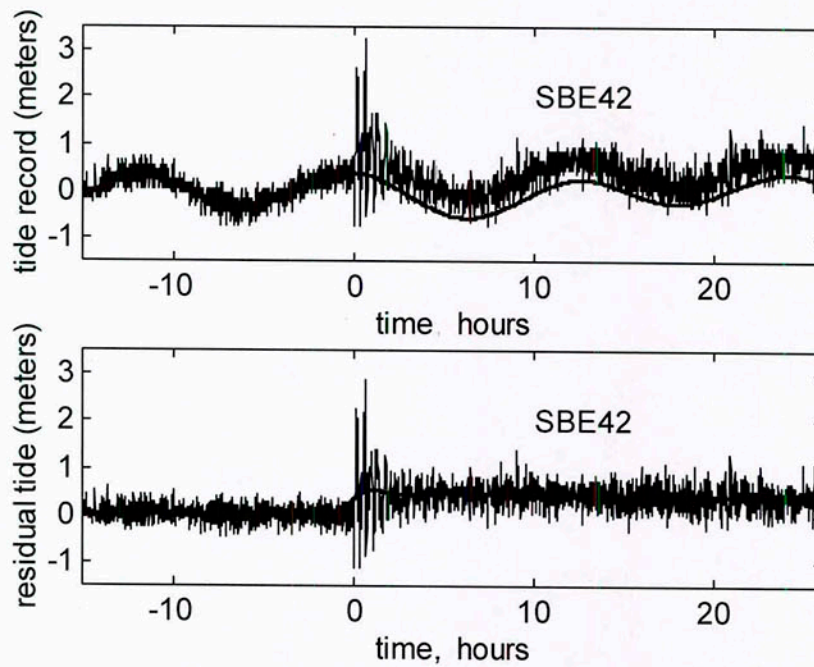
Un ejemplo muy ilustrativo de hundimiento súbito de la corteza terrestre es el caso del sismo de Jalisco-Colima del 9 de octubre de 1995. El hundimiento se identificó y se cuantificó con registros del nivel del mar en 2 localidades y se corroboró con observaciones de GPS.



Mareograma de Manzanillo antes y después del sismo de 1995



Predicción de marea superpuesta al mareograma de Manzanillo antes y después del sismo de 1995. Después de las oscilaciones del tsunami se aprecia con claridad una diferencia de nivel entre el mareograma y la predicción de marea (9cm).



Mareograma en Bahía de Navidad, Jalisco antes y después del sismo de 1995. La diferencia entre el mareograma y la predicción de marea es de 40 cm después del sismo.

Los cambios súbitos en el nivel de la corteza terrestre generados por sismos en el lecho marino, generan a su vez oscilaciones de corto período (minutos) en el nivel del mar "TSUNAMIS".