



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

EVENTOS ASÍSMICOS LENTOS EN REGISTROS
MAREOGRÁFICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A :

ABRAHAM ALVA VÁZQUEZ

TUTOR

DR. VLADIMIR KOSTOGLODOV

2009



FACULTAD DE CIENCIAS
UNAM

Hoja de Datos del Jurado

<p>1. Datos del alumno Alva Vázquez Abraham 53 02 39 77 Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Físico 099031374</p>
<p>2. Datos del tutor Dr Kostoglodov Vladimir</p>
<p>3. Datos del sinodal 1 Dr Gerardo Suárez Reynoso</p>
<p>4. Datos del sinodal 2 Dr Jorge Zavala Hidalgo</p>
<p>5. Datos del sinodal 3 Dr Arturo Iglesias Mendoza</p>
<p>6. Datos del sinodal 4 Dr Carlos Mendoza</p>
<p>7. Datos del trabajo escrito Eventos asísmicos lentos en registros mareográficos 100p 2009</p>

Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem
«No ha de presumirse la existencia de más cosas que las absolutamente necesarias»

Guillermo de Ockham

*Dedico especialmente este trabajo a mis padres,
que con su aliento, apoyo y esfuerzo
lograron brindarme el conocimiento por esta ciencia
tan fascinante, tan misteriosa,
que culmina y a su vez empieza con esta tesis.*

Agradecimientos

Agradezco especialmente a mi familia por todas las palabras de apoyo que me dieron durante la realización de la tesis, ya que sin ellas habría sido difícil concluir este trabajo tan importante de la vida.

Mi mayor agradecimiento al Dr. Vladimir Kostoglodov, por aceptar ser mi asesor de tesis y mostrarme una puerta en el área de la investigación científica. Gracias por compartir conmigo todos sus conocimientos y experiencias en la realización de este trabajo.

Un agradecimiento muy especial a quienes fueron más que compañeros de carrera, a ellos que son y espero que sigan siendo mis amigos, a ellos quienes me apoyaron hasta la conclusión de este trabajo, a ellos quienes pertenecen a “la oficina”.

Agradezco al Dr. Gerardo Suárez, al Dr. Jorge Zavala, al Dr. Arturo Iglesias y al Dr. Carlos Mendoza por ser mis sinodales y por todas sus revisiones, comentarios y sugerencias a este trabajo, el cual habría estado incompleto sin ellas.

Un agradecimiento especial a la I.Q. Susana Ramírez Ruiz Esparza, al Dr. Juan Antonio Flores Lira, a la M. en Psic. Adriana Rodríguez Cuadros y al Prof. Antonio García Murillo quienes me guiaron, impulsaron y apoyaron en el gusto por la física.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	3
--------------	---

CAPÍTULO I

1.1 MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DE DATOS	19
1.1.1 MODELO DE LAS SEÑALES ARMÓNICAS PARA VARIACIONES DEL NIVEL DEL MAR	19
1.1.2 MÉTODO DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE	21
1.2 LOS DATOS	24

CAPÍTULO II

2.1 RESULTADOS	32
2.1.1 VARIACIONES ARMÓNICAS DEL NIVEL DEL MAR	32
2.1.2 EFECTO DE EL NIÑO	36
2.1.3 ELIMINANDO EL EFECTO DE LA ACTIVIDAD SOLAR	38
2.1.4 RESIDUALES DEL NIVEL DEL MAR FILTRADOS	41

CAPÍTULO III

3.1 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	45
3.1.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	45
3.1.2 MODELACIÓN DE LOS DATOS	50
3.1.2.1 MODELO DE DEFORMACIÓN	50
3.1.2.2 MODELACIÓN DE LOS RESULTADOS	52

3.1.3 DISCUSIÓN	60
CONCLUSIONES	66
ANEXOS	69
ANEXO A	69
ANEXO B	72
ANEXO C	87
ANEXO D	90
ANEXO E	94
BIBLIOGRAFÍA	98

RESUMEN

Registros de datos mareográficos de la costa del Pacífico mexicano contienen la información extraíble sobre la ocurrencia de terremotos de $M_w > \sim 6.5$ y eventos asísmicos lentos (SSE, de las siglas en inglés *Slow Slip Events*) de magnitud equivalente a los sismos de $M_w > \sim 7.0$. Esto permite estudiar los eventos sismo-tectónicos en la época pre-GPS. La meta del estudio es separar la señal tectónica de los datos mareográficos aplicando diferentes métodos de procesamiento de los registros del nivel del mar. Cambios anómalos en la serie residual representan un posible levantamiento en la corteza precisamente en la costa producido por eventos sísmicos o asísmicos y a esto se debe encontrar una interpretación adecuada. Una simple diferencia entre los registros mareográficos mensuales de Manzanillo (MNZ) y Acapulco (ACA) revela un levantamiento del orden de 20cm en abril de 1962 en Acapulco producido por un doble terremoto de M_w 7. Efectos hidrológicos, tales como las corrientes y El Niño (ENSO) producen el "ruido" con respecto a la señal sismo-tectónica en los registros mareográficos. La propuesta para este estudio es:

1) Quitar de las series de tiempo mareográficas los efectos anuales y semianuales producidos por la marea y actividad solar, efecto estacional de cambio climático y corrientes. Es posible eliminar estas componentes significativas usando análisis armónico. 2) Después, aplicando regresión lineal entre el residual de la señal mareográfica y los datos del ENSO se obtiene un filtro parcial en los cambios del nivel del mar producidos por el efecto de El Niño. 3) Finalmente la diferencia filtrada de los registros mareográficos de MZ-AC proporcionará una estimación de los levantamientos durante los terremotos de 1962 y los posibles eventos lentos en la costa de

Acapulco y Manzanillo. El mismo método es válido para otras estaciones mareográficas con series de tiempo suficientemente largas. 5) Es posible interpretar las deformaciones verticales, determinadas en los sitios de las estaciones mareográficas aplicando el modelo de dislocación en el semi-espacio elástico.

INTRODUCCION

Los registros de las variaciones del nivel del mar obtenidos a partir de estaciones mareográficas son una fuente muy importante sobre movimientos verticales en la corteza. La tendencia lineal de las variaciones en el tiempo del nivel del mar determinada del análisis de regresión, ha sido usado extensamente como base de estudio de movimientos verticales en la corteza. La propuesta de este trabajo es determinar movimientos episódicos en la corteza de duración de varios días hasta varios años, a partir de los datos del nivel del mar.

Los cambios en el nivel del mar se ven afectados por diferentes tipos de fenómenos naturales, tales como 1) Las mareas oceánicas provocadas por la interacción gravitacional entre la Tierra, la Luna, el Sol y los planetas, principalmente con la Luna y el Sol, 2) Oleaje, seiches y tsunamis, 3) Los efectos hidrológicos como las corrientes y cambio de la temperatura y la salinidad del agua del océano, 4) Aumento del nivel del mar proveniente de la des-glaciación y 5) Cambio de la cabidad de la cuenca oceánica por los procesos tectónicos globales.

Los procesos que influyen en el cambio del nivel del mar tienen diferentes rangos espaciales y ocurren en escalas de tiempo, desde unos segundos hasta decenas de años. Por su carácter estos cambios pueden ser armónicos, periódicos o quasiperiódicos, no estacionarios y estocásticos. A parte de todos estos efectos, el cambio del nivel medio del mar a largo plazo (últimos 100-200 años) es una de las variables más importantes para evaluar el calentamiento global.

Las mediciones del nivel del mar, tradicionalmente han sido estimadas usando estaciones mareográficas (*tide gauge*), los cuales usualmente tienen lugar sobre los muelles de las costas y miden el nivel del mar relativo con respecto a cierto sistema de referencia vertical. La Figura 1 muestra un esquema de una estación mareográfica más común en los sistemas de medición.

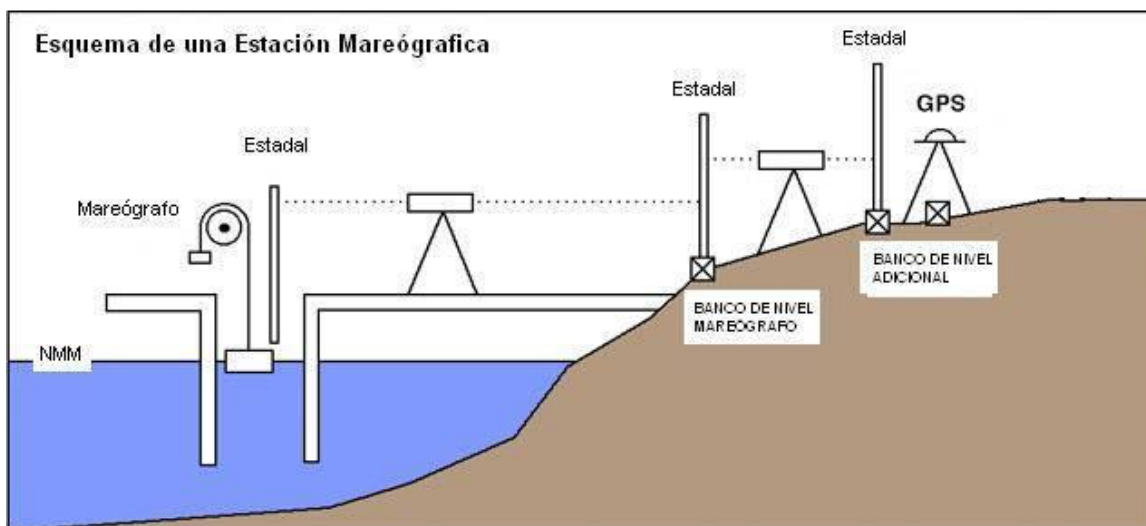


Figura 1. Esquema del sistema de medición de una Estación Mareográfica (Tide Gauge). Se muestra primero el mareógrafo con el flotador que está conectado a una pluma registradora que gráfica la posición vertical del flotador con respecto al estadal. La línea punteada indica el nivel relativo del estadal el cual está referenciado al sistema de bancos de nivelación. El esquema muestra una unidad de GPS que mide la posición horizontal y la altura de un banco de nivel con respecto al elipsoide de referencia. NMM es el Nivel Medio del Mar y GPS es Sistema de Posicionamiento Global (por sus siglas en inglés *Global Positioning System*).

Los mismos mareógrafos pueden moverse verticalmente con respecto del sistema de referencia vertical, lo cual da resultado al cambio aparente del registrado nivel del mar. Dependiendo de la región, el movimiento se produce, por ejemplo, como resultado de la post-glaciación, alzamiento tectónico, subsidencia o levantamiento de la corteza, por ejemplo durante los terremotos. La red global de mareógrafos comprende de una distribución de sistemas de medición del nivel del mar que ofrece fuentes de datos históricos y de grandes términos acerca del nivel del mar. La mayor conclusión de los

datos obtenidos por los mareógrafos ha sido que el nivel del mar promedio global ha aumentado aproximadamente de 10-25cm durante el último siglo. Este aumento debido principalmente a la des-glaciación de los polos se muestra en la figura 2.

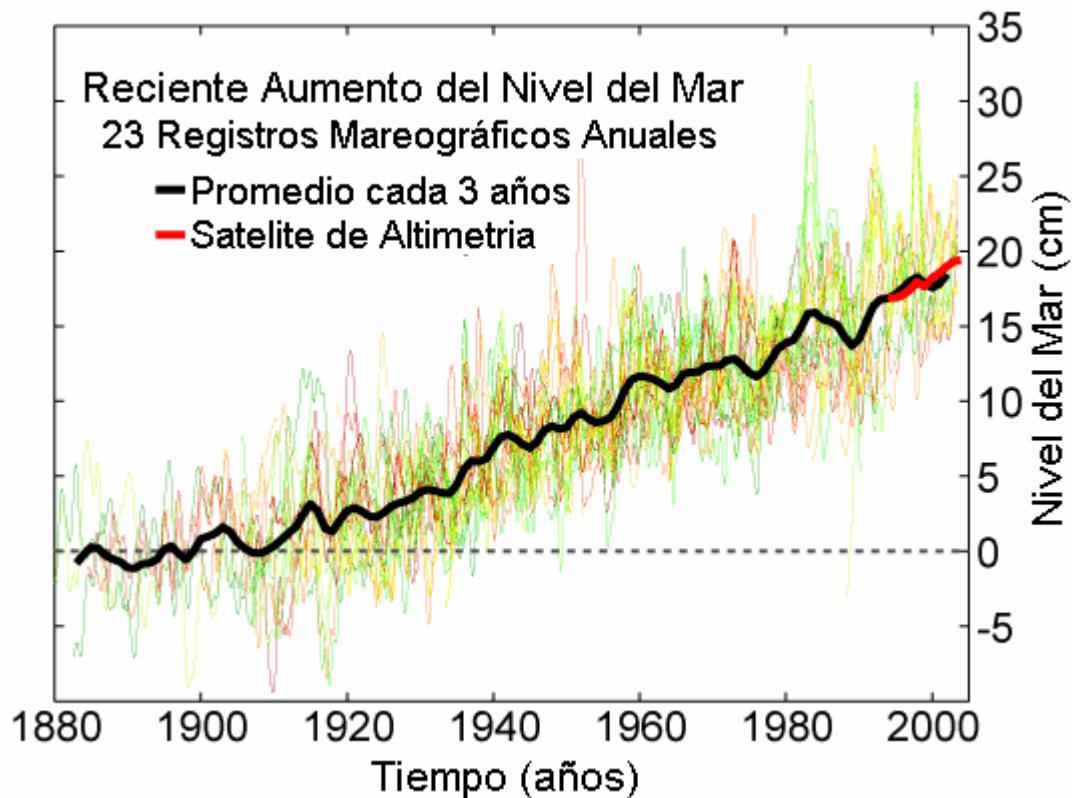


Figura 2. La gráfica muestra las mediciones registradas del nivel del mar de 23 estaciones mareográficas en la cual se muestra un aumento de alrededor de 20cm o 2mm/año. El modelo de ajuste en negro corresponde al promedio para cada 3 años de las estaciones. Tomado de *Douglas et al. 1997*.

Algunas causas de la variación en el nivel mar se muestran en la siguiente gráfica:

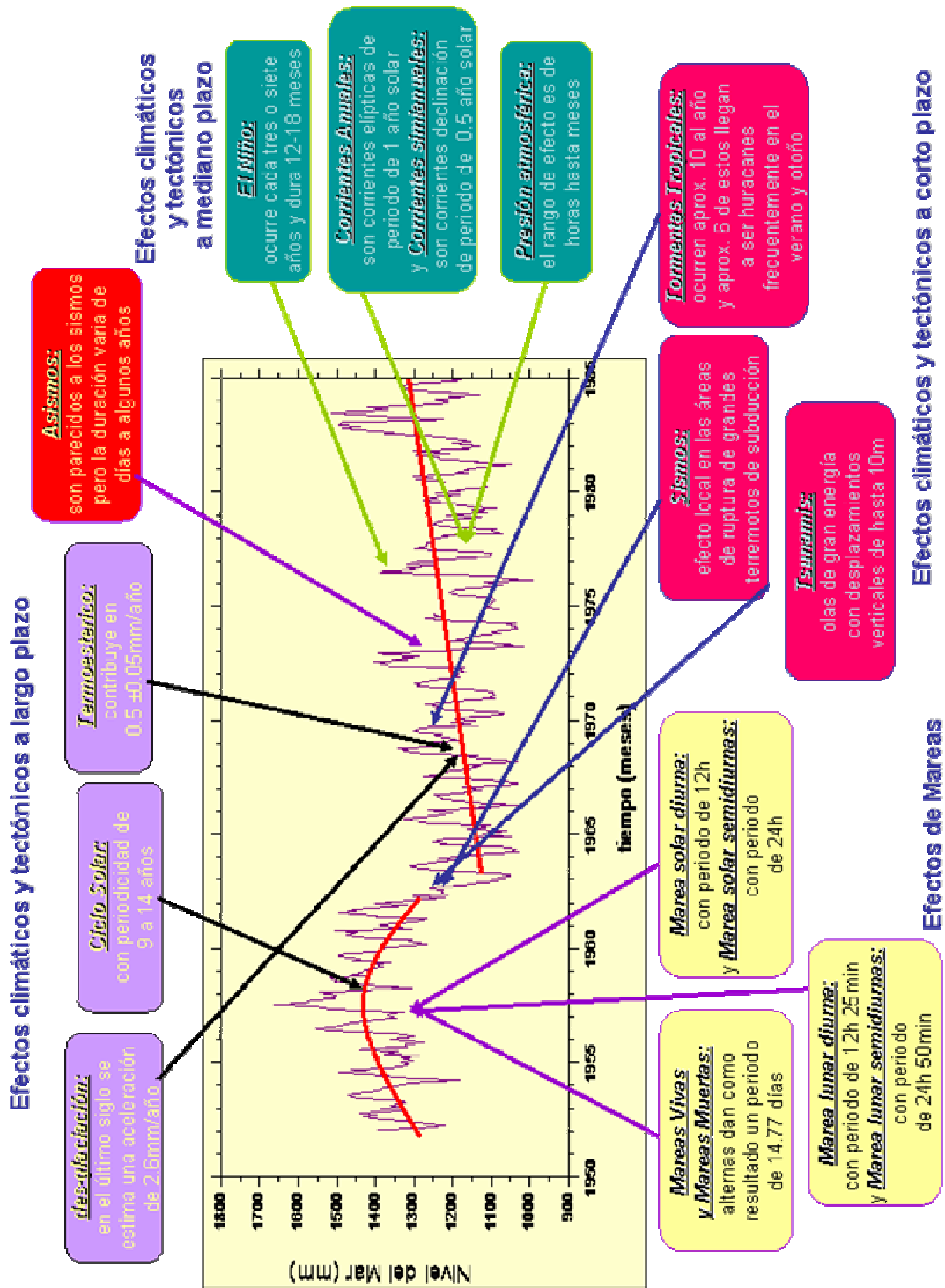


Figura 3. La gráfica muestra algunas causas de la variación del nivel del mar producidas por cambios climáticos y tectónicos a corto, mediano y largo plazo.

Las mareas son ondas largas, ya sean progresivas o estacionarias. El período dominante es usualmente de 12 horas 25 minutos, el cual es la mitad de un día lunar. Las mareas se generan por el potencial gravitacional de la luna y el sol. Su propagación y amplitud están influenciadas por la rotación de la tierra (fuerza de Coriolis), y la resonancia esta determinada por las formas y profundidades de las cuencas oceánicas y los mares marginales. La expresión más obvia de la marea es el ascenso y descenso del nivel del mar. De igual importancia es el cambio regular en la velocidad y dirección de las corrientes cerca de las costas.

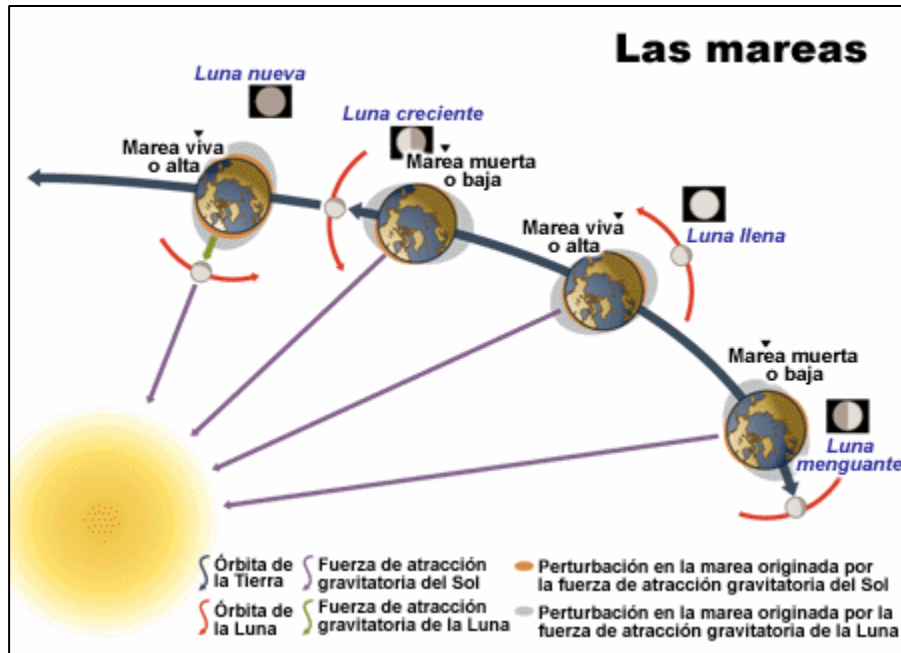


Figura 4. En el esquema se muestra los periodos de la marea viva y la marea muerta, señalando la perturbación que adquiere el nivel del mar debido a la atracción gravitatoria del Sol y de la Luna.

Las corrientes de marea son de mayor magnitud en los océanos mundiales. Para dar una descripción de las mareas, se puede decir que existen Mareas Altas que son cuando hay un máximo en la corriente del nivel del mar y Mareas Bajas cuando hay un mínimo; el Rango de marea, el cual es la diferencia entre la marea alta y la marea baja; Desigualdad Diurna, que es la diferencia entre dos máximos o mínimos sucesivos de marea; Marea Viva, la

que ocurre poco después de la luna nueva o luna llena; y Marea Muerta, la marea que ocurre poco después de la luna de cuarto menguante o cuarto creciente. El que existan Mareas vivas y Mareas muertas alternas da como resultado una desigualdad quincenal en las alturas de la marea y las corrientes, las cuales corresponden a un período de 14.77 días.

Los períodos de marea principales son:

- Mareas producidas por la luna
 - M_2 (lunar semidiurna) 1/2 día lunar = 12h 25min
 - O_1 (lunar diurna) 1 día lunar = 24h 50 min
- Mareas producidas por el Sol
 - S_2 (solar semidiurna) 1/2 día solar = 12h
 - K_1 (solar diurna) 1 día solar = 24h

Las mareas se pueden representar como la suma de oscilaciones armónicas con estos períodos, más la suma de oscilaciones armónicas de todas las otras combinaciones de períodos (tales como desigualdades). Cada oscilación se conoce como constituyente de marea, y tiene su amplitud, período y fase, los cuales se pueden extraer a partir de observaciones utilizando técnicas de análisis armónico. Se han identificado cientos de dichas oscilaciones, pero en la mayoría de las situaciones y para propósitos de predicciones a lo largo de un año más o menos, es suficiente con incluir solamente M_2 , S_2 , K_1 y O_1 . En la práctica, las predicciones que se producen por computadora para publicar las tablas de marea oficiales utilizan muchos más términos que estos cuatro.

En la cuenca tropical de huracanes del Atlántico, que incluye el Océano Atlántico, el Mar Caribe y el Golfo de México, los huracanes se originan principalmente en el Atlántico norte y en menor grado en el Caribe. Las áreas que están en mayor riesgo son los países isla del Caribe, al norte de Trinidad, México y el sureste de los Estados Unidos, Centro América al norte de Panamá, y en grado limitado la costa norte de América del Sur. Los huracanes también se originan en el noreste del Pacífico, donde pueden afectar la costa occidental de México. La temporada oficial de los huracanes

en la región principal del Caribe comienza el primero de junio y dura hasta el 30 de noviembre; cada año más de 100 depresiones tropicales o huracanes en potencia son monitoreados, pero solamente unos diez llegan a cobrar la fuerza de una tormenta tropical y de estos seis se convierten en huracanes. La formación de los huracanes requiere de una temperatura en la superficie del mar de por lo menos 27°C. En los meses de verano, la temperatura del mar en el Caribe y el Atlántico llegan hasta 29°C, condición excelente para originar un huracán. Las aguas de superficie calientan el aire que asciende y luego es bloqueado por el aire más caliente de los vientos alisios. El encuentro de estas dos masas de aire crea una inversión atmosférica; en esta etapa, se desarrollan tormentas eléctricas y se podría quebrar la inversión, bajando de manera efectiva la presión atmosférica. Debido a ésta baja de presión se genera una marea de tormenta, que es la elevación temporal del nivel del mar causada por el agua impulsada sobre tierra, principalmente por la fuerza de los vientos del huracán hacia la costa y, sólo de manera secundaria, por la reducción de la presión barométrica a nivel del mar en el ojo de la tormenta.

Otro factor que afecta en las mediciones del mareógrafo y el cual es un efecto no lineal y que no se puede predecir, es el efecto de El Niño. El Niño o ENSO (por sus siglas en inglés *El Niño-Southern Oscillation*) es debido a un calentamiento en el Pacífico tropical que ocurre cada 3 a 7 años y dura de 12-18 meses [McPhaden et al. 2001]. Esto está dinámicamente vinculado con la Oscilación del Sur, que se observa en la presión atmosférica de la superficie entre las regiones del Este de Australia y Asia, y el Este del Pacífico tropical. Durante El Niño, los vientos disminuyen su intensidad a lo largo del ecuador y se observa un aumento en la presión atmosférica en el Oeste del Pacífico y una disminución en el Este del Pacífico.

El hecho de que el efecto de El Niño, afecte en el nivel del mar del Pacífico se demostró, en 1975, dado que los vientos alisios empujaban fundamentalmente las aguas más calientes de la superficie hacia el oeste a lo

largo del ecuador hasta que se acumulaban en la costa de Indonesia. Esta densa capa de agua caliente, que provocaba un aumento del nivel del mar en el Pacífico occidental de hasta 18 pulgadas (45cm) [Conlan et al. 2000], ejerciendo presión sobre una capa de agua situada debajo de la superficie llamada termoclina que actuaba como una especie de puente entre las aguas calientes de la superficie y las aguas más frías situadas en el fondo del océano. En comparación, la capa caliente de la superficie en el Pacífico oriental era mucho más somera. Como resultado, la termoclina se encontraba más cerca de la superficie, permitiendo que las aguas frías situadas en las capas sub-superficiales del océano fluyeran trayendo con ellas los nutrientes que alimentan a las poblaciones de peces. Éste trabajo sugería que, cuando los vientos alisios cesaban, se liberaban oleadas de agua caliente que se movían de oeste a este a través del Océano Pacífico, empujando a la capa termoclina hacia el fondo en el Pacífico oriental e impidiendo la ascensión del agua fría situada en el fondo del océano. Como consecuencia, las temperaturas de la superficie del mar en el este aumentaban.

Teóricamente el cambio del nivel del mar en función de la presión atmosférica es descrito por la ecuación:

$$\eta = (p_0 - p)/(\rho g)$$

Aquí η es el cambio del nivel del mar, p es la presión atmosférica en el nivel del mar, p_0 es la presión atmosférica promedio, ρ es la densidad del agua del mar y g es la aceleración de la gravedad. La presión atmosférica también afecta el nivel del mar en periodos de horas hasta meses, teóricamente lo afecta en cantidades de alrededor de -1cm/mbar en los cambios de presión, de esta manera, éste valor sirve de guía para buscar una respuesta actual en el análisis de los registros del nivel del mar [Vanicek et al. 1978].

La post-glaciación o desglaciación, como ya se mencionó, afecta el nivel global del mar y a las mediciones de las estaciones mareográficas. Este fenómeno refleja el calor contenido de los océanos debido a que la densidad del agua del mar depende de la temperatura, por lo tanto, es un potente indicador en los cambios climáticos. El incremento en el derretir de los glaciares y las capas de hielo, probablemente representan una contribución importante en el aumento del nivel del mar global. El aumento del nivel del mar debido a los glaciares y al aumento en la temperatura en el último siglo de acuerdo con los registros mareográficos, se estima de 1.8mm/año sin una aceleración significativa. Sin embargo se ha concluido con los datos del posicionamiento global (GPS) que el rebote postglacial (PGR), o la elevación de los sitios de los mareógrafos a largo plazo después de la última pequeña edad de hielo que el aumento geocéntrico del nivel del mar es de 2.6mm/año [Ugur Sanli et al. 2001].

El cambio en el nivel del mar termoestérico (es decir, producido solamente por el cambio de la densidad del agua por la temperatura) en los últimos 50 años reportado por los registros de la temperatura del océano, indica que la expansión térmica contribuye a un aumento en el nivel del mar de 0.5 ± 0.05 mm/año [Lombard et al. 2005]. Sin embargo, se ha mostrado que la variabilidad interanual del nivel del mar termoestérico es dominada por las señales del ENSO (*El Niño Southern Oscillation*), PDO (*Pacific Decadal Oscillation*), y NAO (*North Atlantic Oscillation*), como resultado de esto, el nivel del mar termoestérico no es estacionario, es decir, tiene una gran variabilidad en términos del promedio global.

La variación de la actividad solar también afecta el nivel del mar. Esta variación es un cambio en la cantidad de energía radiada emitida por el Sol. Existen componentes quasi-periódicas para estas variaciones, la principal es de aproximadamente 11 años (el ciclo solar), sin embargo, hay cambios correspondientes en los cambios solares en periodos de 9 a 14 años los

cuales han sido determinados con los registros de la temperatura de la superficie del mar [*Hathaway et al. 2004*].

La actividad tectónica es otro fenómeno importante que afecta en el sistema de medición del mareógrafo, ya que el nivel Isoestático de la tierra esta cambiando debido a estas actividades tectónicas tales como desplazamientos verticales durante sismos, desplazamientos debido a los eventos asísmicos lentos, deformación de la corteza terrestre a largo plazo, en particular producida por el proceso de subducción entre las placas tectónicas.

En algunos casos, los tsunamis (olas de gran energía y largo periodo producidas cuando algún fenómeno desplaza verticalmente una gran masa de agua) y efectos cosísmicos (terremotos) producen cambios en el nivel del mar registrados por los mareógrafos que pueden ser usados para apreciar la localización y dimensiones de ruptura de grandes terremotos de subducción, como por ejemplo, los obtenidos basados en un análisis detallado de los registros mareográficos de Acapulco y Salina Cruz sobre las localizaciones y áreas de ruptura del doble terremoto de 1962 (M_w 7.1 y 7.0) y el evento de 1957 (M_w 7.7) que ocurrieron en la región Acapulco-San Marcos (y los cuales también se observarán en este trabajo) obtenidos por *Ortiz et al. 2000*.

Las deformaciones de la corteza son más importantes en los sitios mareográficos localizados sobre las zonas de subducción (Las zonas de subducción se identifican por ser las regiones más profundas del suelo oceánico (las *Fosas Oceánicas*) donde ocurre la convergencia de las placas tectónicas. En estas regiones una placa cabalga sobre la otra (movimiento de compresión); la placa más densa (generalmente la placa oceánica) penetra en el manto bajo la placa menos densa (generalmente las placas continentales)). La fricción entre las placas produce las fuerzas que deforman la placa cabalgante. Esta deformación a largo plazo influye en el registro mareográfico. La deformación elástica acumulada por el sistema de subducción durante decenas de años puede ser liberada en la forma de un

evento sísmico (casi instantáneo) o asísmico lento con duración de unos días y hasta unos años.

Recientemente con los datos de GPS se han reportado grandes eventos asísmicos lentos en México, como los reportados en 1998 por *Lowry et al. 2001*, el de 2001-2002 por *Kostoglodov et al. 2003*, y el de 2006 por *Larson et al. 2007*; los cuales han producido el ascenso de la costa de 5-6cm, los cambios significativos pueden ser detectados en los registros del nivel del mar. Desafortunadamente los datos mareográficos continuos en la costa del Pacífico del sureste de México no existen para los últimos 15 años. Estos eventos lentos (SSE por su siglas en ingles *Slow Slip Event*) o los "terremotos silenciosos" son desplazamientos tipo "creep" que ocurren sobre la interfase entre las placas, similar a un temblor pero sin producir ondas sísmicas. Una importante característica de estos eventos lentos, es que se desarrollan por debajo de la porción acoplada de la cabalgadura (es donde una placa tectónica es subducida bajo otra) con un desplazamiento sobre la falla del orden de 10cm y una propagación de 1-2km/día, liberando una energía equivalente a los terremotos con magnitudes de M_w 6-7.5 [*Kostoglodov et al. 2003* y *Franco et al. 2005*].

Los eventos lentos se han reportado en distintos lugares como Japón [*Hirose et al. 1999*], Cascadia [*Dragert et al. 2001*], Nueva Zelanda [*McCaffrey et al. 2007*], Alaska [*Frey Mueller et al. 2001*], Sumatra [*Genrich et al. 2001*] y por supuesto en México (mencionados anteriormente) y lo que se intenta conocer es como estos eventos lentos afectan en el ciclo sísmico, que es el período de tiempo durante el cual se acumula deformación en el interior de la Tierra que más tarde se liberará repentinamente. Dicho ciclo consta de cuatro fases: intersísmica (periodo durante el cual se acumula la deformación elástica), presísmica (periodo que es justo antes de la ocurrencia del terremoto), cosísmica (periodo en el que ocurre el terremoto) y postsísmica (periodo después de ocurrido el terremoto). La relación entre la ocurrencia de los terremotos en zonas de subducción y los SSE es todavía desconocida. Existe

la hipótesis de que uno de los eventos lentos puede preceder y provocar un sismo de gran magnitud. Lo que implica entonces que el monitoreo y estudio de los SSE es un objetivo científico muy importante.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo, es el de detectar los eventos lentos asísmicos ocurridos en Pacífico Mexicano en la época pre-GPS usando las series de observaciones en las estaciones mareográficas a partir de 1952 (cuando fue establecida la red mareográfica en México). En particular, el trabajo de tesis consiste en:

1. Extraer la señal sismotectónica a partir de los registros mareográficos de las estaciones de Manzanillo, Acapulco, Salina Cruz, Puerto Ángel y Mazatlán, ubicadas en el Pacífico mexicano.
2. Filtrar las series de tiempo mareográficas por el método de Análisis Armónico con componentes significativas para eliminar el efecto de las mareas y otros cambios del nivel del mar anuales y semianuales.
3. Determinar el efecto de El Niño en los datos mareográficos y remover la señal de este fenómeno para reducir el "ruido" termoestérico y obtener la señal sismo-tectónica para todo el periodo de observación.
4. A partir de la señal filtrada (residual) en las estaciones mareográficas hacer la estimación del levantamiento de la costa producida por los eventos lentos asísmicos. Establecer los criterios necesarios para la detección confiable de los SSE.
5. Modelar los eventos asísmicos lentos usando las estimaciones de los levantamientos de la costa obtenidos.

6. Elaborar un modelo sencillo de balance de la deformación intersísmica en la costa de Guerrero aplicando los resultados de este estudio y los datos de observación GPS.

CAPITULO I

1.1 METODOS DE PROCESAMIENTO DE DATOS

1.1.1 MODELO DE LAS SEÑALES ARMÓNICAS PARA VARIACIONES DEL NIVEL DEL MAR

La propuesta de utilizar este método es debido a que se pueden detectar movimientos episódicos en la corteza (*Episodic Creep*) de duración de varios meses hasta años en los registros mareográficos solamente filtrando las señales no-tectónicas de carácter armónico. Así que, el alto nivel de ruido o variabilidad del nivel del mar nos ha privado de ver estos movimientos históricos en los registros. Dichos cambios en los registros promedios mensuales son provocados por las variaciones periódicas de la temperatura, corrientes, precipitaciones, componentes anual y semianual de la marea, etc.

El modelo de regresión lineal (presentado en la Capítulo II) para el análisis mensual de los registros mareográficos fue construido como sigue:

$$L(t) = a + \dot{a}t + C_{0.5}(t) + C_1(t) \quad (1)$$

Donde a denota el nivel de referencia al tiempo $t = 0$, \dot{a} es la tendencia lineal, $C_{0.5}$ es la componente semianual y C_1 es la componente anual. Estas componentes tienen el periodo similar a las componentes anual y semianual de las mareas y fueron escogidas de acuerdo a las recomendaciones de *Vanicek et al. 1978*. En (1) podemos también agregar las componentes con periodos más largos (por ejemplo los de ~ 8 y ~ 18 años) y posteriormente verificar su significancia estadística. Los coeficientes del modelo de regresión

se estiman a partir de estimación de mínimos cuadrados. Cada componente fue incorporada al modelo lineal por:

$$C_p(t) = b_1 \sin\left(\frac{2\pi t}{p}\right) + b_2 \cos\left(\frac{2\pi t}{p}\right) \quad (2)$$

Donde p es el periodo, t es el tiempo, b_1 y b_2 son las amplitudes estimadas por el método de mínimos cuadrados. El nivel de significancia de b_1 y b_2 fue probado por la incertidumbre de los mismos, tomando en cuenta que si la desviación estándar S es muy cercano al valor o más grande que los valores de b_1 y b_2 , entonces se elimina y se repite el análisis de mínimos cuadrados, con el menor número de parámetros. La amplitud A y la fase ϕ son derivadas de los coeficientes b_1 y b_2 calculados a partir de la ecuación (2), dado que tenemos la siguiente identidad trigonométrica:

$$b_1 \sin\left(\frac{2\pi t}{p}\right) + b_2 \cos\left(\frac{2\pi t}{p}\right) = A \cos\left(\frac{2\pi t}{p} - \phi\right) \quad (3)$$

Donde A y ϕ se obtienen a partir de:

$$A = \sqrt{b_1^2 + b_2^2} \quad (4)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{b_1}{b_2}\right)$$

Las desviaciones estándar σ_A y σ_ϕ de A y ϕ son derivadas de las desviaciones estándar de σ_{b_1} , σ_{b_2} y la covarianza $\sigma_{b_1 b_2}$, de los coeficientes b_1 y b_2 a través de la siguiente formula:

$$\sigma_A = A^{-1} (b_1^2 \sigma_{b_1}^2 + 2b_1 b_2 \sigma_{b_1 b_2} + b_2^2 \sigma_{b_2}^2)^{1/2} \quad (5)$$

$$\sigma_\phi = A^{-1} (b_2^2 \sigma_{b_1}^2 - 2b_1 b_2 \sigma_{b_1 b_2} + b_1^2 \sigma_{b_2}^2)^{1/2}$$

Las desviaciones estándar de éstos fueron derivadas de la conocida ley de propagación de errores.

1.1.2 METODO DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE

Como el efecto del ENSO tiene gran variabilidad, es decir, no es estacionario o armónico, no se puede remover con el método descrito anteriormente. Sin embargo, una vez que se utilizó el modelo matemático anterior, el cual removi6 el efecto por las componentes anuales y semianuales, se aplico el método de regresión lineal simple entre el residual de los ya datos filtrados mareográficos y los datos mensuales del ENSO (obtenidos del NOAA de su página de Internet www.nws.noaa.gov, de la región 3.4 de El Niño (5°N-5°S, 120°-170°W), para el periodo de años 1950-2000, ver Anexo A) para obtener un filtro parcial en los cambios del nivel del mar producidos por el efecto de El Niño.

El método de regresión lineal simple consiste en estudiar la relación entre dos variables, es decir, se examina la distribución condicional de un conjunto $Y = y$, dado el conjunto $X = x$, de la forma:

$$E(Y = y | X = x) = \beta_1 + \beta_2 x \quad (6)$$

Donde el valor de β_1 es la ordenada al origen y β_2 es la pendiente, también son referidos como los coeficientes de regresión. En el modelo de regresión lineal simple asumimos que la única forma en que la distribución condicional pueda cambiar es vía la relación anterior.

Entonces usando el modelo de regresión lineal simple para los valores independientes $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ de (X, Y) , donde n es el número de datos utilizados, tenemos entonces que la ecuación (6) se transforma como:

$$E\left(\begin{pmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix} \middle| X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n\right) = \begin{pmatrix} \beta_1 + \beta_2 x_1 \\ \vdots \\ \beta_1 + \beta_2 x_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

Por lo que el principio de mínimos-cuadrados dice que, con base en las observaciones simples $y = (y_1, \dots, y_n)$, el conjunto de valores posibles para $E(Y)$ se minimiza como:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \beta_1 - \beta_2 x_i)^2 \quad (8)$$

Para la cual debemos encontrar los valores de β_1 y β_2 que minimicen la expresión (8), los cuales están dados por

$$b_1 = \bar{y} - b_2 \bar{x} \quad \text{y} \quad b_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (9)$$

respectivamente, siempre y cuando $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \neq 0$, (b_1 y b_2 son los coeficientes de regresión y \bar{x} es promedio de las variaciones en x).

Y la desviación estándar para b_1 esta dada por

$$\sigma_{b_1} = s \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

y para b_2 esta dada por

$$\sigma_{b_2} = s \left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{-1/2}. \quad (11)$$

Donde s es:

$$s^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - b_1 - b_2 x_i)^2 \quad (12)$$

En nuestro análisis utilizaremos los valores filtrados correspondientes a los datos mareográficos como el conjunto Y y los datos del ENSO como el conjunto X , para obtener así el filtro parcial.

1.2 LOS DATOS

Los datos que se utilizaran para el estudio fueron obtenidos de las estaciones mareográficas que se encontraban en el Pacífico Mexicano (Figura 5), en Salina Cruz (SC), Puerto Ángel (PA), Acapulco (AC), Manzanillo (MZ) y Mazatlán (MAZ).



Figura 5. Las estaciones mareográficas que proporcionan los datos para el análisis están marcadas con círculos grandes (SC = Salina Cruz, PA = Puerto Ángel, AC = Acapulco, MZ = Manzanillo, MAZ = Mazatlán). Los círculos pequeños muestran la ubicación de otras estaciones mareográficas en el país. Las áreas sombreadas muestran zonas de la costa tectónicamente diferentes. Los registros mareográficos de la estación MZ se usan como referencia.

El registro continuo de estas estaciones data desde 1952 hasta 1992 aproximadamente, ya que algunas estaciones dejaron de funcionar algunos años antes. La fuente de los datos es el Servicio Mareográfico Nacional del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, la cual, los proporciona en la página www.mareografico.unam.mx, aunque también los datos pueden ser obtenidos del Centro del Nivel del Mar de la

Universidad de Hawai de la pagina de Internet <http://uhslc.soest.hawaii.edu/>, la cual cuenta con los datos de la mayoría de las estaciones del mundo. El banco de datos mareográficos cuenta con un muestreo promedio hora, diario y mensual. También se cuenta con una descripción de las estaciones, es decir, se menciona el nombre de la estación, su localización (latitud y longitud), el contribuidor de los datos, etc., además de comentarios acerca de los eventos que han ocurrido en las estaciones y algunos eventos o fenómenos que afectaron los registros del nivel del mar. Estos documentos (logfile presentados en el Anexo B) son importantes para determinar los movimientos verticales en cada estación no relacionados con los efectos tectónicos. En el presente estudio se usan los registros promedios mensuales, debido a que los eventos asísmicos lentos en México tienen una duración de aproximadamente 6-7 meses [Kostoglodov et al., 2003], además de que el promedio mensual en los registros mareográficos resulta ser un tipo de filtro que elimina las mareas de periodos menores a un mes. Ver Figura 6.

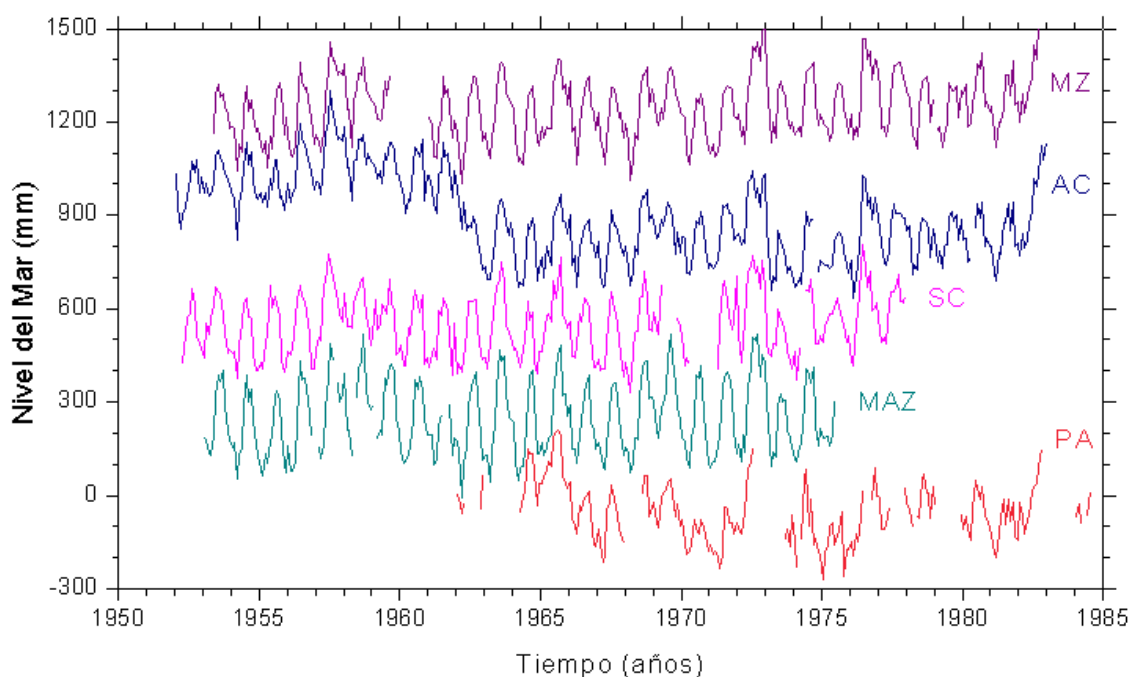


Figura 6. Gráfica de los datos (promedio mensual) registrados de las estaciones mareográficas del Pacífico Mexicano durante 1950-1985.

Tomando como referencia la estación mareográfica en Manzanillo debido a que se encuentra en una zona tectónicamente diferente de donde están las otras estaciones, además de que particularmente la zona mareográfica donde está la estación es muy similar a la zona mareográfica de la estación de Acapulco, lo cual implica que exista buena coherencia en los efectos de mareas entre ambas estaciones y así poderlos eliminar de una mejor manera al hacer la diferencia entre ambas. Se podría sugerir tomar como referencia Acapulco, sin embargo, como Puerto Ángel y Salina Cruz se encuentran dentro de la misma zona tectónica, al hacer la diferencia entre estaciones, eliminaríamos los efectos tectónicos, los cuales son de nuestro interés. También se podría sugerir tomar los registros de Mazatlán, sin embargo, los registros mareográficos son más cortos que en Manzanillo y además se encuentra en una zona mareográfica distinta y más alejada de las otras estaciones.

Para nuestro análisis definiremos un desplazamiento anómalo como la interrupción de la tendencia de la regresión lineal a largo plazo, es decir, si la tendencia de la serie (en este caso el nivel del mar) se ve interrumpida por algún factor, siendo este de carácter tectónico o no. La estimación del desplazamiento será simplemente la diferencia entre las regresiones lineales en el punto donde ocurre el desplazamiento anómalo y su error será calculado por expresión (12). En la Figura 7 se muestra un ejemplo de lo que sería un desplazamiento anómalo.

Para identificar estos desplazamientos anómalos en la señal del nivel del mar, se realizará la derivada de la señal, ya que sabemos que la derivada en un punto de una curva es igual a la pendiente de la curva en ese punto, por lo que al cambiar la tendencia de la señal debido a algún desplazamiento anómalo, esta deja de ser continua, por lo tanto la señal de la derivada en el punto (en este caso en el tiempo) en el que ocurra algún evento se verá afectada, debido a que deja de ser constante, como lo muestra en la Figura 8 para el caso de la diferencia entre Manzanillo y Acapulco, MZ-AC en la que se

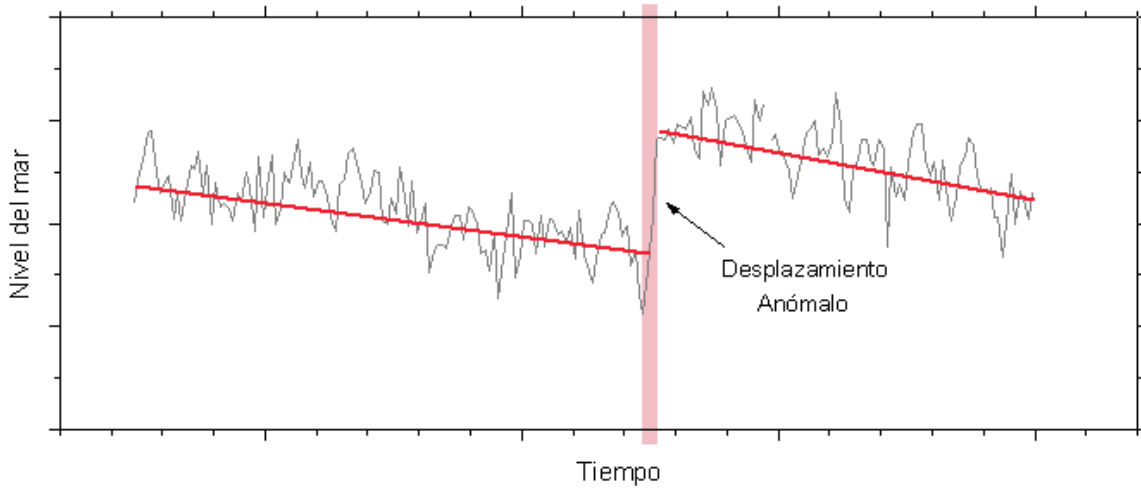


Figura 7. Esquema que muestra la interrupción de la tendencia de la regresión lineal (línea en rojo) debido a los desplazamientos anómalos. La barra vertical muestra el punto o el tiempo en el que ocurre el desplazamiento anómalo y el cual se calcula por la simple diferencia de las regresiones lineales en ese punto.

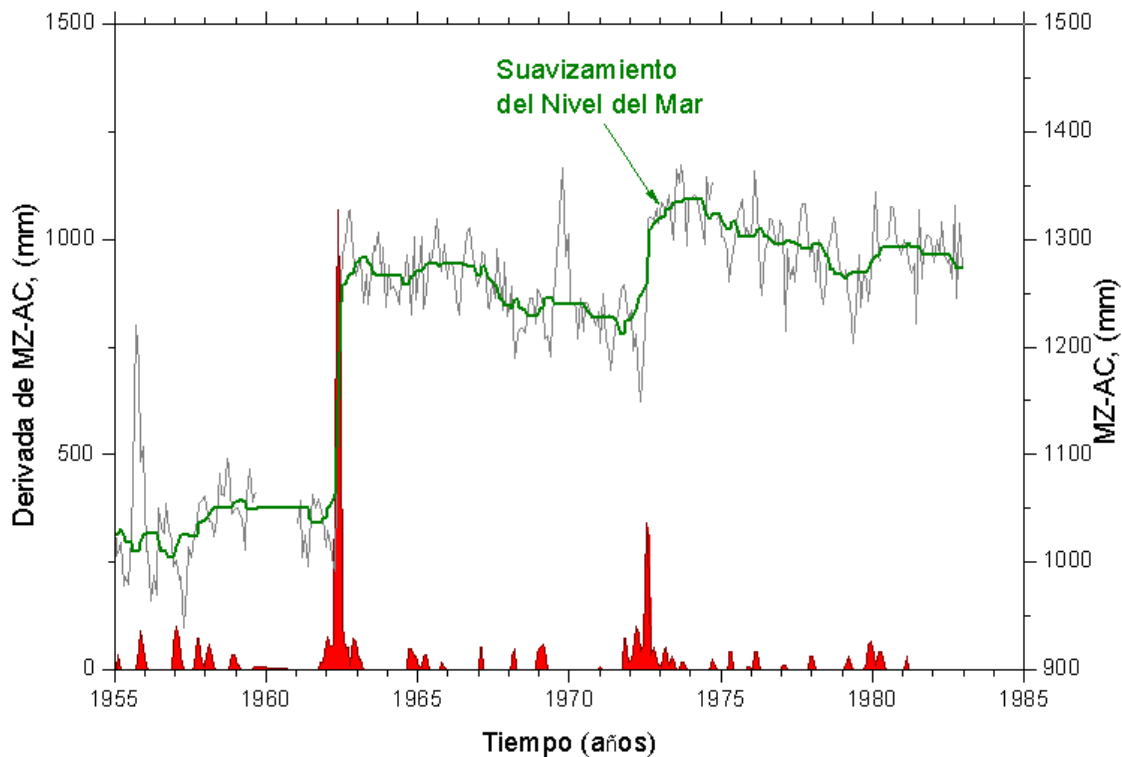


Figura 8. Derivada (picos en rojo) de la diferencia entre Manzanillo y Acapulco, MZ-AC, en la cual se muestran la concentración de picos con los que podemos identificar a los desplazamientos anómalos.

puede observar la derivada de la señal con la cual identificamos a los desplazamientos anómalos a partir de la concentración de picos que existen donde se presentan esos desplazamientos. Por otro lado la señal que se derivó es la señal suavizada del nivel del mar, utilizando el conocido filtro de la mediana, ya que este filtro reemplaza el valor de la señal de cada punto por un valor mediano de un grupo de puntos envolventes, en este caso se utilizó una ventana de 18 puntos (aquí 18 meses). El filtro de la mediana se utilizó debido a que funciona mejor con los picos que se presentan en la señal, los cuales elimina, pero deja los cambios de tendencia como los desplazamientos anómalos.

Realizando la simple diferencia entre los registros de la estación de Manzanillo con las otras estaciones como primera aproximación y para evaluar la señal tectónica, podemos observar cuatro posibles desplazamientos anómalos en la diferencia de las señales en Manzanillo y Acapulco, MZ-AC (identificados a partir de realizar la derivada de la señal, como se menciona anteriormente), uno más notable en 1962, del cual sabemos que existe el registro de los dos terremotos que hubo en ese año, además de que el cambio del nivel del mar (mostrado en la Figura 9) coincide con este evento, el cual también fue reportado por *Cruz and Wyss et al. 1983* y *Ortiz et al. 2000*. El otro posible desplazamiento anómalo que se muestra, es uno en 1972, ya que al realizar la diferencia entre las señales de Manzanillo y Acapulco la tendencia del nivel del mar a partir del evento de 1962 debería de ser continua, es decir, la tendencia del nivel del mar debería seguir la tendencia de la línea punteada mostrada en la Figura 9, sin embargo, podemos observar que existe un cambio en el nivel del mar en 1972, el cual podemos sospechar e interpretar como una señal tectónica. Lo mismo ocurre para el posible desplazamiento anómalo que se muestra en 1979, ya que la tendencia del nivel del mar se ve afectada por este cambio en la señal. También se puede observar que el nivel del mar se ve afectado por otro probable desplazamiento anómalo en 1957, aunque es cierto que se puede trazar una línea continua desde el inicio de la serie hasta 1962,

también es cierto que la tendencia de la señal del nivel del mar se ve afectada a partir de 1957, por lo cual se tomará un interés especial en ese periodo. Estos desplazamientos junto con las otras diferencias, MZ-SC, MZ-PA y MZ-MAZ, también se muestran en la Figura 9.

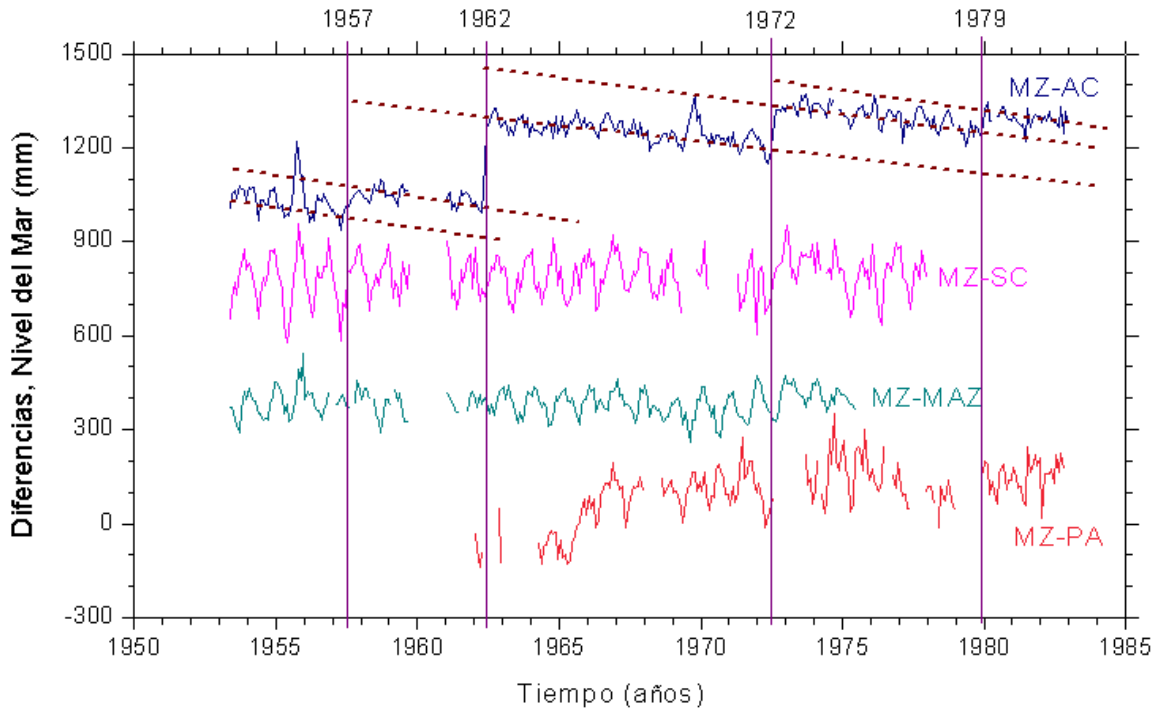


Figura 9. Registros mensuales diferenciales observados entre Manzanillo y otras estaciones: Acapulco, Puerto Ángel, Mazatlán, Salina Cruz. Las líneas verticales señalan los tiempos de la discordancia en el registro diferencial MZ-AC, donde probablemente han ocurrido el movimiento vertical de la costa debido a los SSE y los terremotos. Las líneas punteadas indican la tendencia de la señal para los periodos de tiempo marcados por las líneas verticales.

Al tomar la diferencia entre la señal de Manzanillo con los registros en otras estaciones mareográficas para parcialmente reducir efectos no tectónicos, podemos observar en las gráficas que solamente la señal relativa de Acapulco (MZ-AC), muestra cuatro desplazamientos anómalos aparentes, aunque con demasiado ruido en la señal, producido por los efectos anuales y semianuales, y el cambio de nivel del mar debido al ENSO y otros factores. Una primera suposición es que estos desplazamientos no se observan confiables en las otras diferencias debido al ruido con amplitud más alta, es

decir, que los desplazamientos anómalos son pequeños y no se distinguen en la señales mareográficas debido al ruido que tienen estas señales. Se utilizarán algunos métodos de filtración para eliminar el ruido de origen armónico (mareas y efectos estacionales) y quasi-periódico/estático (ENSO).

En la señal relativa de MZ-AC el desplazamiento abrupto de 1962 fue provocado por un doblete de temblores $M_w \sim 7.0$ (levantamientos instantáneos de la corteza a lo largo de la falla) ocurridos el 11 y 19 de mayo de ese año. Este cambio anómalo del nivel del mar del orden de 22cm ya ha sido reportado por las publicaciones anteriores de *Grivel et al. 1967*; *Cruz and Wyss et al. 1983*; *Ortiz et al. 2000*. Mientras el ascenso de la costa en Acapulco durante los terremotos de 1962 fue casi instantáneo [*Ortiz et al. 2000*, análisis de datos crudos con muestreo en minutos], los cambios del nivel del mar en 1957, 1972 y 1979 ocurrieron durante unos meses, como podemos observar en los registros mareográficos diarios (ver Figura 10) ya que muestran una deformación continua en la señal del nivel del mar y no un cambio abrupto, lo cual nos hace suponer que se pueden tratar de eventos lentos. En particular para el desplazamiento ocurrido en 1972 en Acapulco, se conoce también que no tiene relación con ningún temblor cercano de gran magnitud conocido en esta zona y el análisis del logfile de la estación en Acapulco (ver Anexo B, logfile de Acapulco) confirma que esta anomalía del nivel del mar no fue producida tampoco por el cambio de sitio de la estación o por algún otro factor o error tectónico. En la Figura 10 se muestra la serie de datos mareográficos diarios de Acapulco y de MZ-AC para un periodo de 2 años envolviendo los posibles eventos lentos de 1957 y 1972, los cuales, son desplazamientos producidos por una deformación continua durante meses.

En la misma Figura 10 también se muestran los datos diarios de Manzanillo y de MZ-AC para mostrar que la anomalía de 1979 es posiblemente un evento lento tectónico y no fue ocasionado por otros factores de carácter instantáneo, como un cambio de sitio de la estación o por algún otro factor o error tectónico (ver también logfile de Manzanillo en el Anexo B).

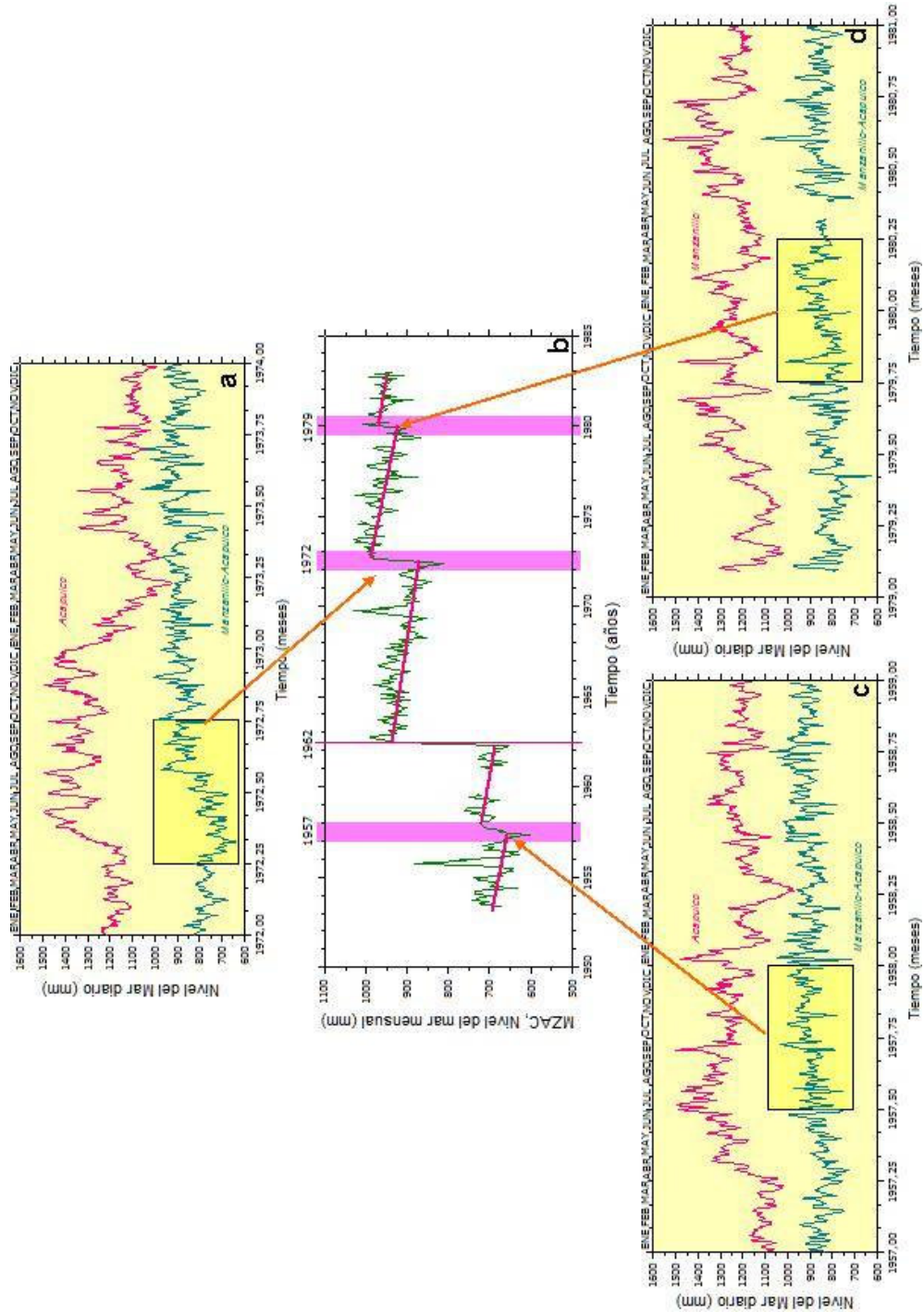


Figura 10. Datos diarios de Acapulco y diferencia entre datos diarios de Manzanillo y Acapulco en (a) y (c) para las épocas de 1957-1959 y 1972-1974 respectivamente. Datos diarios de Manzanillo y diferencia entre datos diarios de Manzanillo y Acapulco en (d) para la época de 1979-1981. Las líneas verticales en el registro mensual diferencial MZ-AC en (b) señalan los tiempos de discordancia en el registro donde probablemente han ocurrido los SSE de 1957, 1972 y 1979 y los terremotos 1962. Los recuadros en amarillo (en a, c y d) marcan aproximadamente el periodo que duro cada evento lento.

CAPITULO II

2.1 RESULTADOS

2.1.1 VARIACIONES ARMÓNICAS DEL NIVEL DEL MAR

Al filtrar los registros mareográficos con el filtro armónico se removieron las señales provocadas por componentes anuales y semianuales y dejando el efecto de El Niño entre otros efectos con menor amplitud y algunos de periodo más largo (los cuales se muestran más adelante). En la Figura 11 se compara el registro original y el filtrado para el registro mareográfico (promedio mensual) de Acapulco, mostrando también el modelo del nivel del mar obtenido y en la Figura 12 se muestran todas las señales procesadas con el modelo lineal.

En la señal de Acapulco mostrada en la Figura 11, cabe señalar que se ha removido el levantamiento cosísmico de la costa provocado por los terremotos de 1962 (Mw 7.1, 7.0), ya que la amplitud de este evento altera el análisis del modelo lineal. Además, se ha podido remover dicho evento debido a que se conoce la amplitud (de 22.7cm) y duración (8 días y 46 minutos) con bastante precisión de acuerdo a lo reportado por *Ortiz et al., 2000*.

En el Anexo C se muestra la comparación (al igual que en la Figura 11) de los registros originales y los filtrados para los mareógrafos en Manzanillo, Salina Cruz, Puerto Ángel y Mazatlán.

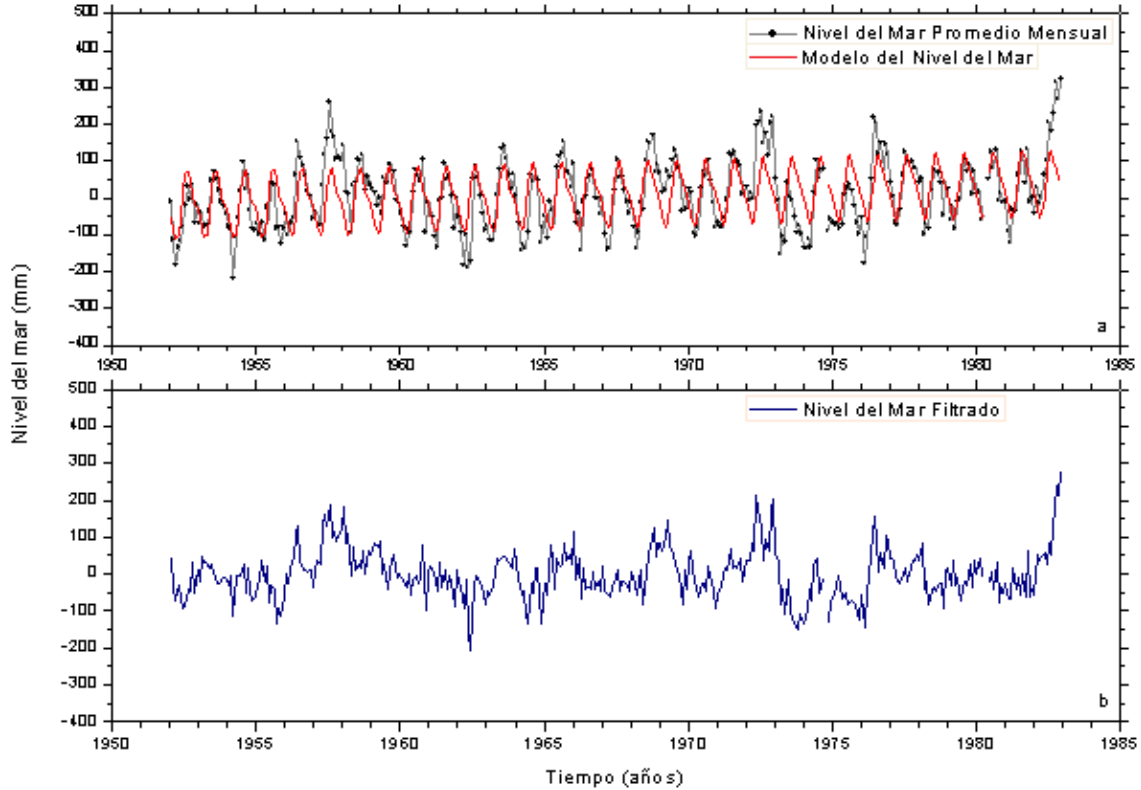


Figura 11. (a) Se muestran los datos del Nivel Promedio Mensual para la estación mareográfica de Acapulco y el Modelo del Nivel del Mar obtenido. El registro inicial está corregido por el levantamiento de la costa de 22cm durante los terremotos de 1962 en Acapulco [Ortiz et al., 2000] (b) Señal mareográfica filtrada.

La tendencia lineal \hat{a} refleja principalmente la combinación de los levantamientos lineales verticales de la corteza y el aumento del nivel del mar eustático en la locación de la estación mareográfica. Los valores calculados para las cinco estaciones mareográficas se muestran en la tabla I. Se debe señalar que los valores de tendencia lineal obtenidos, están dentro de los límites estimados en los estudios del cambio del nivel del mar global, los cuales muestran una tendencia lineal de 1.5-2.5mm/año en los últimos 100 años [por ejemplo, Ugur et al., 2001]. El valor y la desviación estándar σ de la tendencia depende (además de otros factores) de la duración del registro y la existencia de las brechas en la serie de tiempo (e.g., registro de PA).

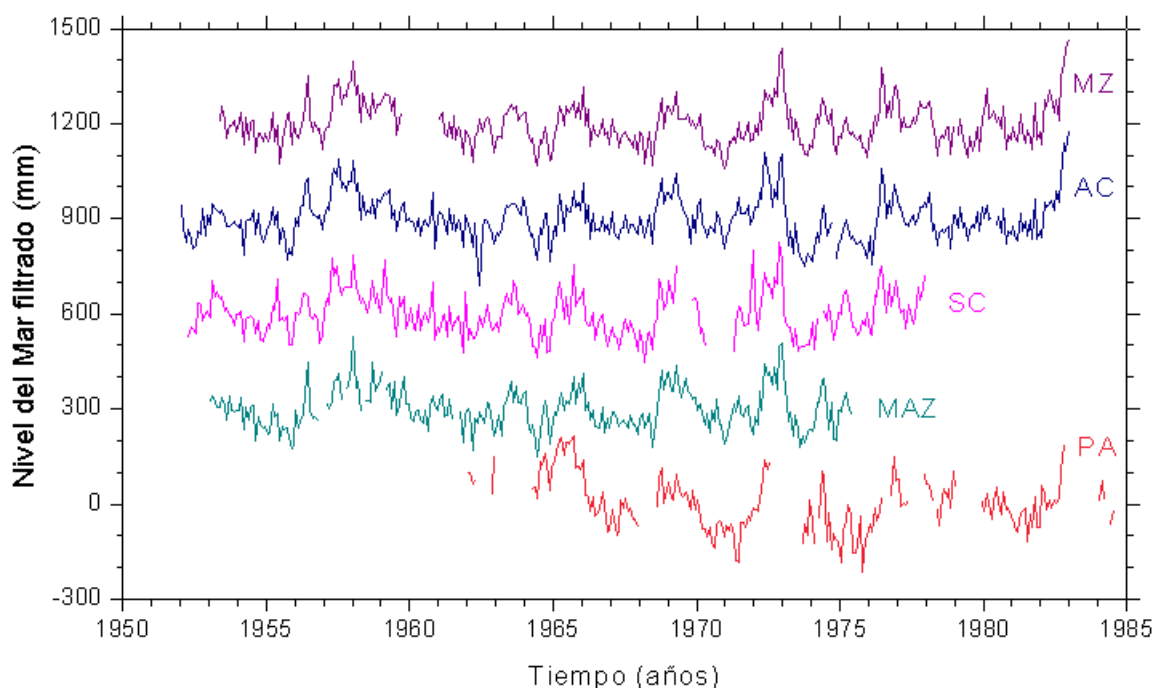


Figura 12. Registros mareográficos filtrados con el modelo armónico, disminuyendo así el “ruido” de las mareas y otros factores anuales y semianuales, dejando los efectos provocados por El Niño, como también otros efectos de menor amplitud y efectos de mareas de periodos más grandes.

Tabla I
Tendencia Lineal del Nivel del Mar

Estación Mareográfica	Tendencia Lineal, \dot{a} (mm/año)	Desviación Estándar, $\sigma_{\dot{a}}$ (mm/año)
Manzanillo	2.6	0.4
Acapulco	2.1	0.4
Salina Cruz	1.6	0.5
Mazatlán	1.3	0.6
Puerto Ángel	0.6	1.0

Tabla II
Periodo Anual

Estación Mareográfica	Amplitud, A (mm)	σ_A (mm)	Fase, ϕ (años) 1951.0+	σ_ϕ (años)
Manzanillo	97	7	0.8	0.5
Acapulco	79	7	0.8	0.4
Salina Cruz	96	7	0.9	0.5
Mazatlán	133	7	0.8	0.5
Puerto Ángel	60	10	0.9	1.2

Para las señales obtenidas mostradas en la Figura 12, los valores calculados de los constituyentes (amplitud, A y fase, ϕ) para las componentes anuales y semianuales obtenidas a partir de las ecuaciones (2) y (4) se muestran en las tablas II y III, en las cuales también se señalan las desviaciones estándar obtenidas de la ecuación (5).

Tabla III
Periodo Semianual

Estación Mareográfica	Amplitud, A (mm)	σ_A (mm)	Fase, ϕ (años) 1951.0+	σ_ϕ (años)
Manzanillo	33	5	0.9	0.4
Acapulco	28	6	0.9	0.3
Salina Cruz	35	3	0.9	0.3
Mazatlán	18	7	0.9	0.6
Puerto Ángel	20	10	0.9	0.6

2.1.2 EFECTO DE EL NIÑO

Utilizando el método de regresión lineal, se obtuvo la estimación de los cambios en el nivel del mar producidos por el efecto de El Niño, los cuales se muestran en la Figura 13. La comparación para la señal de Acapulco del registro filtrado por el modelo armónico y el filtro parcial para el efecto de El Niño, se encuentra en la Figura 14, en la cual también se muestra la señal "predicha" obtenida a partir de los coeficientes mostrados en la tabla IV, donde se señalan los valores de la pendiente m y la ordena b del ajuste lineal para cada una de las estaciones mareográficas. En la gráfica de la Figura 15 se muestra el ajuste lineal para los datos mareográficos de Acapulco y los datos del ENSO mensuales.

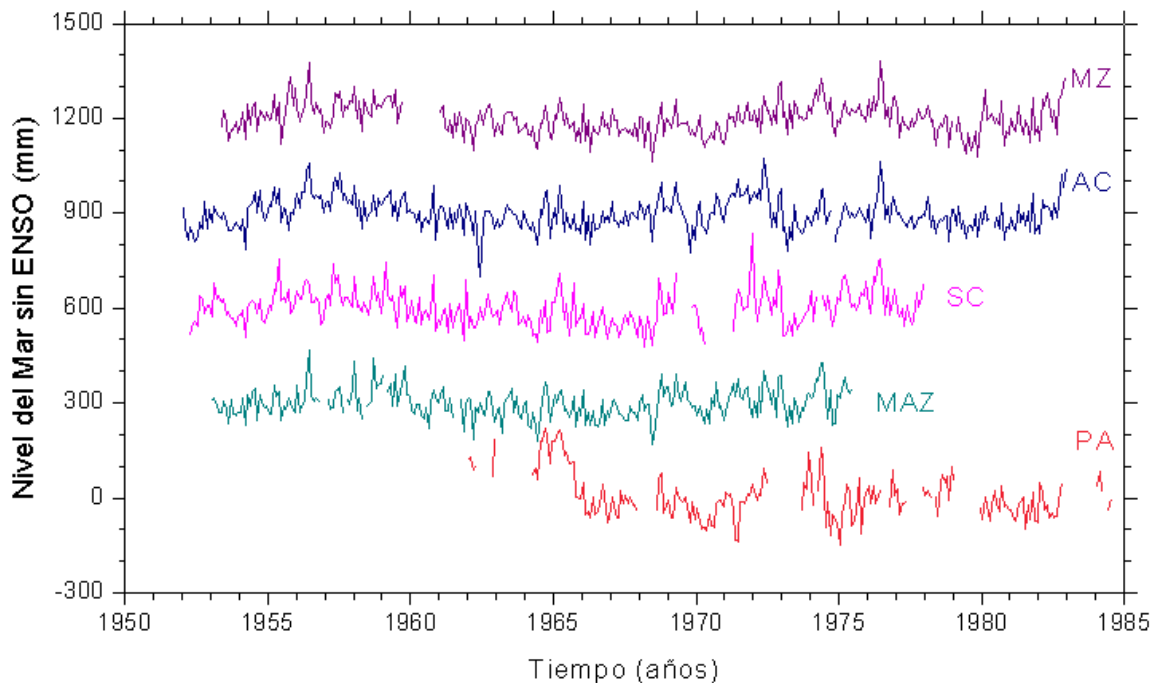


Figura 13. Señales mareográficas residuales aplicando modelo de regresión lineal, que parcialmente elimina el efecto de El Niño. Se quedan todavía los efectos de mareas y de actividad solar, y de periodos más largos y menor amplitud.

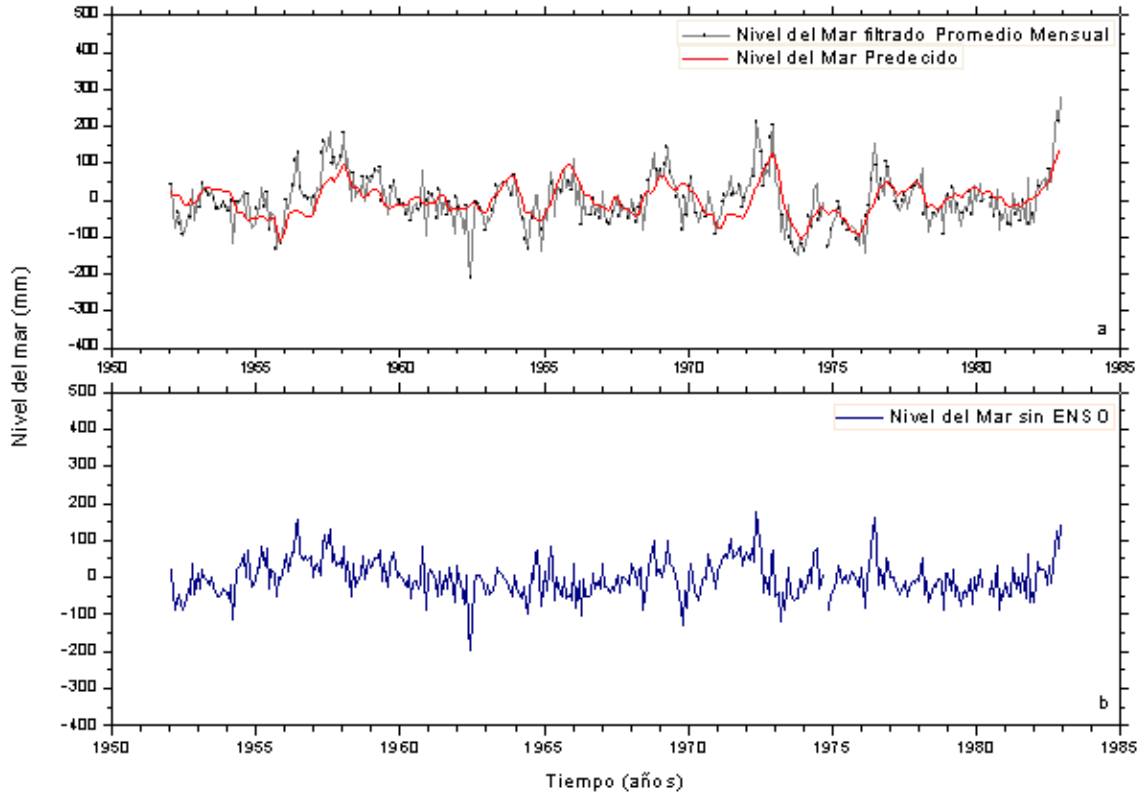


Figura 14. (a) Señal mareográfica en Acapulco anteriormente filtrada (Figura 11) con el modelo armónico y el nivel del mar predicho a partir de la regresión lineal con los datos del ENSO. (b) Residual de las señales mostradas en (a), eliminando así parcialmente el efecto de El Niño.

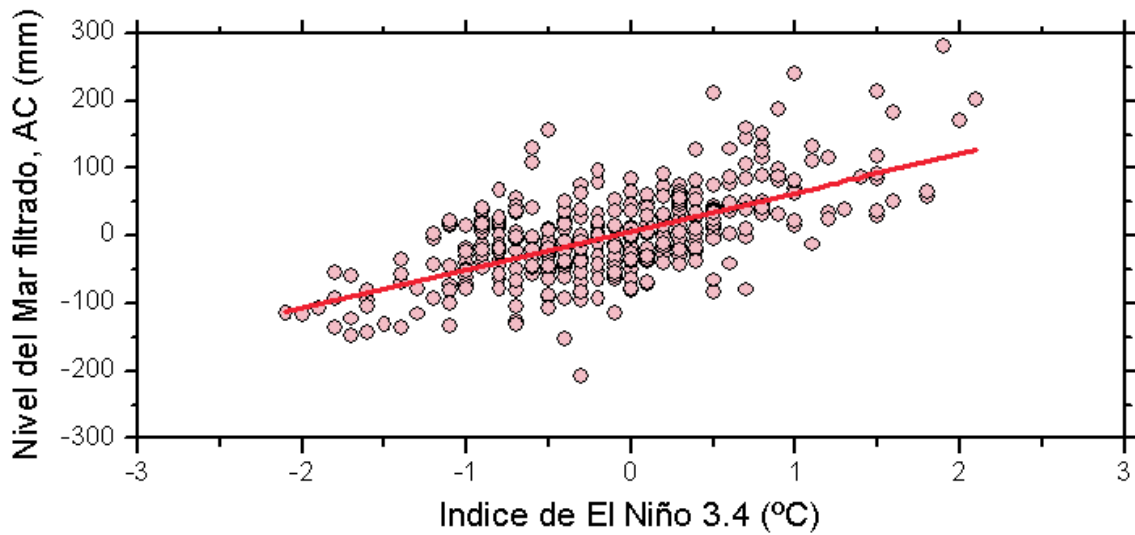


Figura 15. Gráfica de la regresión lineal de la señal del nivel del mar filtrada de Acapulco y los datos del ENSO.

Tabla IV
Coeficientes del ajuste de regresión lineal

Estación Mareográfica	Pendiente, m (mm/°C)	σ_m (mm/°C)	Ordenada, b (mm)	σ_b (mm)
Manzanillo	55	3	6	3
Acapulco	57	4	7	3
Salina Cruz	49	4	7	3
Mazatlán	54	4	9	3
Puerto Ángel	69	10	9	6

Es interesante señalar que la tabla IV muestra cuanto aumenta el nivel del mar en cada grado centígrado y mostrando así una relación entre el nivel del mar y el ENSO en las estaciones mareográficas del Pacífico mexicano, la cual no se ha realizado anteriormente. Hay que tomar en cuenta que la variación del ENSO se refiere al cambio de la temperatura de la superficie del mar en la zona ecuatorial del Pacífico y no enfrente de la costa del pacífico mexicano.

En el Anexo D se encuentran las comparaciones entre las señales filtradas con el modelo armónico y las señales filtradas parcialmente con el método de regresión lineal para las estaciones de Manzanillo, Salina Cruz, Puerto Ángel y Mazatlán. También, en el mismo anexo D se encuentran los ajustes lineales obtenidos para cada una de las estaciones mencionadas.

2.1.3 ELIMINANDO EL EFECTO DE LA ACTIVIDAD SOLAR

En todos los registros mareográficos filtrados, mostrados en la Figura 13, se encuentra una señal de periodo largo que no hemos filtrado con los procedimientos anteriores, ya que el periodo de esta señal no está bien definido y su amplitud varía para cada estación mareográfica. Sin embargo,

se le atribuye al efecto producido por la actividad solar. Como ya se había mencionado anteriormente, el periodo global debido a la actividad solar varía entre 9-14años.

Para obtener dicho periodo y estimar un mejor ajuste a los registros filtrados, utilizamos el programa Origin 8.0, el cual cuenta con el código fuente (mostrado en el Anexo E) para encontrar el periodo p , la amplitud A , la fase ϕ y la intersección y_0 con el eje y para el tiempo $t=0$, de la señal analizada. La ecuación utilizada para el análisis es una simple función de tipo seno:

$$y = y_0 + A \sin\left(\pi \frac{t - \phi}{p}\right), \quad A > 0 \quad (13)$$

Los resultados obtenidos para cada una de las estaciones mareográficas se muestran en la tabla V, y las señales resultantes se observan en la Figura 16. La comparación de la señal después de eliminar parcialmente El Niño y la señal sin el periodo de la actividad solar para la estación mareográfica de Acapulco, se muestra en la Figura 17, donde en 17b podemos observar como es que el periodo largo fue eliminado. Para las otras estaciones mareográficas las comparaciones de las señales se encuentran en el mismo anexo E.

Tabla V
Coeficientes para la Actividad Solar

Estación Mareográfica	Amplitud, A (mm)	σ_A (mm)	Fase, ϕ (años)	σ_ϕ (años)	Periodo, P (años)	σ_P (años)
Manzanillo	21.8	3.3	1949.3	2.6	14.6	0.6
Acapulco	29.6	3.5	1945.0	1.7	13.9	0.4
Salina Cruz	31.1	4.3	1942.9	3.6	17	2.0
Mazatlán	25.1	4.0	1947.6	4.0	15.2	0.9
Puerto Ángel	41.3	6.4	1942.0	3.4	11.8	0.6

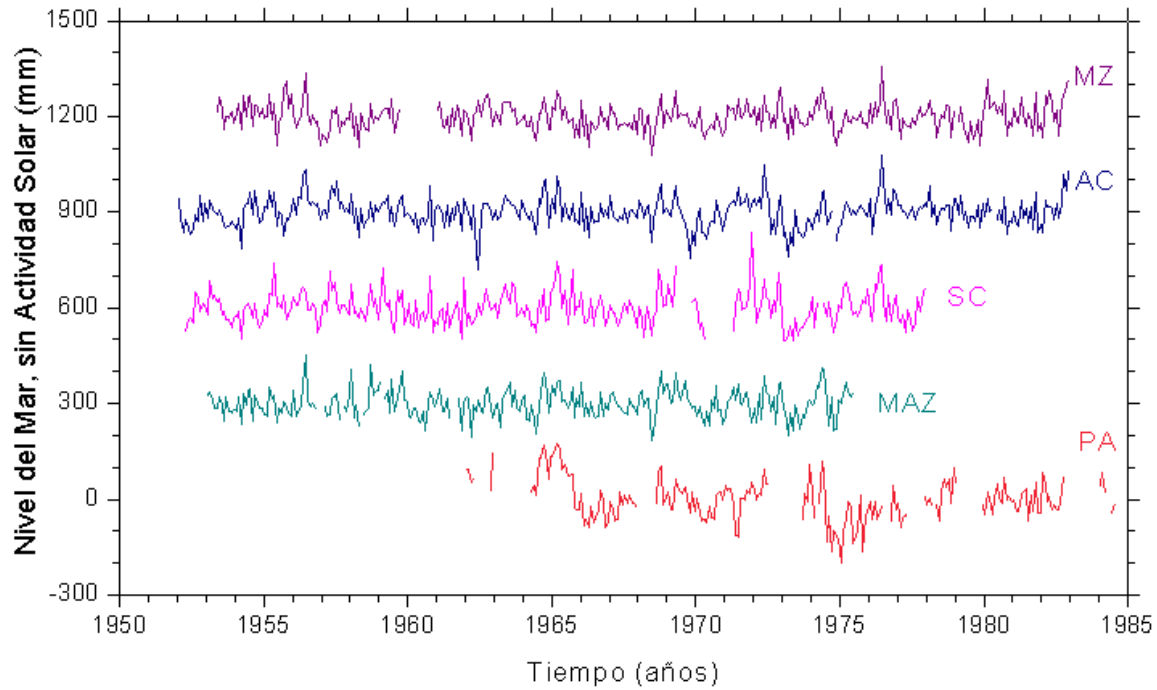


Figura 16. Señales mareográficas filtradas con el modelo de ecuación de onda descrito arriba, eliminando el efecto producido por la actividad solar, aunque dejando aun efectos de amplitud más pequeña.

En realidad las fases y periodos de la actividad solar deben de ser iguales para todas las estaciones mareográficas. La variación de estos parámetros es debido a que los registros son insuficientemente largos y el ruido es diferente en cada estación, incluyendo el efecto de los eventos asísmicos lentos.

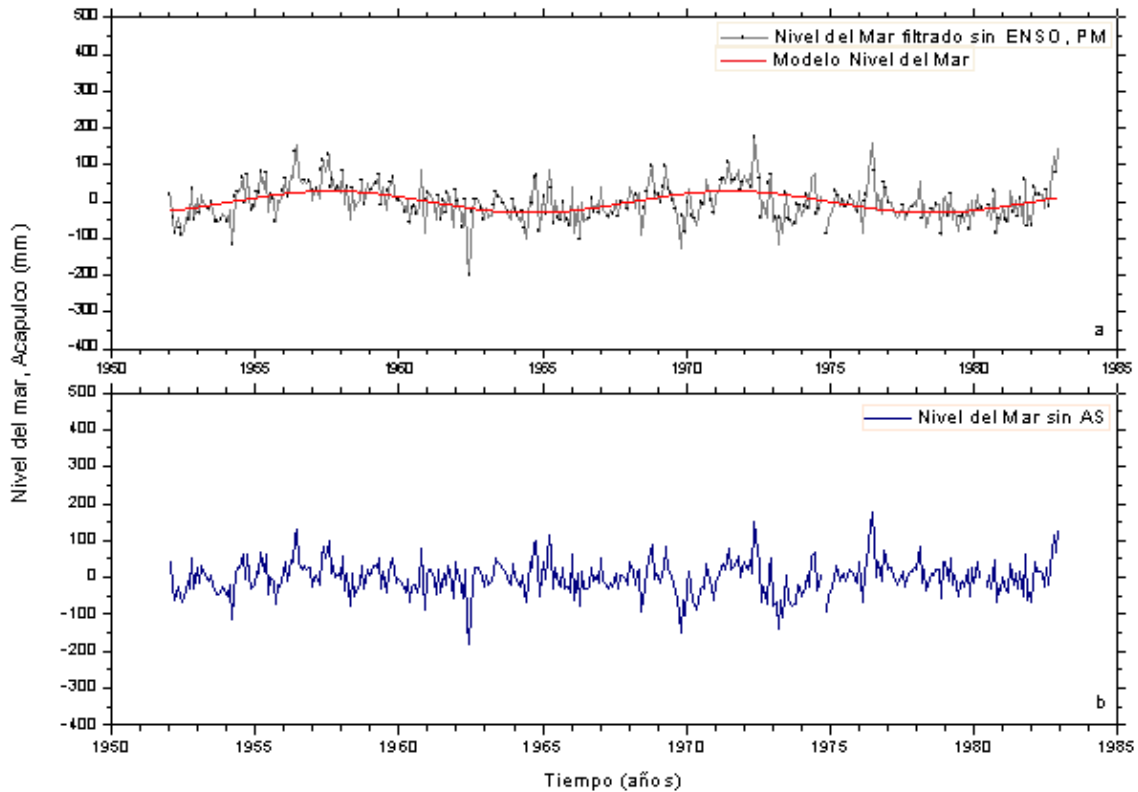


Figura 17. (a) Registro mareográfico de Acapulco anteriormente filtrado donde se eliminó parcialmente el ENSO con el método de regresión lineal y enfrente se muestra el ajuste (13) del nivel del mar. (b) Residual de la señal mostrada en (a), eliminando así el efecto producido por la Actividad Solar (AS). PM = Promedio Mensual.

2.1.4 RESIDUALES DEL NIVEL DEL MAR FILTRADOS

El filtrar los residuales del nivel del mar obtenidos anteriormente, es para mostrar con mayor claridad los movimientos de la corteza episódicos, de acuerdo con las recomendaciones de *Vanicek et al. 1978*. Movimientos locales de la corteza episódicos de magnitud $\geq 10\text{cm}$, originalmente oscurecidos por los efectos mencionados, deben ser distinguibles en las gráficas obtenidas mostradas en la Figura 18.

En el modelo para filtrar (suavizar) los residuales y de esta manera estudiar las variaciones lentas en los registros mareográficos, se debe considerar los residuales en la banda de frecuencia de 3-5 meses, esto se obtiene a partir

del análisis espectral por mínimos cuadrados para registros mareográficos realizado por *Vanicek et al. 1971*, ya que en ésta banda de frecuencia los residuales filtrados se ven considerablemente afectados, posiblemente debido a corrientes mareográficas con frecuencias más altas. Los residuales obtenidos anteriormente fueron filtrados para eventos de duración de más de 4 meses usando el filtro lineal siguiente:

$$R^*(t_i) = \frac{1}{10} [R(t_{i-2}) + 2R(t_{i-1}) + 4R(t_i) + 2R(t_{i+1}) + R(t_{i+2})] \quad (14)$$

Donde $R(t_i)$ es el nivel del mar en el mes t_i . Los residuales filtrados R^* obtenidos se muestran en la Figura 18 y la comparación para el residual y el residual filtrado de la señal de Acapulco se muestra en la Figura 19.

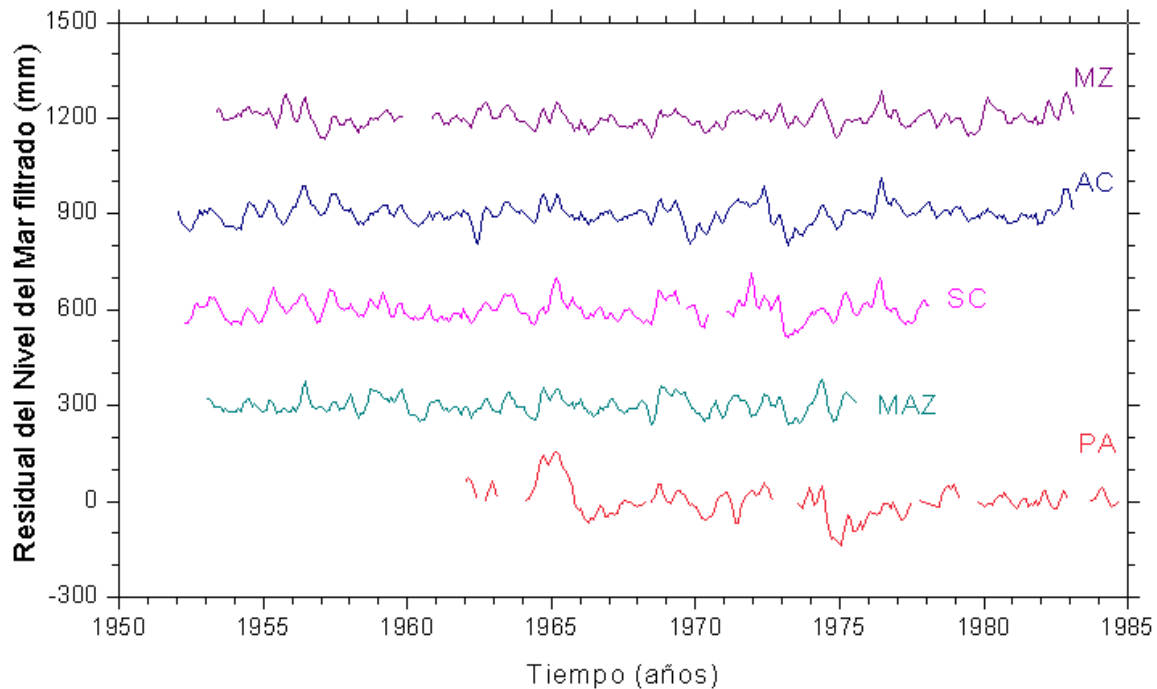


Figura 18. Resultados filtrados de los residuales de las señales mareográficas obtenidas con el modelo de ecuación (14) descrito arriba, eliminando efectos producidos en la banda de frecuencia de 3-5 meses.

Este método de filtración (o suavización) es para detectar movimientos verticales episódicos de duración de más de 4 meses y de magnitud de 10cm, sin embargo, para detectarlos mejor, se puede hacer la diferencia entre pares de los residuales filtrados obtenidos, lo cual se realizará y se analizará en el capítulo siguiente.

Una forma de medir el grado de sucesos del análisis realizado es por la disminución en la variabilidad de las series de tiempo analizadas. La tabla VI muestra la información sobre la variabilidad representada por las desviaciones estándar de las variaciones de la señal del nivel del mar, los residuales y los residuales filtrados.

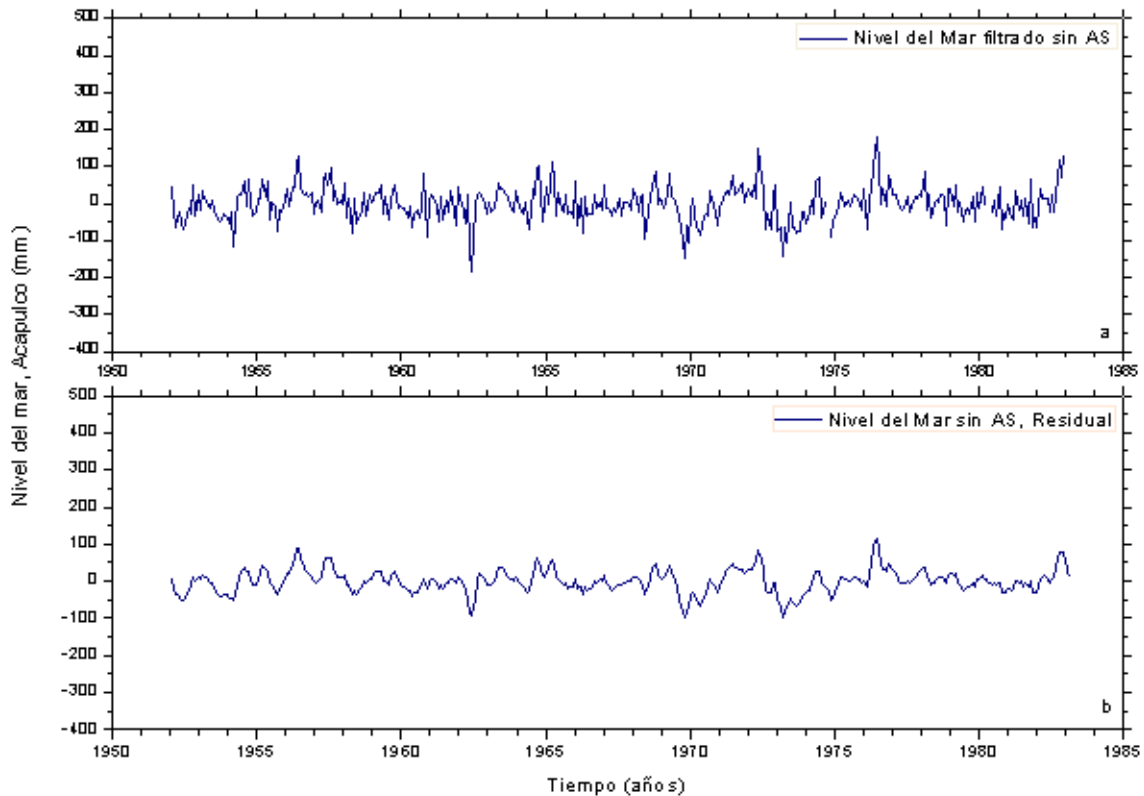


Figura 19. (a) Residual de la señal mareográfica de Acapulco anteriormente filtrada, donde se eliminó parcialmente el ENSO y el efecto producido por la Actividad Solar (AS). (b) Residual filtrado de la señal mostrada en (a) utilizando el filtro de la ecuación (14).

Tabla VI
Variabilidad del Nivel del Mar

Estación Mareográfica	Variaciones del Nivel del Mar, σ (cm)	Variaciones Residuales, σ (cm)	Residuales Filtrados, σ (cm)
Manzanillo	101	43	27
Acapulco	92	46	32
Salina Cruz	97	50	33
Mazatlán	116	44	27
Puerto Ángel	95	66	48

Las desviaciones estándar disminuyeron en promedio para las cinco estaciones en un 51% para las variaciones residuales, es decir, para las señales filtradas donde se eliminaron las señales periódicas, el ENSO y la actividad solar, mientras que para los residuales filtrados, las desviaciones estándar disminuyeron en un 67%, lo cual indica el grado de la filtración. Muchos de los picos de la señal de los residuales filtrados son de "corta vida" y pueden ser removidos por un filtro de "corto plazo".

CAPITULO III

3.1 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

3.1.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos por el método de filtración por análisis armónico y por el método de regresión lineal, se vuelve a realizar la diferencia entre el residual de la señal filtrada para Manzanillo con los otras señales de las demás estaciones, para reanalizar a los eventos asísmos lentos con mas precisión.

La Figura 20, muestra el desplazamiento vertical mensual en la zona de subducción en el Pacífico mexicano, precisamente en Acapulco (16.84°N, 99.92°W) debido a éstos eventos lentos y los sismos. El primero es en 1957 con un ascenso provocado posiblemente por un SSE (Slow Slip Event) de $6\pm 2\text{cm}$ (error obtenido de la desviación estándar debido al procesamiento de los datos utilizando la expresión (12) del Capítulo I, que corresponde a la diferencia de valores en un punto entre dos líneas de regresión) cerca de Acapulco, esto debido a que en el análisis de logfile (ver Anexo B) no se indica ningún desplazamiento de sitio o algún otro efecto, además de que se puede observar en los registros mareográficos diarios (ver Figura 10) que no existe ningún desplazamiento abrupto en la señal, sino una deformación lenta continua. El segundo levantamiento de la costa que corresponde al doble sismo en el año de 1962 ($M_w=7.1$, 17-25N, 99.97°W y $M_w=7.2$, 17-12N, 99.95°W, siendo cerca de Acapulco el epicentro) para el que se obtuvo un levantamiento de $22\pm 2\text{cm}$ y el cual concuerda con lo obtenido por *Ortiz et al. 2000*, quien lo reportó a partir de datos crudos con muestreo en minutos,

ya que fue un desplazamiento casi instantaneo. Un evento lento en 1972 con un desplazamiento de $7\pm 2\text{cm}$ en Acapulco y el cual no es asociado a ningún terremoto grande conocido. Mientras que en 1979 solo se puede observar una subsidencia lenta que probablemente es desarrollada en la zona de transición a partir del límite más profundo de la zona sismogénica y que probablemente abarca una parte de la zona sismogénica (modelo de la zona de subducción obtenido de *Bandy et al. 1999*) de la interfase de las placas enfrente de la costa en Manzanillo y cuya amplitud es de $6\pm 2\text{cm}$ (Figura 20), ya que en la señal residual filtrada (mostrada en la Figura 18) para Manzanillo se puede notar un pequeño cambio en la tendencia de la señal, el cual se analizará más adelante.

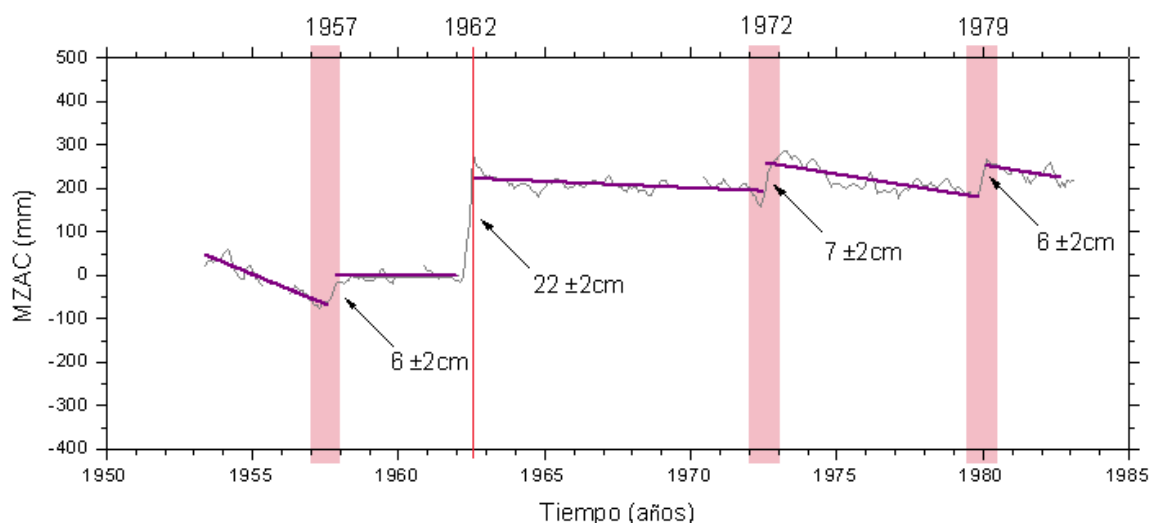


Figura 20. Diferencia entre Manzanillo y Acapulco (MZAC) de las señales residuales filtradas (mostradas en el capítulo II, sección IV). La línea de regresión muestra la tendencia de la señal en la fase inter-sísmica y, la línea y las barras (de ~ 1 año) verticales señalan los tiempos de la discordancia en los registros.

En la Figura 21 se muestra la diferencia entre el residual filtrado para los datos de Manzanillo y de Salina Cruz (MZSC), y en la cual se muestra que los eventos de 1957 y 1962 no aparecen, sin embargo se puede observar un cambio en la tendencia de la señal después de 1972, debido a que existe un posible desplazamiento de $6\pm 4\text{cm}$, el cual se puede asociar al SSE observado en Acapulco, ya que probablemente la propagación del SSE pudo ser similar al evento de 2001-2002 reportado por *Franco et al. 2005*, debido a que se

encontró que este SSE de 2001-2002 genero una zona de deformación muy grande en Guerrero y una más pequeña en Oaxaca, por tanto suponemos que los eventos son similares, ya que la amplitud del desplazamiento no es muy significativa debido al error obtenido y menor en comparación a lo obtenido en Acapulco.

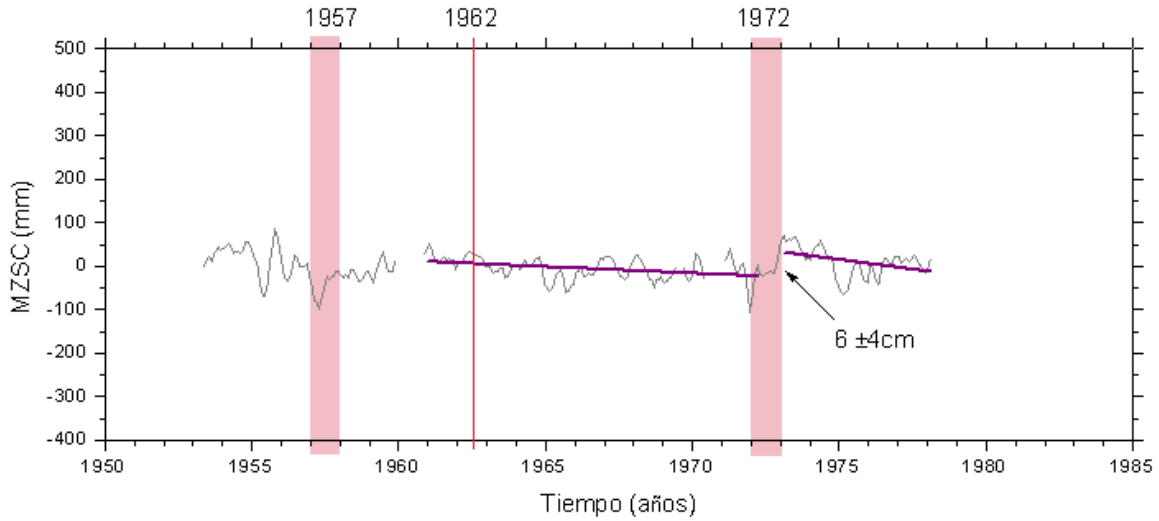


Figura 21. Diferencia entre Manzanillo y Salina Cruz (MZSC) de las señales residuales filtradas (mostradas en el capítulo II, sección IV). La línea de regresión muestra la tendencia de la señal en la fase inter-sísmica y, la línea y las barras (de ~1año) verticales señalan los tiempos de la discordancia en los registros.

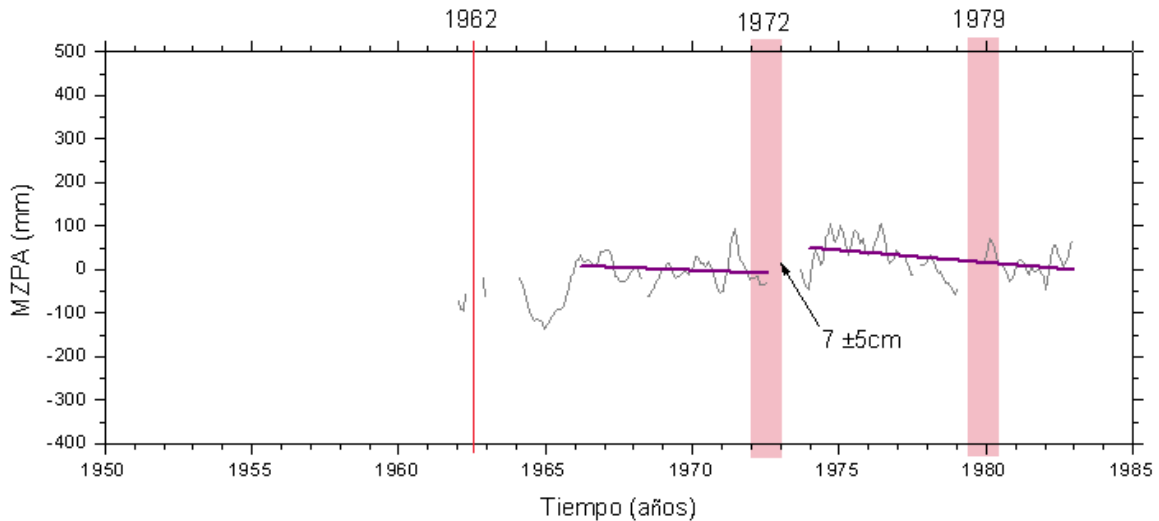


Figura 22. Diferencia entre Manzanillo y Puerto Ángel (MZPA) de las señales residuales filtradas (mostradas en el capítulo II, sección IV). La línea de regresión muestra la tendencia de la señal y, la línea y las barras (de ~1año) verticales señalan los tiempos de la discordancia en los registros.

La diferencia entre el residual filtrado para los datos de Manzanillo y Puerto Ángel (MZPA) se muestra en la Figura 22. En dicha figura se puede observar que ninguno de los eventos es apreciable en la señal, tanto el evento de 1957 como el de 1962, obviamente debido a que no existen datos completos antes de esta fecha. El evento SSE de 1972 en Acapulco es débilmente apreciable en la señal de Puerto Ángel, ya que se puede notar un cambio en la tendencia de la señal después de 1972 el cual es de $7 \pm 5 \text{cm}$, pero debido probablemente al ruido residual del registro en esta estación mareográfica, la duración de registro muy corta y a una brecha en los datos que coinciden con el SSN (Servicio Sismológico Nacional) de 1972, este evento no es completamente apreciable.

La Figura 23 muestra la diferencia entre el residual filtrado de las señales de Manzanillo y Mazatlán (MZMAZ) y en la cual se observa que no sufre ningún desplazamiento súbito lo que indica, probablemente, que el evento lento de 1972 estaba ocurriendo más al sur, dentro de la zona de subducción del Pacífico mexicano, y más significativo en el área de Acapulco (Figura 20).

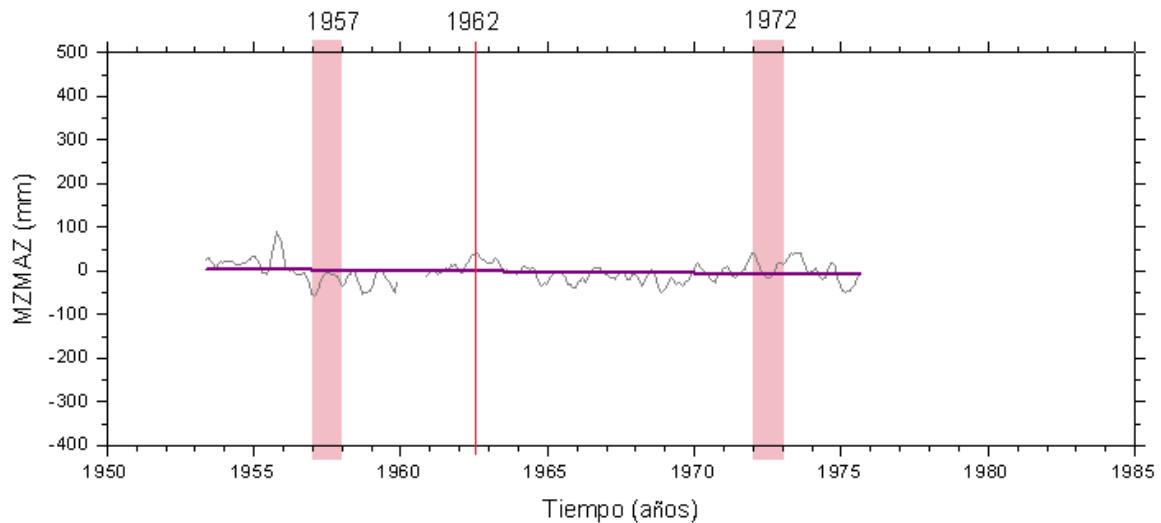


Figura 23. Diferencia entre Manzanillo y Mazatlán (MZMAZ) de las señales residuales filtradas (mostradas en el capítulo II, sección IV). La línea de regresión muestra la tendencia de la señal y, la línea y las barras (de ~ 1 año) verticales señalan los tiempos de la discordancia esperada en los registros.

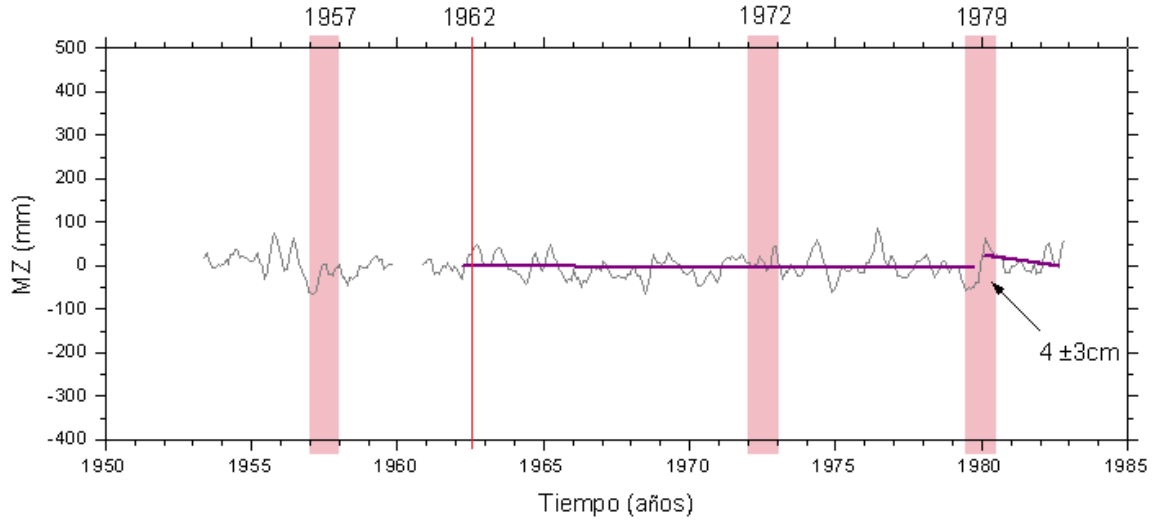


Figura 24. Señal residual filtrada de Manzanillo (MZ). La línea de regresión muestra la tendencia de la señal y, la línea y las barras (de ~ 1 año) verticales señalan los tiempos de la discordancia esperada en los registros.

Para la señal residual filtrada de Manzanillo, mostrada en la Figura 24, se tomaron dos líneas de regresión, la primera antes del evento de 1979 (el cual ya fue observado en MZAC) y la segunda después del evento, esto con el fin de poder observar un posible cambio en la señal, ya que en el residual filtrado de Acapulco (ver Figura 18) la tendencia en la señal es continua, lo cual, al parecer, no ocurre en el residual filtrado de Manzanillo (mostrado arriba), debido a que este presenta un pequeño cambio en la tendencia de la señal en 1979, en la que se muestra un aumento en el nivel del mar posiblemente a causa de una subsidencia que ocurre enfrente de la costa. Aquí se puede observar un pequeño desplazamiento de 4 ± 3 cm en 1979, aunque no es confiable debido al error que presenta, esto debido a que aun existe "ruido" en la señal residual filtrada de Manzanillo. Este levantamiento de 1979 se puede observar con mayor claridad en la señal de MZAC y la cual corresponde a 6 ± 2 cm, debido a que entre las estaciones mareográficas de Manzanillo y Acapulco (como ya se menciono anteriormente) existe buena coherencia, es decir, su ubicación mareográfica es muy similar, lo que implica que en las señales mareográficas exista buena correlación, tanto en amplitud como en fase, lo cual nos permite eliminar algunos otros efectos de mareas. También los registros mareográficos diarios de Manzanillo

(mostrados en la Figura 10) revelan que esta deformación es continua y lenta, además de que el análisis de logfile (ver Anexo B, logfile de Manzanillo) no señala ningún cambio de sitio o algún otro factor o error tectónico.

3.1.2 MODELACIÓN DE LOS DATOS

La deformación observada en las señales obtenidas puede ser comparada con la deformación vertical superficial predicha por modelos de dislocación sobre la falla en un semi-espacio elástico [*Savage et al. 1983*], asumiendo un estado de deformación constante durante un periodo intersísmico, así como un acoplamiento homogéneo en la zona de acoplamiento.

3.1.2.1 Modelo de Deformación

Para determinar el deslizamiento sobre la interfase de placas durante el terremoto silencioso y con el fin de obtener un ajuste cuantitativo de la deformación observada se modelaron los resultados obtenidos usando el modelo de dislocación en el espacio elástico en 2D por *Savage et al.* [1983]. Este es un modelo bidimensional diseñado para representar la acumulación de deformación que ocurre en algunas zonas de subducción. En este modelo lo que se hace es aproximar el contacto sismogénico, acoplado entre la placa continental y la placa oceánica como un plano de interfase. La acumulación de deformación producida durante una etapa intersísmica es modelada por una superposición lineal de un deslizamiento estable y una solución complementaria de un desdoblamiento normal sobre la zona acoplada (Figura 25).

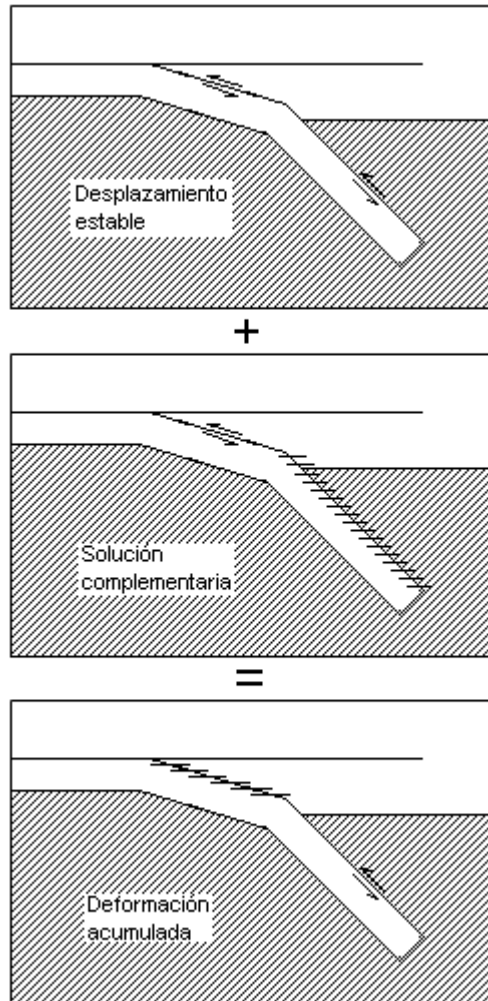


Figura 25. Modelo de superposición de la acumulación de deformación en una zona de subducción. La astenósfera esta indicada por las líneas diagonales. La zona de acoplamiento (sin desplazamiento) esta indicada con las líneas horizontales que cruzan la interfase. Las flechas indican la dirección del movimiento en la interfase de las placas.

El modelo requiere que el estado estable de subducción sea cinemático, lo cual implica que no se genere ninguna deformación diferencial en la superficie de la placa continental por este deslizamiento sobre la falla. De esta manera la deformación que se observa puede ser enteramente descrita por la solución complementaria, la cual representa un desplazamiento normal $V \cdot \Delta T$, sobre la zona acoplada, donde V es la velocidad de convergencia de las placas y ΔT es el lapso de tiempo para el cual se calcula la deformación.

3.1.2.2 Modelación de los Resultados

En el modelo de deformación utilizado, se requiere de ciertos parámetros, como la velocidad de deslizamiento de la placa o de convergencia, el ángulo con el que subduce la placa oceánica bajo la placa continental, la distancia que existe a partir de la trinchera y la profundidad a la que se encuentra la placa en el punto que se está considerando.

La velocidad de convergencia que se propone es obtenida de los registros de GPS ubicados en la región de Guerrero en el sur de la costa mexicana a lo largo de la frontera entre las placas de Cocos-Norteamérica, dicha velocidad de convergencia publicada por *DeMets et al. 1994* varía de 48mm/año en 104°W a 75mm/año en 94°W, y las publicadas recientemente por *Larson et al. 2007* varían de 52mm/año a 59mm/año en 258°W-262°W.

En los modelos de dislocación para la zona de subducción en el perfil de Acapulco, la geometría de interfase de las placas es basada en locaciones hipocentrales y modelación gravimétrica [*Kostoglodov et al. 1996*]. Para los eventos de 1957, 1962 y 1972 el máximo del levantamiento ocurre cerca de la costa, ya que la zona de acoplamiento entre las placas tectónicas se encuentra por debajo y cerca de la costa.

Es muy importante señalar que la modelación del desplazamiento sobre la falla en donde solo contamos con un solo punto y donde se determina la deformación vertical, se deben asumir algunas restricciones sobre el modelo, ya que los SSE son similares por el patrón de deformación y se escalan solamente con la magnitud del desplazamiento sobre la falla. Los desplazamientos horizontales y de levantamiento observados, y los cuales son utilizados en estos casos, son datos de los sitios de las estaciones de GPS que conforman la red permanente en Guerrero, ya que estamos suponiendo que los desplazamientos lentos ocurridos en 1957, 1972 son muy semejantes a los eventos lentos reportados en Acapulco, en 1998 [*Lowry et*

al. 2001], en el 2001-2002 [*Kostoglodov et al. 2003*] y en 2006 [*Larson et al. 2007*]. Los sitios de GPS que se utilizan en los modelos son ACAP, CAYA, TCOL, CHIL, IGUA y YAIG, de los cuales se obtuvieron los datos de los sitios y se normalizaron de acuerdo con los resultados obtenidos, para después hacer la modelación con el modelo de dislocación (la ubicación de los sitios de GPS se puede observar en la sección 3.1.3 Discusión, en la Figura 30).

En la Figura 26 se muestra el modelo para el evento lento de 1957, para el cual se utilizaron los parámetros mostrados en la Tabla VII y VIII. En la interfase se incluye la zona sismogénica que esta friccionalmente acoplada y en interfase transicional, subhorizontal, y de mayor profundidad. En la Figura 26a el desplazamiento asísmico se extiende sobre una distancia de 57 a 220km de la trinchera. El resto de la interfase esta libre de desplazamiento (slip). Mientras que en la Figura 26b existe el deslizamiento en los tres segmentos de la interfase de las placas el cual se extiende sobre la misma distancia.

Tabla VII
Parámetros utilizados para el modelo de la Figura 26a del SSE de 1957

Segmento	Ángulo (°)	Profundidad (km)	Deslizamiento (mm/año)	Longitud de secciones en la falla (km)
1	6	4	0	57
2	10	10	0	28
3	26	15	442	35
4	2	30	112	100
5	1	51	0	1000

Tabla VIII
Parámetros utilizados para el modelo de la Figura 26b del SSE de 1957

Segmento	Ángulo (°)	Profundidad (km)	Deslizamiento (mm/año)	Longitud de secciones en la falla (km)
1	6	4	0	57
2	10	10	152	28
3	26	15	152	35
4	2	30	112	100
5	1	51	0	1000

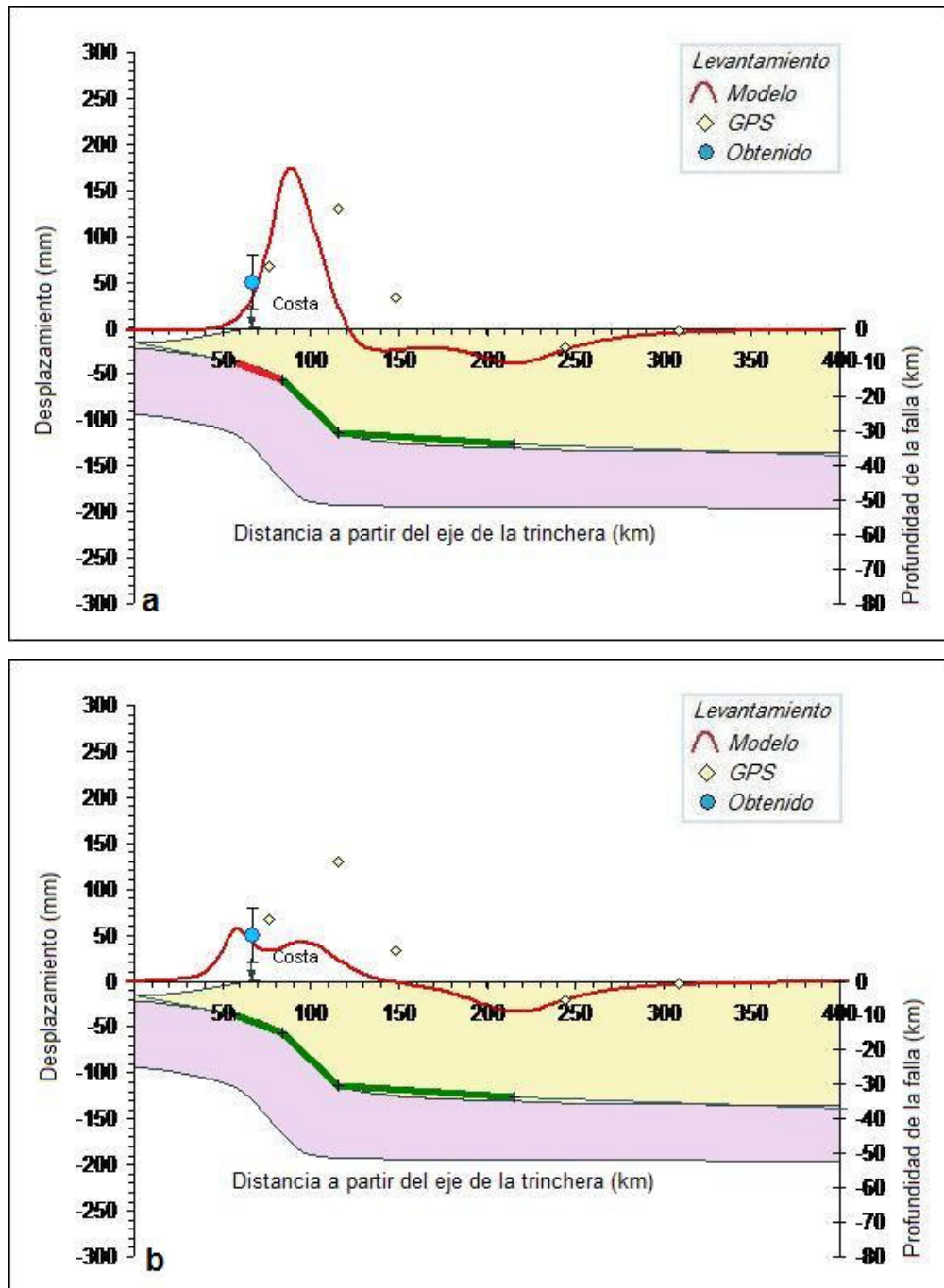


Figura 26. (a) Modelo de dislocación durante el terremoto silencioso de 1957. El deslizamiento asísmico ocurre sobre la interfase de 135km (3^{er} y 4^o segmento en verde) dejando la zona sismogénica parcialmente acoplada (primer segmento, en rojo, que comienza a 57km de la trinchera). (b) Modelo alternativo de dislocación del desplazamiento durante el terremoto silencioso de 1957. Lo mismo que en (a) solo que el desplazamiento asísmico ocurre en los tres segmentos acoplados anteriormente incluyendo el segmento sismogénico.

Tabla IX
Parámetros utilizados para el modelo de la Figura 27 del sismo de 1962

Segmento	Ángulo (°)	Profundidad (km)	Deslizamiento (mm/año)	Longitud de secciones en la falla (km)
1	6	4	0	57
2	10	10	752	28
3	26	15	0	35
4	2	30	0	100
5	1	51	0	1000

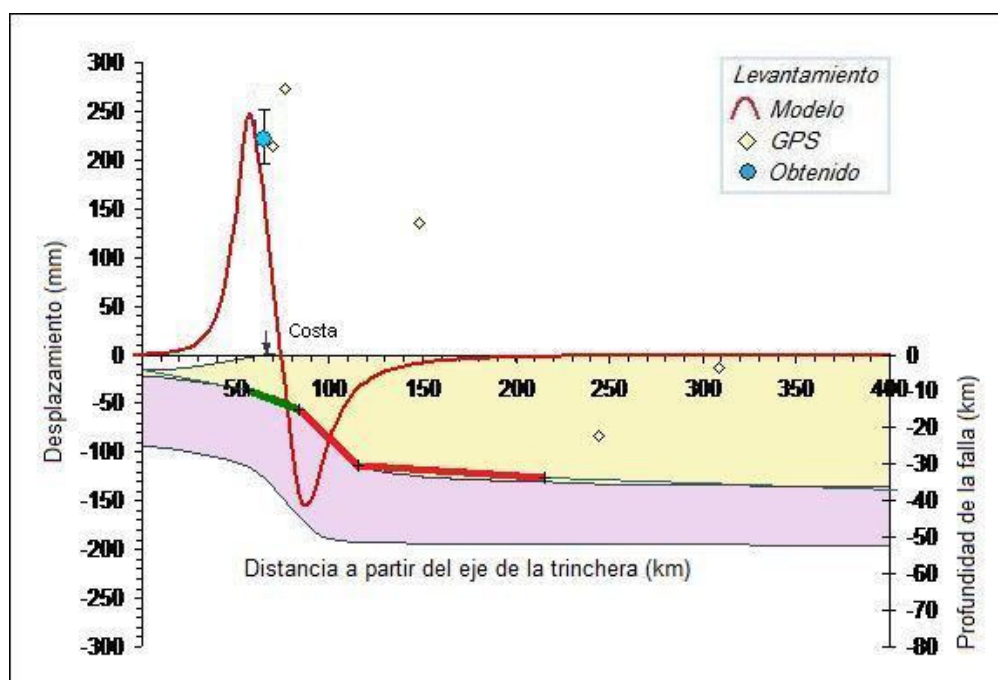


Figura 27. Modelos de dislocación durante los terremotos de 1962. (a) El desplazamiento ocurre sobre un segmento de 28km (segmento en verde que comienza a 57km de la trinchera y termina cerca de la costa). El 3^{er} y 4^o segmento en rojo no se están desplazando durante el corto tiempo del sismo.

En la Figura 27 se muestra el modelo para el evento sísmico de 1962 en donde existe mayor desplazamiento cerca y por debajo de la costa en la zona sismogénica y el cual es similar al modelo de tsunami en *Ortiz et al.* [2000]. La Tabla IX muestra los parámetros utilizados para el modelo de deformación de la Figura 27, en la cual solo hay deslizamiento en el primer segmento de la zona de acoplamiento intersísmico, el cual se extiende sobre una distancia

de 57 a 85km de la trinchera y dejando el resto de la interfase efectivamente acoplado durante el terremoto.

Para el evento de 1972 las Tablas X y XI muestran los parámetros utilizados para los modelos de deformación de la Figura 28, en la cual se muestra el modelo de dislocación en 2D en el que la parte (a) de la figura ocurre el deslizamiento sobre toda la zona de acoplamiento a una distancia de 57 a 220km de la trinchera dejando el resto de la interfase libre de deslizamiento.

Tabla X
Parámetros utilizados para el modelo de la Figura 28a del SSE de 1972

Segmento	Ángulo (°)	Profundidad (km)	Deslizamiento (mm/año)	Longitud de secciones en la falla (km)
1	6	4	0	57
2	10	10	392	28
3	26	15	272	35
4	2	30	272	100
5	1	51	0	1000

Tabla XI
Parámetros utilizados para el modelo de la Figura 28b del SSE de 1972

Segmento	Ángulo (°)	Profundidad (km)	Deslizamiento (mm/año)	Longitud de secciones en la falla (km)
1	6	4	0	57
2	10	10	0	28
3	26	15	742	35
4	2	30	222	100
5	1	51	0	1000

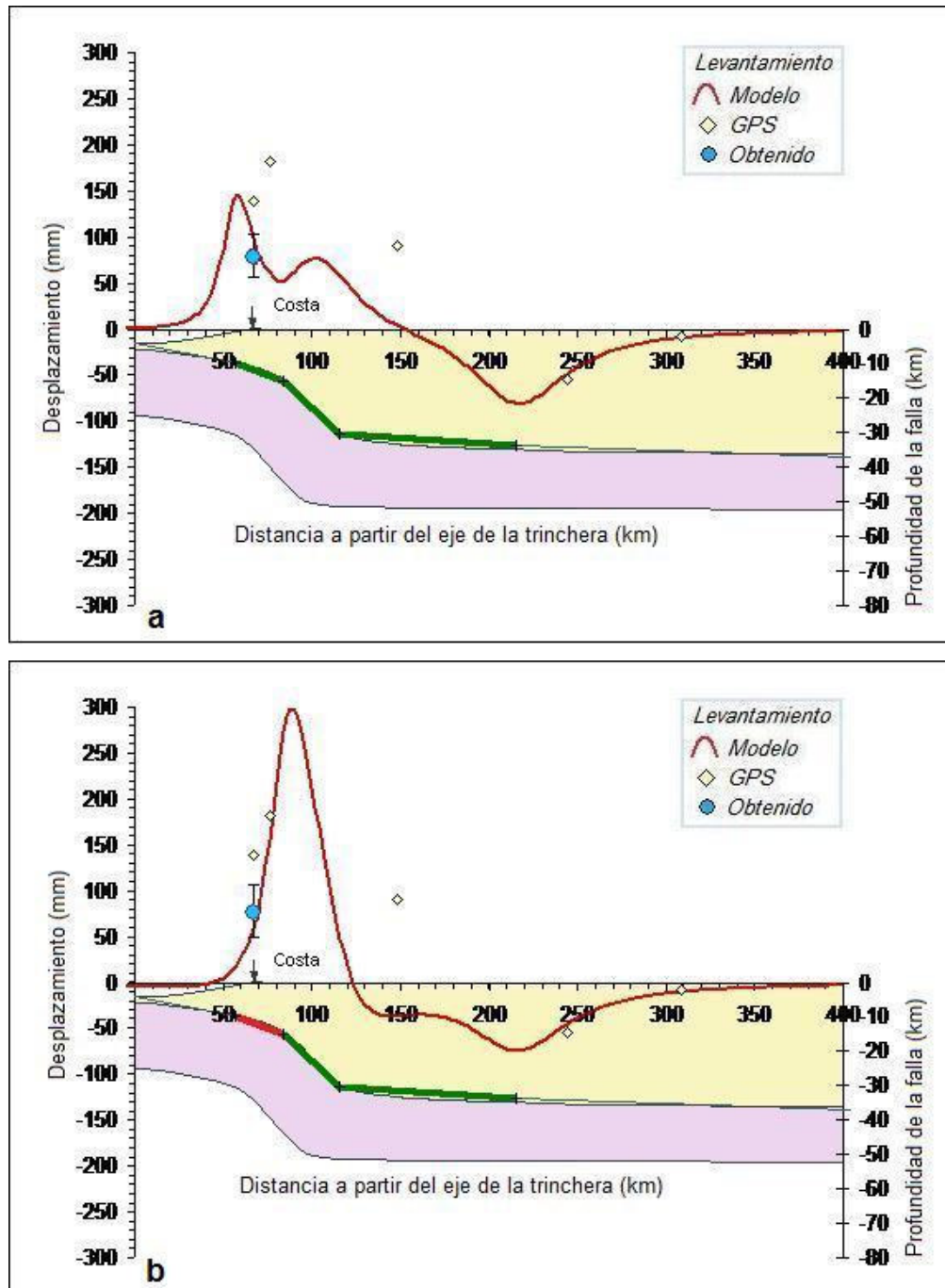


Figura 28. Modelos de dislocación durante el terremoto silencioso en 1972. (a) El desplazamiento asísmico ocurre sobre la interfase de 163km (los tres segmentos en verde). (b) Lo mismo que en (a) solo que el desplazamiento asísmico ocurre en dos segmentos (3^{er} y 4^o en verde) acoplados sobre la interfase de 135km dejando la zona sísmogénica acoplada (primer segmento en rojo que comienza a 57km de la trinchera).

En la parte (b) de la Figura 28, existe deslizamiento solamente en los segmentos 3º y 4º, los cuales equivalen a una distancia 135km (a partir de 57km a 220km desde la trinchera) dejando la zona sismogénica acoplada, la cual esta libre de deslizamiento correspondiente al primer segmento de la zona de acoplamiento y con una distancia de 28km.

Para el evento de 1979 se hizo un solo modelo de dislocación, ya que cerca de Manzanillo no existe red de GPS y por lo tanto no se puede comparar. Sin embargo, como los resultados obtenidos muestran que la costa baja (es decir, sufre un desplazamiento vertical hacia abajo), y lo cual implica que el nivel del mar aumente, pero no de forma rápida, produciendo así una subsidencia lenta enfrente de la costa. La tabla XII muestra los parámetros utilizados para el modelo de deformación de la Figura 29, en la que se muestra la zona de acoplamiento, la cual se extiende sobre una distancia de 20 a 131km desde la trinchera, donde en el 3^{er} segmento de 15km el deslizamiento interno es de 300mm/año y en el 4º segmento de 58km el deslizamiento interno es de 15mm/año. La zona sismogénica se queda parcialmente acoplada (primer segmento en rojo del acoplamiento con una distancia de 38km) y junto con el resto de la interfase libre de deslizamiento.

Tabla XII
Parámetros utilizados para el modelo de la Figura 29 de la subsidencia de 1979

Segmento	Ángulo (º)	Profundidad (km)	Deslizamiento (mm/año)	Longitud de secciones en la falla (km)
1	8	4	0	20
2	9	7	0	38
3	15	13	300	15
4	18	15	15	58
5	40	676	0	1000

El modelo de dislocación para la zona sismogénica de Manzanillo, se obtuvo de la geometría de la interfase basada en los modelos gravimétricos de la zona de subducción del bloque de Jalisco, [*Bandy et al. 1999*].

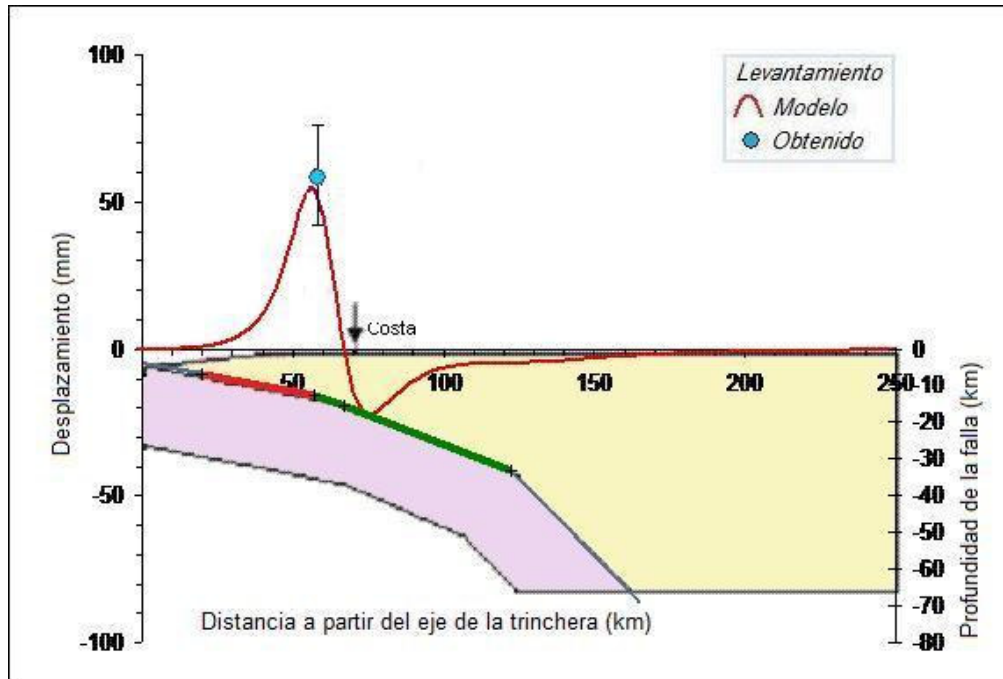


Figura 29. Modelo de dislocación durante la subsidencia lenta de 1979 en Manzanillo. El deslizamiento asísmico más grande ocurre sobre la interfase de 15km (3^{er} segmento en verde) dejando la zona sísmogénica acoplada (2^o segmento en rojo que comienza a 20km de la trinchera y termina cerca de la costa a 58km de la trinchera).

3.1.3 DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos para el doble terremoto ocurrido en 1962 (ver Figura 27) estos son comparables con lo obtenido por *Ortiz et al.* [2000] (donde obtiene un desplazamiento de 22cm enfrente de la costa de Acapulco), mientras que nosotros obtuvimos un desplazamiento de 22 ± 2 cm.

Los resultados obtenidos para los eventos SSE de 1957 y 1972 pueden ser comparables con los registros GPS de los eventos SSE obtenidos en 1998 [*Lowry et al.* 2001], 2001-2002 [*Kostoglodov et al.* 2003] y 2006 [*Larson et al.* 2007], ya que el patrón de deformación en los asismos se asume que es similar en cada evento.

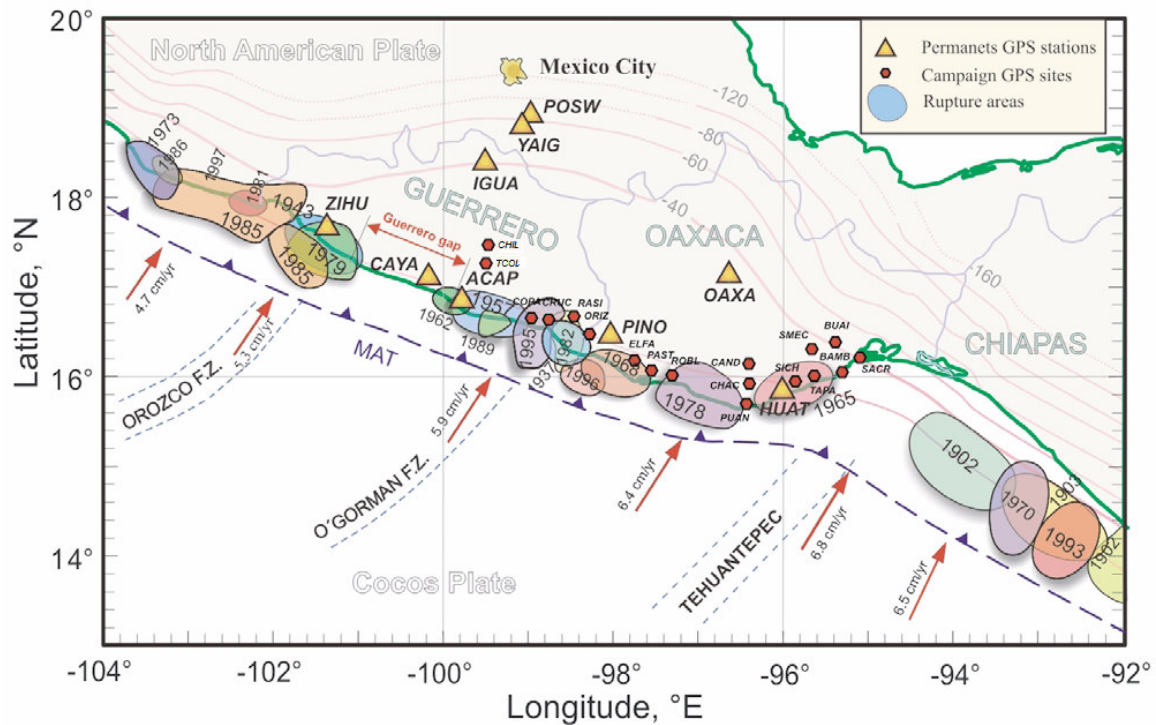


Figura 30. Gap sísmico de Guerrero el cual se extiende desde -99.2°E hasta -101.2°E . Las áreas sombreadas anotadas con los años de los eventos observados son las distribuciones de los epicentros de las replicas de los temblores grandes más recientes. Los triángulos indican las estaciones permanentes de GPS y los círculos en pequeños indican sitios de campaña de GPS. Las flechas en rojo indican la dirección de desplazamiento de la Placa de Cocos y Placa Rivera. Imagen obtenida de *Franco et al.*, [2005].

Por lo tanto, a partir de los resultados obtenidos podemos entonces construir un balance de desplazamientos tectónicos junto con los datos de GPS que nos permite tener una cronología de los eventos dentro del gap sísmico de Guerrero (ver Figura 30), ya que es muy importante para obtener el periodo de recurrencia de grandes terremotos en esta región, debido a que el periodo de recurrencia de un terremoto superior a los M_w 7.5 en la costa mexicana es aproximadamente de 40-60 años [Singh, S.K. et al. 1981], pero en la brecha sísmica de Guerrero no ha ocurrido ningún evento de esta magnitud durante los últimos casi 100 años.

Para construir este balance de deformación vertical se observó que en los registros mareográficos de Acapulco muestran un aumento promedio en el nivel del mar de aproximadamente 0.5cm/año (ver Figura 31), mientras que se sabe que el nivel del mar Eustático ha aumentado aproximadamente de 0.15-0.25cm/año en los últimos 100 años, lo cual implica que debe existir una subsidencia tectónica en la costa de Guerrero de 0.2-0.4cm/año. El último terremoto importante fue de $M_w \sim 7.5$, el cual ocurrió en Costa Grande en 1911 pudiendo alcanzar una deformación vertical elástica de 20-40cm suficiente para poder generar un terremoto de $M_w > 7$.

Sin embargo, esta subsidencia no corresponde a la observada a partir de los registros de GPS en Acapulco (ver Figura 31), la cual es de aproximadamente de 0.6cm/año. Este valor depende mucho de la deformación vertical producida por los SSE y se necesitan por lo menos 2.5 ciclos completos de eventos asísmicos lentos para determinar la subsidencia de la costa intersísmica con más precisión. Por el momento no se cuenta todavía con el registro GPS suficientemente largo para obtener esta estimación más confiable [Blewitt, G. et al. 2002].

En la Figura 31 también se muestra la subsidencia GPS para el tiempo del inter-evento en Acapulco, la cual es de aproximadamente de 1.0-1.3cm/año. Tomando como referencia este valor del desplazamiento, en el que se le

suman los efectos de los SSE y la deformación secular sismogénica (producida solamente por el segmento sismogénico acoplado), vemos en la siguiente Figura 32 un esquema del balance de desplazamientos en Acapulco, en la que se muestran los eventos detectados desde el terremoto de 1962 hasta el evento lento registrando en el 2006. También en dicho balance se señala la pendiente de subsidencia tectónica ($\sim 0.4\text{cm/año}$ valor mareográfico), y con la cual se muestra que falta aproximadamente 12cm de desplazamiento en la subsidencia tectónica de Acapulco, debido a que no se cuenta con un registro mareográfico completo y por eso no hemos podido determinar algunos SSE en el periodo de 1980-1992.

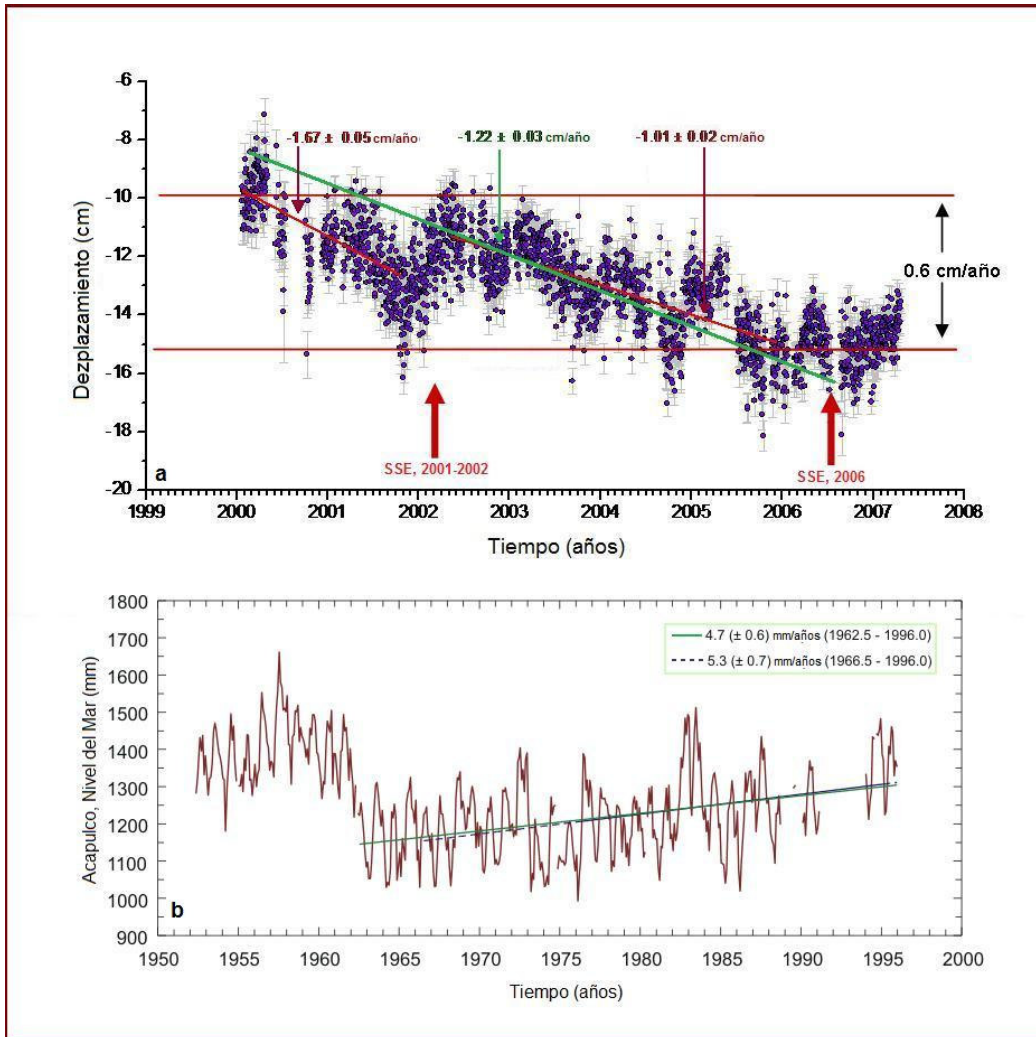


Figura 31. (a) Subsistencia tectónica de $\sim 0.6\text{cm/año}$ y una subsistencia GPS para el tiempo del inter-evento de $\sim 1.0\text{-}1.3\text{cm/año}$ en Acapulco. Las flechas indican los SSE ocurridos para los tiempos señalados. (b) Aumento promedio del nivel del mar en Acapulco.

El esquema siguiente (Figura 32) nos muestra que aproximadamente 0.9cm/año de deformación vertical se esta recobrando por episodios de SSE, pero también se asume que 0.25cm/año se esta recobrando debido al aumento del nivel del mar eustático. Aunque éste balance puede ser erróneo si la subsidencia secular no es permanente (1.3cm/año). Vea la Figura 20. Ya que el ajuste de las tendencias mareográfica y de GPS muestra que por lo menos 12cm de subsidencia de la costa en Acapulco debió ocurrir en el periodo de 1983-1995 por los eventos asísmicos lentos que se desconocen debido a que no se habían tenido datos mareográficos y todavía no empezaban las mediciones de GPS para detectar los SSE. Esto implica que en este periodo los SSE estaban recuperando la subsidencia con el promedio de 1cm/año aproximadamente, lo que es congruente con el valor 0.9cm/año determinado con las tendencias de GPS y mareográfica.

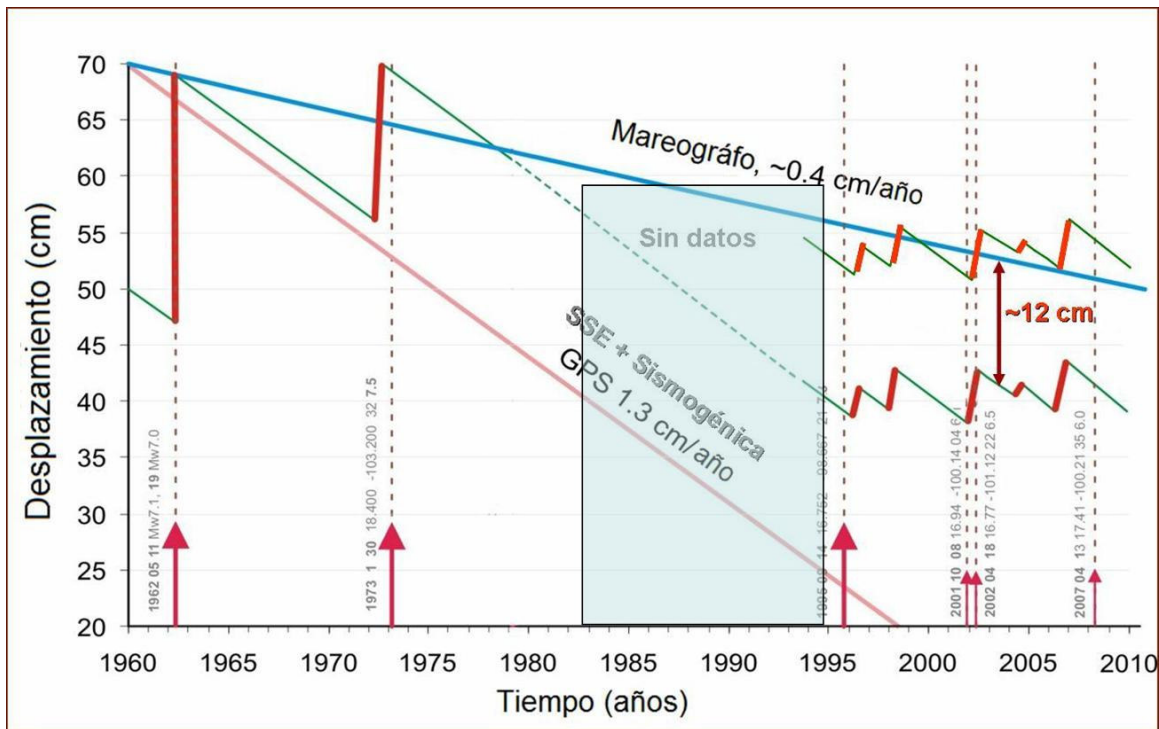


Figura 32. Esquema del balance tectónico de desplazamientos en Acapulco. El rectángulo señala el periodo en el cual no se cuenta con los registros mareográficos. Las flechas indican los terremotos que han ocurrido en las fechas cercanas a los SSE. Para seguir la tendencia de cambio del nivel del mar en Acapulco (0.4 cm/año) es necesario hacer el ajuste de los últimos datos de GPS con el pendiente mareográfico lo que resulta en 12 cm de ascenso, lo cual

debería de ocurrir por los SSE en el periodo de 1983-1992 cuando no existía el registro mareográfico en Manzanillo (no es posible hacer la diferencia MZAC para detectar los SSE) y aun no empezaban las mediciones de GPS.

El evento de 1979 en Manzanillo es una subsidencia lenta que duró poco más de tres meses, en la cual de acuerdo a los registros diarios del mareógrafo en el época del evento no hubo ningún cambio instantáneo de sitio (ver Figura 11, capítulo I), además en la descripción de la estación mareográfica (logfile presentado en el Anexo B) confirma que no se realizado ningún cambio en la estación o que exista algún terremoto que provocara un desplazamiento instantáneo.

Este desplazamiento ocurrido en 1979, probablemente puede ser atribuido al terremoto de Petatlan en 1979 ($M_w=7.9$), ya que el SSE provocado por este terremoto pudo haberse propagado hacia Manzanillo. Además, la forma de la deformación, es comparable con los reportes actuales de GPS obtenidos en la costa de Manzanillo. Ya que la subsidencia de la costa en Manzanillo durante el SSE de 1979 es parecida a la subsidencia ocurrida durante el terremoto de Tecoman $M_w=7.1$, 22 de enero de 2003 [*Schmitt et al. 2005*] (Figura 33); nuestro modelo del SSE 1979 (Figura 29) puede explicar la subsidencia de la costa.

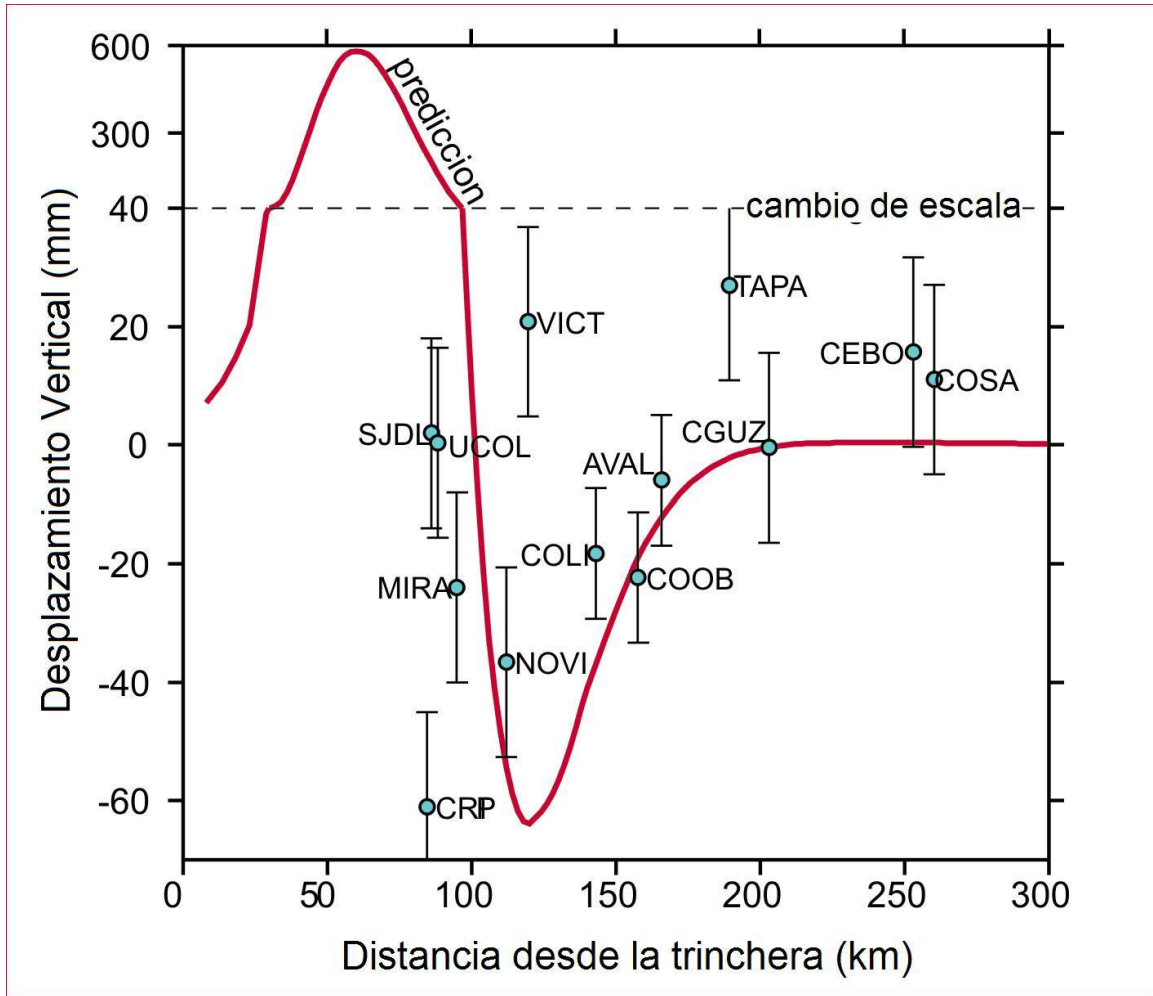


Figura 33. Datos de GPS (puntos en azul con sus barras de error) verticales cerca de la costa de Manzanillo obtenidos de *Schmitt et al., 2005*. La curva roja representa el modelo de la deformación vertical cosísmica del terremoto de Tecoman, $M_w=7.1$, 22 de enero de 2003.

CONCLUSIONES

Después del análisis obtenido, podemos concluir que no es posible filtrar completamente la señal mareográfica para obtener solamente la señal tectónica, debido a que existen fenómenos que afectan la señal, ya sea la postglaciación, las mareas bajas y altas, el efecto del Niño, etc. Sin embargo, fue posible determinar eventos lentos de gran magnitud, ya que el análisis de los registros mareográficos revelaron que:

- Existen problemas en general en el procesamiento de los datos, ya que no se cuentan, por ejemplo, con registros de presión atmosférica, descargas de ríos, precipitaciones pluviales, etc., las cuales son variables que afectan el nivel del mar y por subsecuente al no ser eliminadas, las mediciones de los desplazamientos de los eventos asísmicos se ven afectadas, y esto se puede observar principalmente en el error que se obtiene, ya que este es grande en relación al valor obtenido.
- Un problema en particular difícil al procesar los registros mareográficos fue el filtrar el efecto de El Niño, ya que este fenómeno no es armónico, ni lineal; además de que no se cuenta con registros de cómo afecta El Niño al nivel del mar en la costa del Pacífico mexicano.
- Existen algunos eventos asísmicos lentos (SSE) en 1957 y en 1972 en Acapulco y en 1979 en la región de Manzanillo. Los levantamientos estimados en Acapulco resultaron de $6\pm 2\text{cm}$ en 1957 y de $7\pm 2\text{cm}$ en 1972 y se obtuvo una subsidencia de $6\pm 2\text{cm}$ en 1979 en Manzanillo.

- El evento asísmico lento de 1972, el cual ha producido un levantamiento de $7\pm 2\text{cm}$ es el más grande evento lento observado hasta ahora.
- El modelo de dislocación para el doble terremoto de 1962, para el cual se obtuvo un desplazamiento de $22\pm 2\text{cm}$, es comparable al obtenido por modelo de tsunami en *Ortiz et al., 2000*.
- Los modelos de dislocación presentados, muestran los desplazamientos lentos sobre la placa de subducción que pueden alcanzar aproximadamente 30cm de subsidencia.
- La subsidencia lenta de 1979 en Manzanillo ha sido provocada por el deslizamiento sobre la parte de transición de aproximadamente de 15km del lado profundo de la zona sismogénica y que probablemente abarco una parte de la zona sismogénica de la interfase de placas enfrente de la costa. La forma del perfil de subsidencia en SSE de 1979 es similar al terremoto de Tecoman de 2002 determinada con los datos GPS registrados actualmente en esta zona.
- Aparentemente el SSE de 1972 se propago sobre un área similar al SSE de 2001-2002 en Guerrero y Oaxaca [*Franco et al., 2005*].

Quizás, una forma de resolver los problemas de filtración en los registros mareográficos, podría ser teniendo un registro de más variables que afecten el nivel del mar, como por ejemplo, la presión atmosférica, la descarga de los ríos, las precipitaciones pluviales, la velocidad de los vientos, registros de temperatura frente a la costa, etc. Sin embargo, esto se deja como opción para futuras mediciones tectónicas a partir de registros mareográficos. Los mismos registros mareográficos deben de ser continuos por el periodo de decenas de años para poder detectar la secuencia de los eventos tectónicos lentos. Es importante tener los registros continuos de GPS ligados a las

estaciones mareográficas en la costa del Pacífico de México en donde los procesos tectónicos pueden ser dominantes en los registros del nivel del mar.

ANEXOS

ANEXO A

En este anexo se muestra la tabla y la gráfica de los datos del ENSO utilizada para el análisis de este trabajo. Los datos utilizados fueron obtenidos de la página de Internet del NOAA la cual es: www.nws.noaa.gov, de la región 3.4 de El Niño (5°N-5°S, 120°-170°W), para el periodo de años 1950-2000, utilizando una incertidumbre de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Las siglas mostradas en la Tabla XIII se refieren a los meses del año (siglas en español); y aparecen en trimestres porque se ha tomado la media para cada 3 meses de periodo.

Tabla XIII

Datos del ENSO de la región 3.4 de El Niño (5°N-5°S, 120°-170°W)

Año	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
1950	-1.8	-1.5	-1.4	-1.4	-1.4	-1.2	-0.9	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-1.0
1951	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6
1952	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	-0.2	-0.3	-0.3	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1
1953	0.1	0.3	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
1954	0.3	0.2	-0.1	-0.5	-0.7	-0.7	-0.8	-1.0	-1.1	-1.1	-1.0	-1.0
1955	-1.0	-0.9	-0.9	-1.0	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.5	-1.8	-2.1	-1.7
1956	-1.2	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-0.9	-0.9	-0.8
1957	-0.5	-0.1	0.2	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	0.8	0.9	1.2	1.5
1958	1.6	1.5	1.1	0.7	0.5	0.5	0.4	0.1	0.0	0.0	0.1	0.3
1959	0.4	0.4	0.3	0.2	0.0	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3
1960	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.2
1961	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	0.1	0.1	0.0	-0.3	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5
1962	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3	-0.4	-0.6	-0.7	-0.7
1963	-0.6	-0.3	0.0	0.1	0.1	0.3	0.6	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0
1964	0.8	0.4	-0.1	-0.5	-0.7	-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	-1.1	-1.1	-1.0
1965	-0.8	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.6	1.0	1.2	1.4	1.5	1.6	1.5
1966	1.2	1.1	0.8	0.5	0.2	0.1	0.1	0.0	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4
1967	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.3	0.0	0.0	-0.2	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6
1968	-0.7	-0.9	-0.8	-0.8	-0.4	0.0	0.3	0.3	0.2	0.4	0.6	0.9
1969	1.0	1.0	0.9	0.7	0.6	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	0.7	0.6
1970	0.5	0.3	0.2	0.1	-0.1	-0.4	-0.6	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-1.2
1971	-1.4	-1.4	-1.2	-1.0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-0.9	-1.0	-0.9
1972	-0.7	-0.3	0.0	0.3	0.5	0.8	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	2.1
1973	1.8	1.2	0.5	-0.1	-0.5	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	-1.7	-1.9	-2.0
1974	-1.8	-1.6	-1.2	-1.1	-0.9	-0.7	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-0.7
1975	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-1.0	-1.1	-1.3	-1.4	-1.6	-1.6	-1.7	-1.8

ANEXO A

1976	-1.6	-1.2	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.8
1977	0.6	0.5	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.8
1978	0.7	0.4	0.0	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1
1979	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5
1980	0.5	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.1	0.0	0.0	-0.1
1981	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1
1982	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.5	1.9	2.2	2.3
1983	2.3	2.0	1.6	1.2	1.0	0.6	0.2	-0.2	-0.5	-0.8	-0.9	-0.8
1984	-0.5	-0.3	-0.2	-0.4	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.3	-0.6	-1.0	-1.1
1985	-1.0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3
1986	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.2	0.5	0.7	0.9	1.1	1.2
1987	1.3	1.2	1.1	1.0	1.0	1.2	1.5	1.6	1.6	1.5	1.3	1.1
1988	0.8	0.5	0.1	-0.3	-0.8	-1.2	-1.2	-1.1	-1.3	-1.6	-1.9	-1.9
1989	-1.7	-1.5	-1.1	-0.9	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.4
1991	0.5	0.4	0.4	0.4	0.6	0.8	0.9	0.9	0.8	1.0	1.4	1.7
1992	1.8	1.7	1.6	1.4	1.1	0.8	0.4	0.2	-0.1	-0.1	0.0	0.1
1993	0.3	0.4	0.6	0.8	0.8	0.7	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2
1994	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.9	1.2	1.3
1995	1.2	0.9	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0	-0.3	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8
1996	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.4
1997	-0.4	-0.3	0.0	0.4	0.9	1.4	1.7	2.0	2.3	2.4	2.5	2.5
1998	2.4	2.0	1.4	1.1	0.4	-0.1	-0.8	-1.0	-1.1	-1.1	-1.3	-1.5
1999	-1.6	-1.2	-0.9	-0.7	-0.8	-0.8	-0.9	-0.9	-1.0	-1.2	-1.4	-1.6
2000	-1.6											

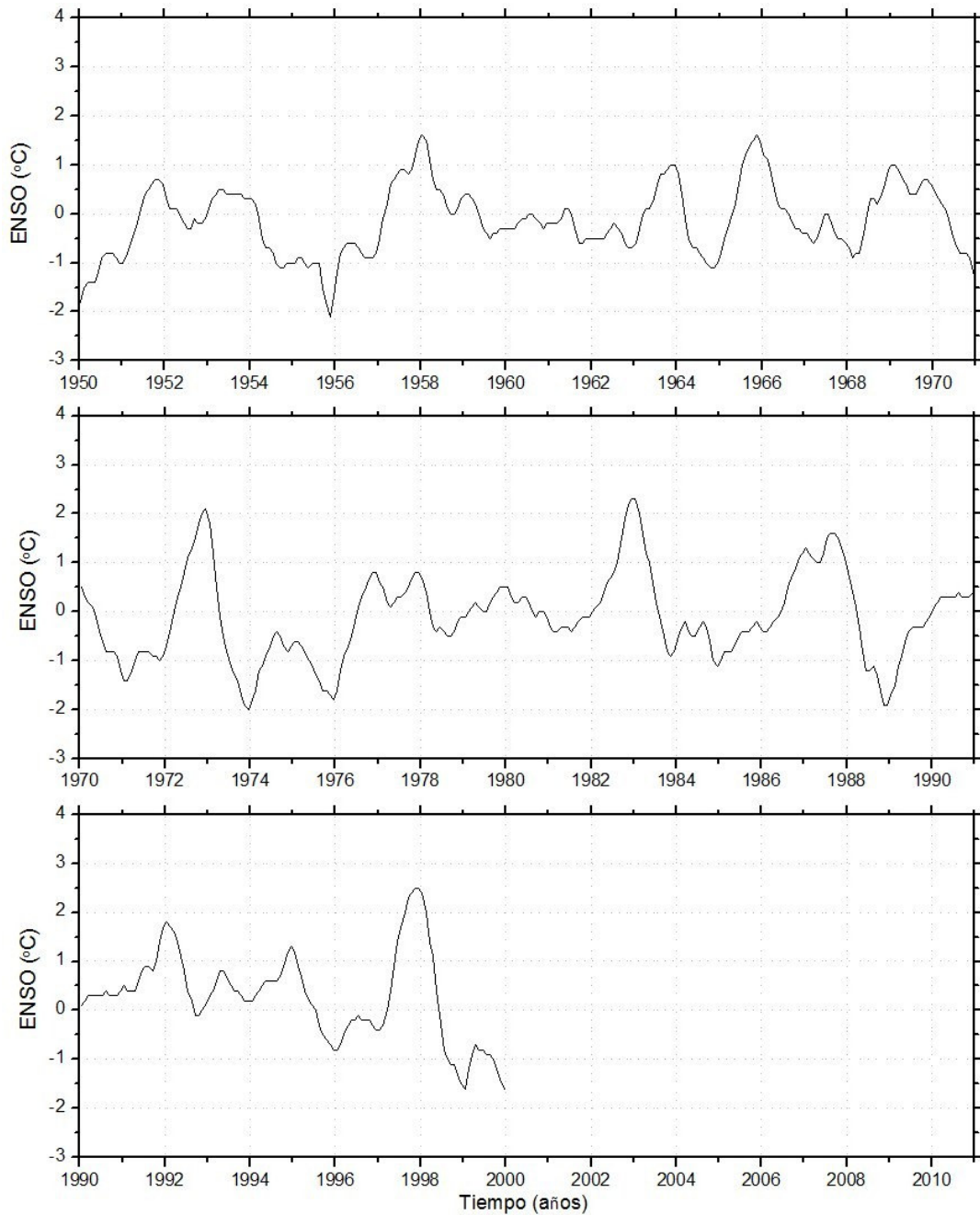


Figura 34. Gráfica de los datos del ENSO para la región 3.4 de El Niño (5°N - 5°S , 120° - 170°W), para el periodo de 1950-2000.

ANEXO B

En el anexo siguiente se muestran los "logfiles" de las estaciones mareográficas de Acapulco, Manzanillo, Salina Cruz, Puerto Ángel y Mazatlán. En estos "logfiles" se muestra la descripción de cada estación, la cual, en este caso se muestra en inglés, tal y como se encuentra en la página de Internet, esto debido a que no quiero omitir ningún detalle debido a una mala traducción.

El logfile para la estación de Acapulco es el siguiente:

```

QUALITY ASSESSMENT OF SEA LEVEL DATA
      by the
UH SEA LEVEL CENTER/NATIONAL OCEANOGRAPHIC DATA CENTER
      JOINT ARCHIVE FOR SEA LEVEL
      updated: 14 Jul 2006
Station : Acapulco-A,Gro.      Latitude: 16 50.4N
Country  : Mexico              Longitude: 099 54.7W
JASL #   : 316A                Time Meridian: 090W (GMT - 6 hr)
GLOSS #  : 267                 TOGA #: P093      NODC #: 71096901
Contributor : Servicio Mareografico Nacional
              Instituto de Geofisica
              Universidad Nacional Autonoma de Mexico
              04510 Mexico, D. F.
              MEXICO
Originator  : same
Original Data: analog
Instrmnt Type: standard gauge with float and stilling well
Digitzd Intvl: hourly to tenths of feet
Present Data : Hourly, daily, and monthly values obtained by:
                Hourly : spot sample on the hour from the analog roll
                Daily  : 119-point convolution filter (Bloomfield, 1976)
                        centered on noon applied to the hourly data
                        with respective periods of the 95, 50, and 5%
                        amplitude points at 124.0, 60.2, and 40.2 hours
                Monthly: Simple average of all daily values; calculated if
                        7 or fewer days are missing
Span of data : 01 May 1952 - 31 Dec 1995
Gaps > 1 mon : 01 Oct - 01 Nov 1988; 29 Nov 1988 - 03 Jan 1989;
                02 Feb - 30 Jun 1989; 01 Sep - 01 Oct 1989;
                01 Nov - 01 Dec 1989; 01 Jan - 01 Feb 1990;
                28 Feb 1991 - 01 Jan 1994
Time Refernce: GMT (hours 00-23)   Space-filler Flag  :-9999
Units        : millimeters          Missing Data Flag   : 9999
Existing     : Yes                  Operational         : Yes
Sat. Trans.  : No                  Distribution        : 1952-
1995
Refernce Levl: The data are referred to tide staff zero which is
                linked to fixed bench marks. The original hourly
                series was adjusted as follows:
                value added to
                date (yyyy/mm/dd/hh)      original (mm)
                -----
                1962/05/11/12-1962/05/19/15      150
                1962/05/19/16-1995/12/31/23      220

```

ANEXO B

Acapulco-	Earthquakes occurred on May 11 and May 19, 1962, causing permanent uplift of the tectonic plate of 15 and 7 cm, respectively. See: Ortiz, M., S.K. Singh, V. Kostoglodov, and J.Pacheco, 2000. Sources Areas of the		
	San Marcos, Mexico Earthquakes of 1962 (M 7.1; 7.0) and 1957 (M 7.7), as Constrained by Tsunami and Uplift Records. Geofisica International (2000). Vol. 39, Num. 4, pp. 337-348		
Comment	: The low values of 28 - 30 Apr 1990 are not evident as a shift in the hourly residuals. Timing errors are evident from 1987-1991, but 1994 is good. There is some suspicion that the reference level for 1994-1995 may not be the same as prior to the gap from 1991-1993. The originators are investigating this issue. Use with caution. Notable episodic events: 04-06 Nov 1952: Tsunami from Kamchatka 09-10 Mar 1957: Tsunami from C. Aleutians 23-25 May 1960: Tsunami from S.C. Chile 28-31 Mar 1964: Tsunami from Alaska		
	CI MISSING YEAR (%) DATA	REPLACED GAPS OR BAD DATA	QUESTIONABLE FLUCTUATIONS
---	1952 67 none	none	none
	1953 100 none	none	none
	1954 98 356-365	none	none
	1955 99 1	none	20-22
	1956 100 none	none	none
	1957 100 none	none	69-70, 209
	1958 100 none	none	none
	1959 100 none	none	1
	1960 98 145, 366	none	none
	1961 99 1,64-65, 142-143, 158-159	(06)294-(05)295	none
	1962 99 166-169, 256-257	(06)137-(05)138 (07)344-(05)345	none
	1963 100 none	(21)286-(05)287	none
	1964 100 none	none	none
	1965 100 none	none	none
	1966 100 none	none	none
	1967 100 none	none	none
	1968 100 none	(15)353-(22)353	none
	1969 100 none	(16)017-(00)018	none
	1970 100 none	(01)320-(08)320	none
	1971 100 none	(04)361-(11)361	none
	1972 100 none	(00)058-(08)058	none
	1973 100 none	(16)124-(23)124 (16)324-(05)325	none
	1974 94 227-231, 278-296	(15)167-(02)168 (15)196-(22)196 (12)228-(08)229 (07)321-(14)321 (13)336-(21)336	none
	1975 100 none	(12)136-(20)136 (05)136-(20)136 (00)169-(09)169 (09)203-(16)203	none
	1976 99 306-311	none	none
	1977 100 none	(13)206-(21)206 (09)207-(18)207	none
	1978 100 none	(00)157-(21)157 (07)158-(23)158	none

ANEXO B

			(20) 159-(04) 160	
			(00) 263-(10) 263	
			(12) 263-(10) 264	
			(12) 264-(10) 265	
			(05) 292-(23) 292	
			(03) 306-(23) 306	
			(01) 307-(10) 307	
	1979	100 none	(04) 027-(15) 027	363-365
			(02) 028-(14) 028	
			(02) 224-(00) 225	
			(02) 225-(23) 225	
			(07) 239-(23) 239	
			(04) 280-(23) 280	
	1980	95 122-140	none	none
	1981	100 none	none	none
	1982	100 none	none	none
	1983	100 none	none	none
	1984	100 none	none	264-266
	1985	99 85-92	(20) 036-(05) 037	206
			(10) 074-(06) 075	
			(21) 146-(19) 147	
			(16) 148-(09) 149	
			(06) 288-(02) 289	
			(06) 292-(05) 293	
	1986	100 none	none	none
	1987	100 none	(19) 109-(15) 110	132, 160-164, 195-
196,				
328			(15) 125-(13) 126	198, 219-220, 327-
244, 250,	1988	82 275-306, 333-366	(06) 036-(05) 037	221-222, 243-
			(16) 075-(03) 076	306-317, 321-333
			(20) 084-(04) 085	
			(09) 114-(05) 115	
	1989	42 1-3, 33-181, 236-237, 245-274, 305-335	none	3-32, 214-216, 291, 293, 295, 335-365
	1990	92 1-32	(04) 213-(21) 213	32-60, 89, 111, 123,
267,			(01) 225-(13) 225	154, 162-163, 265-
308, 335-				275-277, 307-
				339, 364-365
	1991	16 59-365	none	1-7, 28-29
	1992	0 1-366	none	none
	1993	0 1-365	none	none
	1994	94 1, 49-55, 68-70, 137- 140, 214-223, 286-289	(23) 055-(14) 056	none
			(10) 198-(07) 199	
			(02) 213-(13) 213	
			(17) 213-(00) 214	
	1995	97 208-214, 224-225, 309-312	(22) 263-(08) 264	363-365
			(06) 275-(20) 275	
			(06) 305-(22) 305	

El logfile para la estación mareográfica de Manzanillo es:

```

QUALITY ASSESSMENT OF SEA LEVEL DATA
      by the
UH SEA LEVEL CENTER/NATIONAL OCEANOGRAPHIC DATA CENTER
      JOINT ARCHIVE FOR SEA LEVEL

Station : Manzanillo-A           Latitude: 19 03.2N
Country  : Mexico                Longitude: 104 19.8W
JASL #   : 395A                  Time Meridian: 090W (GMT - 6 hr)
GLOSS #  : 163                   TOGA #: P074           NODC #: 71109401
Contributor : Servicio Mareografico Nacional
            Instituto de Geofisica
            Universidad Nacional Autonoma de Mexico
            04510 Mexico, D. F.
            MEXICO

Originator : same
Original Data: analog
Instrmnt Type: standard gauge with float and stilling well
Digitzd Intvl: hourly to tenths of feet
Present Data : Hourly, daily, and monthly values obtained by:
    Hourly : spot sample on the hour from the analog roll
    Daily  : 119-point convolution filter (Bloomfield, 1976)
            centered on noon applied to the hourly data
            with respective periods of the 95, 50, and 5%
            amplitude points at 124.0, 60.2, and 40.2 hours
    Monthly: Simple average of all daily values; calculated if
            7 or fewer days are missing
Span of data : 01 May 1953 - 23 Dec 1982
Gaps > 1 mon : 01 Oct 1959 - 01 Jan 1961;01 Jan 1979 - 02 Feb
1979
Time Refernce: GMT (hours 00-23)   Space-filler Flag   :-9999
Units          : millimeters        Missing Data Flag    : 9999
Existing       : Yes                Operational         : Yes
Sat. Trans.    : No                Distribution        : 1953-
1982
Refernce Levl: The data are referred to tide staff zero which is
              linked to fixed bench marks.
Comment       : The daily and monthly values do not reveal any
              obvious reference level shifts or trends and
agree
              well with Acapulco except for a possible shift
              of about -8 cm between 08 June - 06 July 1955 and
              also between 29 Oct - 19 Nov 1955. These
              questionable level shifts do not appear to affect
              the long term reference level stability. The
              timing is good for most of the series.
              Notable episodic events:
              09-10 Mar 1957: Tsunami from C. Aleutians
              28 Mar 1964: Tsunami from Alaska

              CI MISSING          REPLACED GAPS          QUESTIONABLE
              YEAR (%) DATA      OR BAD DATA          FLUCTUATIONS
              -----
--
158,180-
324
1953  67 238-240                (01)144-(08)144 121-131,153-
                                (00)254-(07)254 184,239-244,321-
                                (15)258-(04)259
1954 100 none                  (21)261-(14)262 271-272
1955 100 none                  (03)107-(11)107 167-
169,254,261,272,
                                (06)200-(17)200 323
                                (01)351-(22)351
1956 100 none                  (06)134-(18)134 318-331,355-360
1957 100 none                  none              69-70,73-

```


ANEXO B

74,190,266,		
1958	99 364-365	(09)068-(19)068 305-310 (04)104-(11)104 5-6,17-21 (07)187-(15)187 (02)196-(23)196
1959	75 1,274-364	none 18-21,203
1960	0 1-366	none
1961	99 1	(15)032-(23)032 none
1962	100 none	(00)299-(09)299 248-250 (00)301-(09)301 (10)339-(21)339
1963	100 none	(08)173-(21)173 none (02)287-(11)287
1964	100 none	(20)007-(04)008 none (20)248-(18)249 (02)309-(20)309 (22)325-(11)326
1965	100 none	(12)265-(11)266 none (18)319-(05)320
1966	100 none	none
1967	100 none	(13)001-(01)002 none
1968	100 none	(11)084-(03)085 98-100 (07)221-(15)221
1969	100 none	(00)011-(22)011 311-312 (00)013-(16)013 (01)049-(15)049 (15)113-(10)114 (18)115-(16)116 (00)165-(22)165 (02)168-(22)168 (00)179-(20)179 (00)198-(09)198 (00)240-(10)240 (01)244-(21)244 (13)252-(23)252 (12)256-(22)256 (07)277-(17)277 (06)284-(23)284 (04)294-(23)294 (14)298-(23)298 (03)304-(16)304 (01)305-(15)305 (14)341-(22)341 (15)356-(23)356 (00)359-(09)359
1970	100 none	(13)062-(05)063 none (17)080-(02)081 (08)081-(16)081 (11)091-(23)091 (05)108-(13)108 (01)137-(18)137 (00)138-(09)138 (03)145-(16)145 (23)148-(08)149 (01)171-(13)171 (07)180-(17)180 (12)201-(20)201 (02)211-(09)211 (07)243-(23)243 (04)248-(11)248
1971	100 none	(07)062-(06)063 none (04)114-(14)114 (01)243-(23)243
1972	100 none	(07)001-(23)001 none (17)159-(06)160 (06)186-(20)186 (00)204-(11)204

ANEXO B

		(09) 274-(20) 274	
		(14) 296-(07) 297	
1973	100 none	(06) 145-(17) 145	252
		(01) 146-(08) 146	
1974	100 none	(10) 244-(18) 244	none
1975	100 none	(00) 154-(07) 154	none
		(07) 177-(17) 177	
		(16) 191-(23) 191	
		(03) 254-(20) 254	
		(14) 274-(23) 274	
1976	100 none	(00) 008-(07) 008	none
		(16) 114-(03) 115	
		(15) 121-(22) 121	
		(00) 162-(16) 162	
		(09) 224-(20) 224	
		(12) 284-(23) 284	
		(09) 291-(18) 291	
1977	100 none	(06) 096-(13) 096	184
		(04) 263-(15) 263	
		(03) 281-(10) 281	
		(15) 305-(23) 305	
		(14) 362-(23) 362	
1978	100 none	(02) 085-(21) 085	258-261
		(00) 218-(11) 218	
1979	91 1-33	(07) 038-(06) 039	none
		(01) 054-(21) 054	
		(12) 205-(10) 206	
		(12) 206-(23) 206	
		(13) 274-(23) 274	
1980	100 none	(10) 165-(19) 165	none
		(03) 179-(10) 179	
1981	100 none	(00) 016-(11) 016	none
		(12) 088-(23) 088	
		(08) 252-(17) 252	
		(18) 305-(14) 306	
1982	100 none	none	none

Para la estación mareográfica de Salina Cruz el logfile es:

QUALITY ASSESSMENT OF SEA LEVEL DATA			
by the			
UH SEA LEVEL CENTER/NATIONAL OCEANOGRAPHIC DATA CENTER			
JOINT ARCHIVE FOR SEA LEVEL			
Station	: Salina Cruz	Latitude:	16 09.6N
Country	: Mexico	Longitude:	095 12.2W
JASL #	: 394A	Time Meridian:	090W (GMT - 6 hr)
GLOSS #	: none	TOGA #:	none
		NODC #:	71096501
Contributor	: Servicio Mareografico Nacional Instituto de Geofisica Universidad Nacional Autonoma de Mexico 04510 Mexico, D. F. MEXICO		
Originator	: same		
Original Data:	: analog		
Instrmnt Type:	: standard gauge with float and stilling well		
Digitzd Intvl:	: hourly to tenths of feet		
Present Data	: Hourly, daily, and monthly values obtained by:		
	Hourly	: spot sample on the hour from the analog roll	
	Daily	: 119-point convolution filter (Bloomfield, 1976) centered on noon applied to the hourly data with respective periods of the 95, 50, and 5% amplitude points at 124.0, 60.2, and 40.2 hours	
	Monthly:	: Simple average of all daily values; calculated if 7 or fewer days are missing	
Span of data	: 01 Apr 1952 - 28 Feb 1991		
Gaps > 1 mon	: 01 May 1969 - 01 Nov 1969; 01 May 1970 - 24 Mar		
1971	07 Apr 1974 - 03 Jun 1974; 01 Jan 1978 - 01 Mar		
1979	01 Nov 1979 - 01 Mar 1983; 01 Jul 1983 - 01 Dec		
1983	27 Jan 1985 - 27 Feb 1985; 07 Jul 1986 - 01 Dec		
1986			
	Time Refernce:	GMT (hours 00-23)	Space-filler Flag : -9999
	Units	: millimeters	Missing Data Flag : 9999
	Existing	: Yes	Operational : Yes
	Sat. Trans.	: No	Distribution : 1952-
1991	Refernce Levl:	: The data are referred to tide staff zero which is linked to fixed bench marks.	
	Comment	: The daily and monthly values do not reveal any obvious reference level shifts or trends, except the levels are anomalously high in Mar-Jun 1983 relative to nearby sites. Due to gaps on either side, no clear jump can be identified. The data contain great energy with periods of days to weeks during the winter months associated with wind effects and the ocean eddies in the Gulf of Tehuantepec. The timing is bad for almost the entire year of 1957 and sporadically during the other periods. Notable episodic events: 23-25 May 1960: Tsunami from S.C. Chile 28 Mar 1964: Tsunami from Alaska	
	CI MISSING	REPLACED GAPS	QUESTIONABLE
	YEAR (%) DATA	OR BAD DATA	FLUCTUATIONS
--	-----	-----	-----
	1952 75 none	none	none
	1953 100 none	(21)121-(05)122	none
	1954 100 none	(22)147-(06)148	315-316
	1955 99 308-309	(13)036-(20)036	50, 60-61, 191, 229

ANEXO B

	(04)061-(11)061	
	(09)166-(23)166	
	(06)182-(18)182	
	(07)258-(18)258	
	(09)270-(20)270	
	(01)335-(20)335	
1956 100 none	(19)106-(15)107	none
	(03)136-(20)136	
	(13)158-(06)159	
	(17)160-(08)161	
	(11)297-(23)297	
1957 100 none	none	1-360
1958 100 none	(12)184-(23)184	139
	(00)193-(11)193	
	(12)195-(23)195	
	(12)196-(23)196	
	(12)197-(23)197	
	(12)228-(06)229	
	(12)241-(23)241	
	(00)256-(11)256	
	(12)265-(23)265	
	(12)347-(23)347	
1959 100 none	(01)160-(11)160	4-5, 9, 13-14, 23-24,
	(15)170-(04)171	34-35, 42-45, 48-49,
	(14)179-(23)179	214-215, 272-273
	(14)190-(23)190	
	(15)203-(02)204	
	(00)247-(07)247	
	(09)248-(05)249	
	(00)281-(11)281	
	(14)230-(22)230	
1960 100 none	(01)153-(10)153	137-138, 144-147
	(12)153-(23)153	
	(12)177-(23)177	
	(00)217-(11)217	
	(12)224-(20)224	
	(09)313-(21)313	
	(00)321-(21)321	
	(15)326-(23)326	
1961 100 none	(12)039-(23)039	204-205, 302
	(12)163-(22)163	
	(12)175-(23)175	
	(00)181-(11)181	
	(12)188-(23)188	
	(12)195-(23)195	
	(13)203-(23)203	
	(00)224-(21)224	
1962 100 none	(13)185-(23)185	none
	(13)189-(23)189	
	(14)190-(23)190	
	(11)191-(23)191	
	(12)198-(23)198	
	(12)208-(07)209	
	(00)214-(11)214	
	(00)280-(11)280	
	(00)303-(22)303	
1963 100 none	(17)110-(12)111	none
	(20)113-(04)114	
	(12)118-(23)118	
	(04)139-(23)139	
	(12)181-(23)181	
	(05)231-(03)232	
	(12)225-(23)225	
	(08)230-(23)230	
1964 100 none	(03)075-(23)075	89-90
	(01)092-(12)092	
	(00)120-(20)120	
	(00)131-(11)131	

ANEXO B

		(08)163-(23)163	
		(10)187-(17)187	
		(00)189-(11)189	
		(00)234-(10)234	
		(05)250-(15)250	
		(09)255-(23)255	
		(00)272-(09)272	
		(07)337-(23)337	
		(00)360-(11)360	
		(00)361-(18)361	
1965	100 none	(09)025-(23)025	none
		(12)036-(20)036	
		(00)037-(12)037	
		(01)097-(21)097	
		(08)167-(06)168	
		(03)192-(22)192	
		(12)207-(23)207	
		(12)211-(20)211	
		(12)212-(23)212	
		(07)235-(23)235	
		(00)255-(11)255	
1966	100 none	(00)228-(11)228	none
		(09)270-(16)270	
		(01)291-(11)291	
		(00)118-(11)118	
		(00)227-(11)227	
1967	100 none	(06)012-(23)012	133-134
		(00)141-(11)141	
		(16)153-(23)153	
		(00)180-(11)180	
		(03)184-(11)184	
		(18)201-(07)202	
		(04)204-(23)204	
		(09)228-(17)228	
		(00)237-(11)237	
1968	100 none	(00)072-(10)072	125-126,140-
141,241		(12)105-(07)106	
		(21)180-(08)181	
		(12)196-(08)197	
		(20)299-(11)300	
		(03)319-(23)319	
		(18)338-(11)339	
		(21)339-(08)340	
1969	50 121-305	(01)003-(10)003	48
		(04)029-(23)029	
		(01)040-(21)040	
		(06)046-(23)046	
		(03)053-(23)053	
		(18)068-(09)069	
		(18)082-(15)083	
		(02)357-(10)357	
1970	33 121-365	(04)050-(11)050	11, 45
		(21)052-(06)053	
		(03)063-(19)063	
1971	78 1-83	(01)121-(11)121	165-169
		(15)195-(02)196	
		(18)233-(03)234	
		(19)235-(07)236	
		(09)251-(16)251	
		(12)221-(23)221	
1972	100 none	(17)159-(00)160	23-25,309-319
		(08)185-(23)185	
		(18)208-(05)209	
		(04)295-(20)295	
		(00)326-(11)326	
		(16)326-(09)327	
1973	100 none	(13)133-(20)133	none

ANEXO B

			(04) 158-(11) 158	
			(00) 179-(11) 179	
			(16) 179-(23) 179	
			(03) 211-(23) 211	
			(16) 243-(23) 243	
	1974	84 97-154	(07) 029-(19) 029	none
			(02) 030-(21) 030	
			(09) 227-(23) 227	
			(04) 292-(11) 292	
			(10) 306-(18) 306	
			(06) 309-(23) 309	
			(13) 312-(23) 312	
			(07) 333-(22) 333	
			(12) 336-(23) 336	
			(00) 342-(11) 342	
			(08) 349-(20) 349	
			(15) 257-(22) 257	
			(00) 287-(10) 287	
			(03) 289-(17) 289	
	1975	100 none	(16) 020-(02) 021	220-235
			(16) 034-(23) 034	
			(22) 067-(11) 068	
			(21) 072-(05) 073	
			(21) 180-(11) 181	
			(14) 185-(23) 185	
			(12) 244-(19) 244	
			(02) 248-(09) 248	
	1976	100 none	(15) 021-(07) 022	347-355
			(18) 076-(06) 077	
			(22) 136-(05) 137	
			(21) 154-(05) 155	
			(14) 211-(23) 211	
			(03) 232-(11) 232	
			(00) 237-(11) 237	
			(15) 252-(23) 252	
			(18) 269-(06) 270	
			(00) 328-(11) 328	
	1977	100 none	(00) 087-(08) 087	42-44, 67-69, 141-
142,			(18) 094-(01) 095	183-184, 275-276
			(01) 121-(18) 121	
			(16) 213-(11) 214	
			(02) 238-(11) 238	
			(14) 240-(23) 240	
			(03) 243-(15) 243	
			(01) 275-(23) 275	
			(07) 277-(20) 277	
			(03) 301-(21) 301	
			(12) 313-(23) 313	
			(01) 193-(09) 193	
			(08) 264-(19) 264	
	1978	0 1-365	none	none
	1979	84 1-60, 305-365	(23) 110-(09) 111	60-66, 117-120, 123-
			(01) 152-(17) 152	125, 133-136, 138,
				155-156
	1980	0 1-366	none	none
	1981	0 1-365	none	none
	1982	0 1-365	none	none
	1983	42 1-60, 182-335	(10) 157-(20) 157	none
			(01) 091-(17) 091	
	1984	100 none	(02) 083-(11) 083	none
			(01) 173-(23) 173	
			(21) 247-(07) 248	
			(12) 297-(23) 297	
			(04) 331-(11) 331	
			(03) 351-(12) 351	
	1985	86 27-58, 150-169	(08) 120-(16) 120	116, 212-213, 222-
224,				

ANEXO B

252, 285-		(01) 137-(08) 137	236-238, 251-
		(14) 147-(21) 147	290
		(01) 177-(10) 177	
		(12) 181-(23) 181	
		(15) 278-(06) 279	
		(21) 339-(04) 340	
1986	60 188-335	(03) 098-(11) 098	135-140, 143-146,
		(03) 125-(11) 125	183-187
		(13) 126-(09) 127	
		(21) 127-(07) 128	
		(16) 130-(08) 131	
		(19) 134-(15) 135	
		(00) 136-(07) 136	
		(19) 136-(07) 137	
		(19) 146-(08) 147	
		(14) 149-(23) 149	
		(06) 164-(14) 164	
		(17) 352-(04) 353	
		(10) 365-(18) 365	
1987	99 89-93	(14) 044-(23) 044	1-2, 60-61, 81-82
		(13) 082-(23) 082	
		(06) 105-(17) 105	
		(16) 107-(23) 107	
		(04) 115-(11) 115	
		(22) 115-(05) 116	
		(15) 118-(23) 118	
		(22) 134-(05) 135	
		(11) 145-(18) 145	
		(02) 167-(10) 167	
		(13) 174-(05) 175	
		(02) 206-(10) 206	
		(12) 208-(23) 208	
		(01) 209-(11) 209	
		(14) 210-(07) 211	
		(12) 213-(20) 213	
		(00) 221-(08) 221	
		(08) 269-(17) 269	
		(21) 325-(05) 326	
		(00) 328-(07) 328	
		(10) 341-(21) 341	
		(12) 352-(05) 353	
		(02) 357-(10) 357	
		(16) 359-(03) 360	
		(21) 364-(06) 365	
1988	47 74-267	(12) 002-(01) 003	36-41, 53-54, 63-64,
		(21) 050-(11) 051	72-73, 331-332
		(00) 052-(07) 052	
		(06) 061-(16) 061	
		(18) 271-(01) 272	
		(12) 312-(23) 312	
		(17) 352-(04) 353	
		(13) 271-(23) 271	
		(08) 304-(23) 304	
1989	100 none	(17) 111-(03) 112	7-8, 154
		(04) 126-(18) 126	
		(22) 140-(09) 141	
		(22) 148-(15) 149	
1990	92 307-335	none	280
1991	16 none	none	none

El logfile de la estación de Puerto Ángel es el siguiente:

```

QUALITY ASSESSMENT OF SEA LEVEL DATA
      by the
UH SEA LEVEL CENTER/NATIONAL OCEANOGRAPHIC DATA CENTER
      JOINT ARCHIVE FOR SEA LEVEL

Station : Puerto Angel           Latitude: 15 39.4N
Country  : Mexico                Longitude: 096 29.6W
JASL #   : 672A                  Time Meridian: 090W (GMT - 6 hr)
GLOSS #  : 164                   TOGA #: none           NODC #: 71095601
Contributor : Servicio Mareografico Nacional
              Instituto de Geofisica
              Universidad Nacional Autonoma de Mexico
              04510 Mexico, D. F.
              MEXICO

Originator : same
Original Data: analog
Instrmnt Type: standard gauge with float and stilling well
Digitzd Intvl: hourly to tenths of feet
Present Data : Hourly, daily, and monthly values obtained by:
  Hourly : spot sample on the hour from the analog roll
  Daily  : 119-point convolution filter (Bloomfield, 1976)
           centered on noon applied to the hourly data
           with respective periods of the 95, 50, and 5%
           amplitude points at 124.0, 60.2, and 40.2 hours
  Monthly: Simple average of all daily values; calculated if
           7 or fewer days are missing
Span of data : 02 Jan 1962 - 31 Oct 1984
Gaps > 1 mon : 01 May 1962 - 23 Oct 1962;01 Jan 1963 - 05 Apr
1964
                29 Feb 1968 - 01 Aug 1968;06 Aug 1972 - 14 Aug
1973
                01 Mar 1974 - 02 Apr 1974;15 Jul 1976 - 26 Aug
1976
                01 Apr 1978 - 01 May 1978;30 Jan 1979 - 02 Dec
1979
                01 Nov 1982 - 08 Mar 1983;29 Mar 1983 - 01 May
1983
                16 May 1983 - 01 Jul 1983;28 Jul 1983 - 15 Sep
1983
Time Refernce: GMT (hours 00-23)   Space-filler Flag  :-9999
Units          : millimeters        Missing Data Flag   : 9999
Existing       : Yes                Operational         : Yes
Sat. Trans.    : No                Distribution        : 1962-
1984
Refernce Lev1: The data are referred to tide staff zero which is
comparisons    linked to fixed bench marks.  However,
                with neighboring sites and examination of the
                hourly residuals has lead to the following
                adjustment:
                period                value added
                ( (hour)day/month/year )  to original(mm)
                -----
                (07)04/10/67-(07)07/10/67      200
                (00)16/05/84-(14)01/08/84      -200
Comment        : The daily and monthly values do not reveal any
                obvious reference level shifts or trends and
                agree fairly well with Manzanillo, Acapulco,
                and Salina Cruz with one exception.  A downward
                trend from May-Nov 1965 is evident in differences
                with these neighboring sites with the mean level
                of Puerto Angel roughly 10 cm higher prior to
                the trend.  Finite level jumps could not be
                identified in the residuals.  The cause of the
                level change and trend is unknown.  The timing

```


ANEXO B

		is poor/fair for most of the record. Only extreme timing errors are noted below.		
YEAR	CI MISSING (%)	DATA	REPLACED GAPS OR BAD DATA	QUESTIONABLE FLUCTUATIONS
1962	52	1,121-296	none	122-365
1963	0	1-365	none	none
1964	74	1-96	(04)171-(16)171	none
1965	100	none	(15)186-(03)187	none
1966	100	none	(12)034-(19)034 (12)054-(22)054	none
1967	100	none	(07)045-(19)045	none 173-175
1968	55	1-8,23-25,28-30, 61-214	(07)033-(03)034 (17)045-(00)046 (21)058-(06)059	none
1969	100	none	(12)074-(23)074	125-127,151-
1970	100	none	(00)063-(15)063 (18)196-(01)197	230-235
1971	100	none	(21)051-(07)052	249,279
1972	60	219-366	(21)215-(05)216	none
1973	38	1-266	none	244-245,285-
1974	91	60-92	(09)136-(22)136 (15)159-(23)159 (19)161-(05)162 (01)167-(08)167	313 28-29,146,179,229- 231
1975	100	none	none	120,136-137
1976	82	1-2,197-239,253-274	(06)001-(05)002 (05)281-(12)281 (10)327-(00)328 (01)281-(16)281 (18)307-(05)308 (18)275-(01)276 (10)276-(17)276	242-245,304,333
1977	58	169-323	(13)333-(08)334 (20)141-(05)142 (05)160-(12)160	18,52,76-77,97, 128-129
1978	91	91-121,168-171	(06)148-(05)149 (06)238-(05)239 (12)303-(19)303	none
1979	16	1,30-336	none	none
1980	100	none	(06)150-(05)151 (06)278-(05)279 (06)288-(05)289	none
1981	100	none	(06)243-(23)243	359-362
1982	83	265-266,305-365	(06)123-(05)124	91-92
1983	29	1-67,69-70,88-121, 136-182,188-193,196- 206,209-258,266-272, 274-305,337-344,356- 359,365	(09)184-(21)184 (21)194-(13)195 (04)261-(22)261 (17)354-(01)355	194,207,305,311,313
1984	66	1,108-137,218-229, 238-246,263-266, 273-289	(06)218-(05)219 (11)230-(00)231 (03)251-(16)251 (19)252-(15)253	22,301-303

Y finalmente el logfile para la estación mareográfica de Mazatlán es:

QUALITY ASSESSMENT OF SEA LEVEL DATA			
by the			
UH SEA LEVEL CENTER/NATIONAL OCEANOGRAPHIC DATA CENTER			
JOINT ARCHIVE FOR SEA LEVEL			
Station	: Mazatlan	Latitude:	23 11.9N
Country	: Mexico	Longitude:	106 25.3W
JASL #	: 673A	Time Meridian:	105W (GMT - 7 hr)
GLOSS #	: none	TOGA #:	none
		NODC #:	72103601
Contributor	: Servicio Mareografico Nacional Instituto de Geofisica Universidad Nacional Autonoma de Mexico 04510 Mexico, D. F. MEXICO		
Originator	: same		
Original Data:	: analog		
Instrmnt Type:	: standard gauge with float and stilling well		
Digitzd Intvl:	: hourly to tenths of feet		
Present Data	: Hourly, daily, and monthly values obtained by:		
	Hourly	: spot sample on the hour from the analog roll	
	Daily	: 119-point convolution filter (Bloomfield, 1976) centered on noon applied to the hourly data with respective periods of the 95, 50, and 5% amplitude points at 124.0, 60.2, and 40.2 hours	
	Monthly:	: Simple average of all daily values; calculated if 7 or fewer days are missing	
Span of data	: 02 Jan 1953 - 28 Jun 1975		
Gaps > 1 mon	: 01 Dec 1956 - 02 Feb 1957; 01 Sep 1957 - 01 Oct 1957 26 Jun 1961 - 11 Sep 1961		
Time Refernce:	GMT (hours 00-23)	Space-filler Flag	: -9999
Units	: millimeters	Missing Data Flag	: 9999
Existing	: Yes	Operational	: Yes
Sat. Trans.	: No	Distribution	: 1953-
1975	Refernce Levl: The data are referred to tide staff zero which is linked to fixed bench marks. However,		
comparisons	with neighboring sites and examination of the hourly residuals has lead to the following adjustment:		
	period	value added	
	((hour)day/month/year)	to original(mm)	
	-----	-----	
	(20)21/10/57 - (20)20/11/57	180	
Comment	: The daily and monthly values do not reveal any obvious reference level shifts or trends and agree fairly well with Manzanillo. A suspicious drop on 12/Oct/72 and rise on 02/Nov/72 of about 15 cm agrees relatively well with other sites and is apparently a true signal. Notable episodic events: 23-25 May 1960: Tsunami from S.C. Chile 28 Mar 1964: Tsunami from Alaska		
	CI MISSING	REPLACED GAPS	QUESTIONABLE
YEAR	(%) DATA	OR BAD DATA	FLUCTUATIONS
---	-----	-----	-----
1953	99 1	none	54-55
1954	100 none	none	199-363
1955	100 none	none	none
1956	92 336-366	none	none
1957	83 1-32,244-274	none	none
1958	96 127-142	none	91,318,327-

ANEXO B

331,341-					342,358
	1959	98	40-49,365	(07)001-(06)002	10-11
				(11)062-(23)062	
				(07)302-(19)302	
	1960	100	none	(18)310-(05)311	144-146,336-337
	1961	79	177-254	none	none
	1962	100	none	(07)001-(06)002	6-9,91-92,151
	1963	98	1-7	none	142,192-193
	1964	100	none	(22)088-(08)089	none
				(09)236-(18)236	
	1965	100	none	(02)071-(09)071	none
				(21)132-(04)133	
				(12)269-(23)269	
	1966	100	none	(22)303-(06)304	none
	1967	100	none	(12)028-(19)028	188-191
				(19)270-(05)271	
	1968	100	none	(21)069-(04)070	none
				(09)102-(16)102	
				(00)134-(09)134	
				(17)256-(12)257	
				(07)339-(15)339	
	1969	100	none	(00)344-(21)344	236-237
	1970	100	none	(22)174-(12)175	none
	1971	100	none	(07)107-(16)107	none
	1972	100	none	(06)034-(22)034	none
				(15)074-(22)074	
				(00)091-(18)091	
				(08)211-(22)211	
				(15)325-(23)325	
	1973	100	none	none	none
	1974	100	none	(15)198-(08)199	none
				(20)266-(14)267	
	1975	48	none	none	none

ANEXO C

En las siguientes figuras de se muestran las gráficas de comparación entre los registros originales de las estaciones de Manzanillo (Figura 35), Salina Cruz (Figura 36), Puerto Ángel (Figura 37) y Mazatlán (Figura 38) y la filtración obtenida de cada registro mareográfico (promedio mensual). En dichas figuras también se muestra el modelo del nivel del mar obtenido.

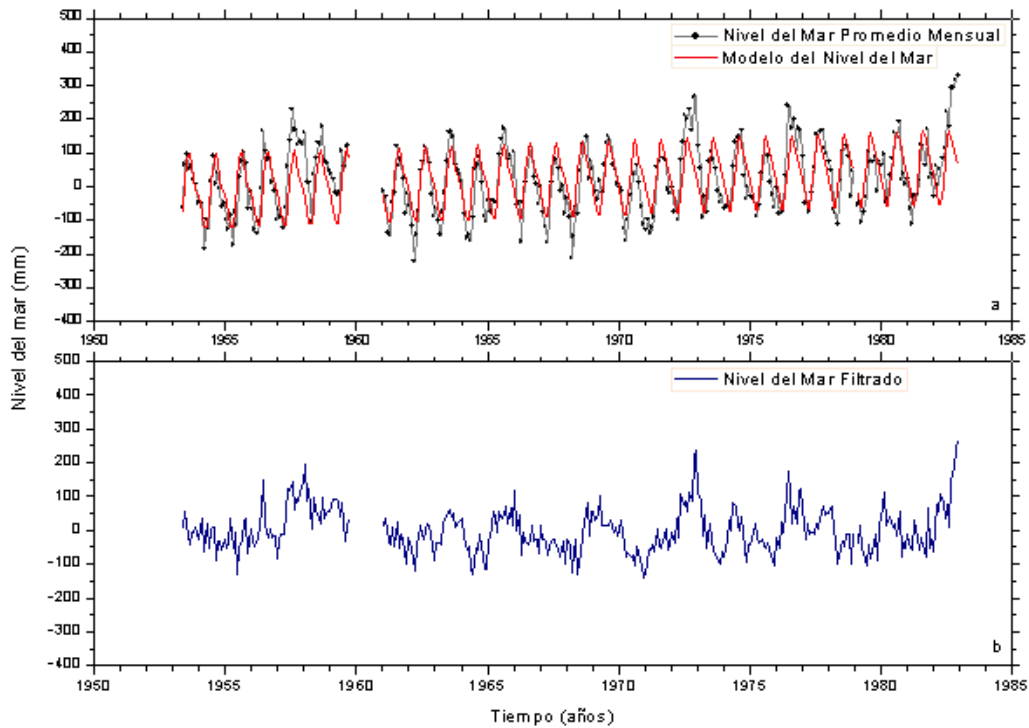


Figura 35. (a) Se muestran los datos del Nivel Promedio Mensual para la estación mareográfica de Manzanillo y el Modelo del Nivel del Mar obtenido. (b) Señal mareográfica filtrada.

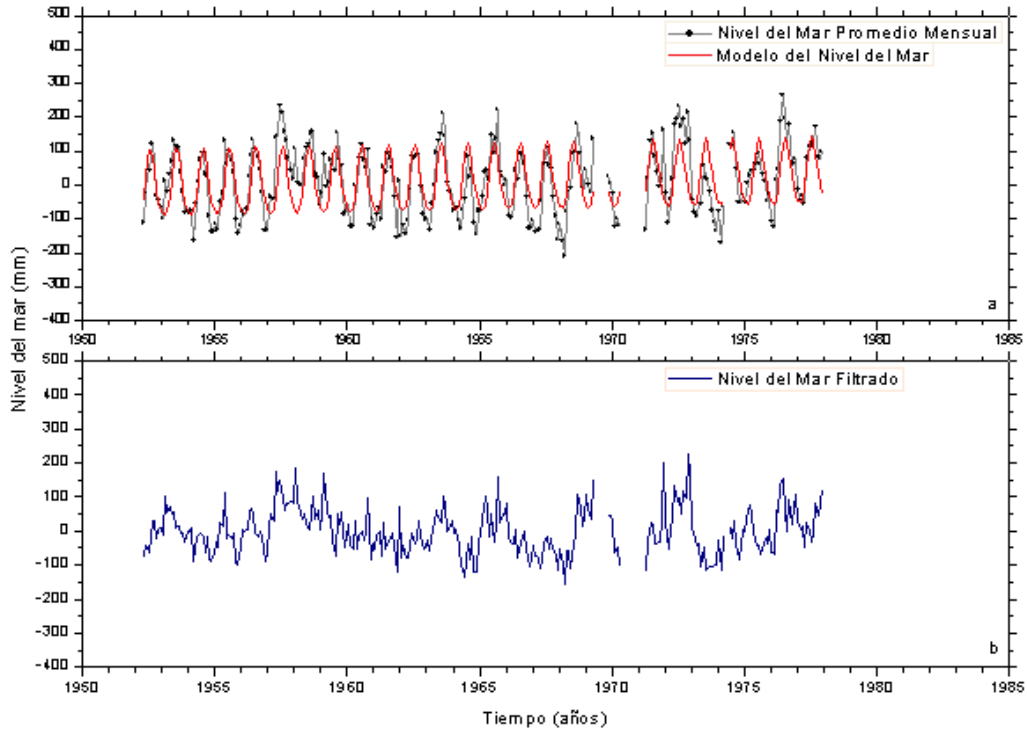


Figura 36. (a) Se muestran los datos del Nivel Promedio Mensual para la estación mareográfica de Salina Cruz y el Modelo del Nivel del Mar obtenido. (b) Señal mareográfica filtrada.

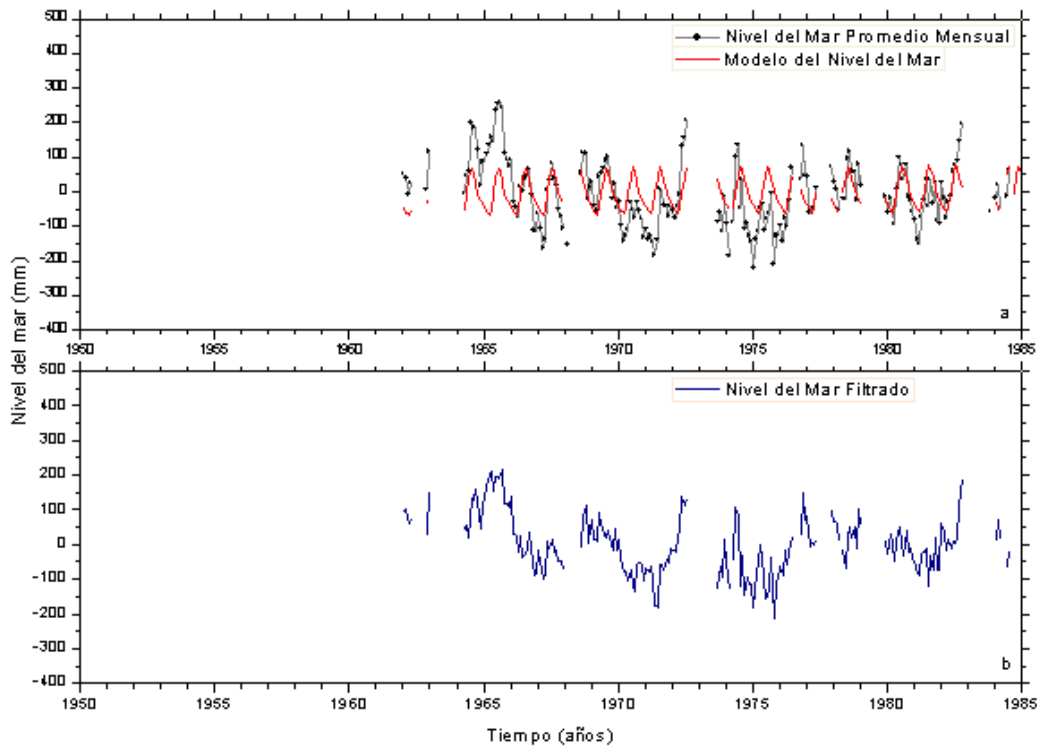


Figura 37. (a) Se muestran los datos del Nivel Promedio Mensual para la estación mareográfica de Puerto Ángel y el Modelo del Nivel del Mar obtenido. (b) Señal mareográfica filtrada.

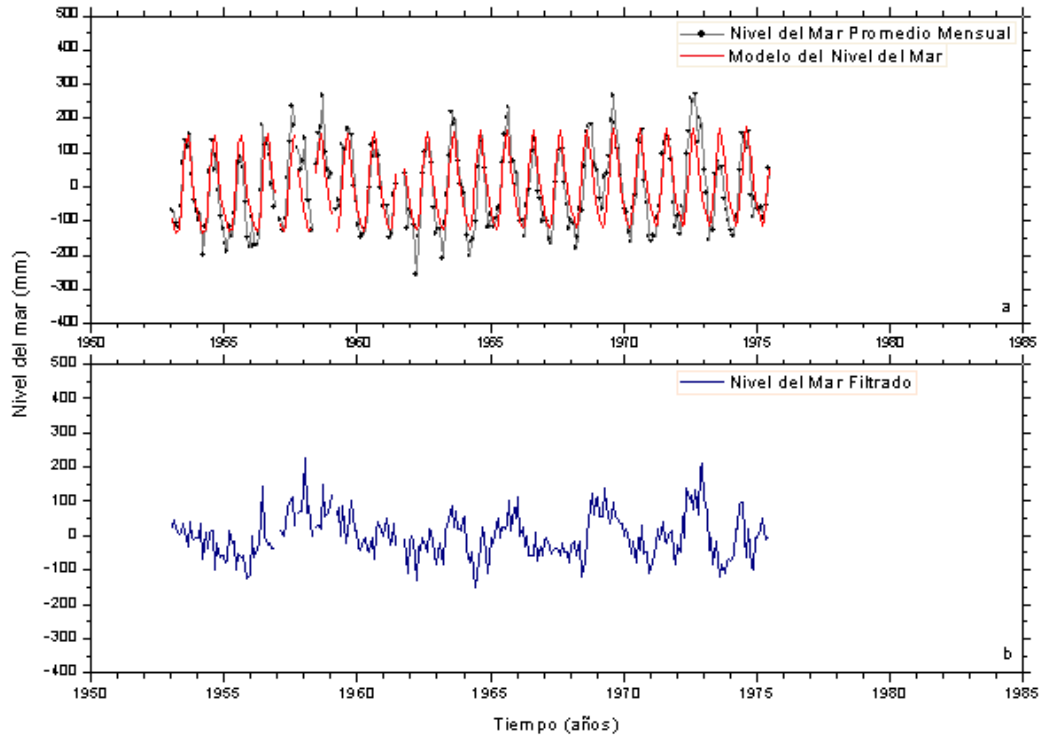


Figura 38. (a) Se muestran los datos del Nivel Promedio Mensual para la estación mareográfica de Mazatlán y el Modelo del Nivel del Mar obtenido. (b) Señal mareográfica filtrada.

ANEXO D

En este anexo se muestran las gráficas donde se compara el registro filtrado por el modelo armónico (parte (a) de las figuras 38 a 41) y las señales filtradas parcialmente con el método de regresión lineal (parte (b) de las figuras 38 a 41) para las estaciones de Manzanillo, Salina Cruz, Puerto Ángel y Mazatlán. En estas gráficas también se muestra la señal predecida obtenida a partir de la regresión lineal con los datos del ENSO (en parte (a) de las figuras).

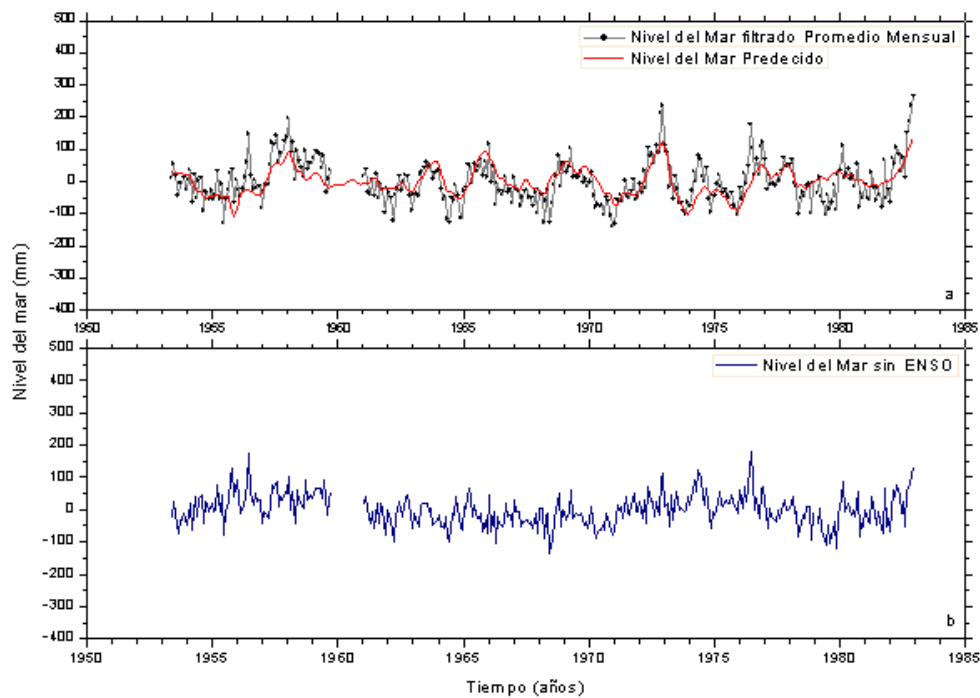


Figura 39. (a) Señal mareográfica en Mazatlan anteriormente filtrada con el modelo armónico y el nivel del mar predecido a partir de la regresión lineal con los datos del ENSO. (b) Residual de las señales mostradas en (a), eliminando así parcialmente el efecto de El Niño.

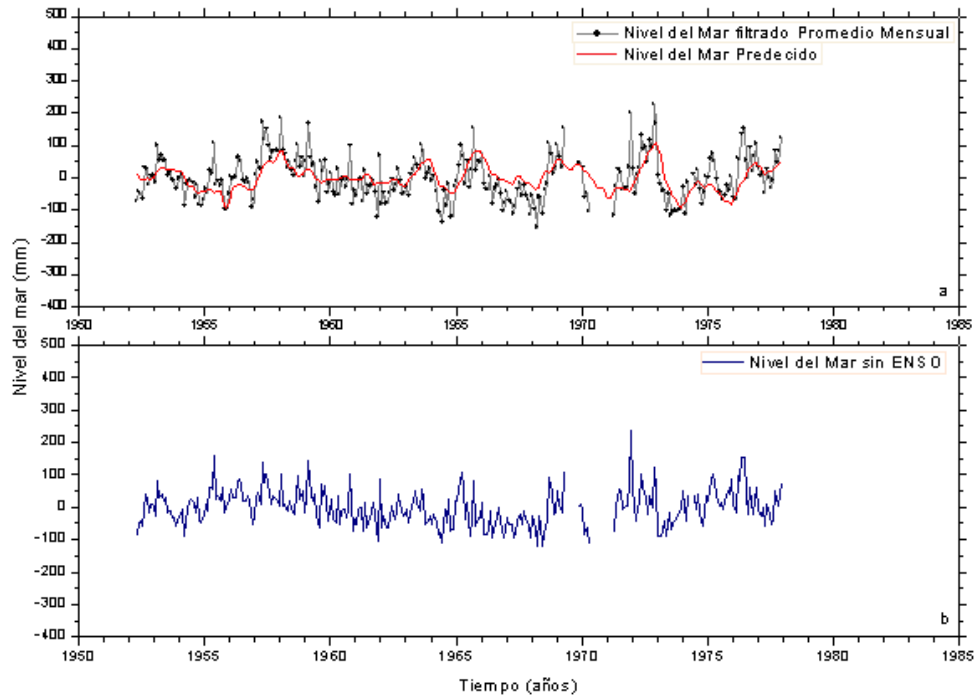


Figura 40. (a) Señal mareográfica en Salina Cruz anteriormente filtrada con el modelo armónico y el nivel del mar predecido a partir de la regresión lineal con los datos del ENSO. (b) Residual de las señales mostradas en (a), eliminando así parcialmente el efecto de El Niño.

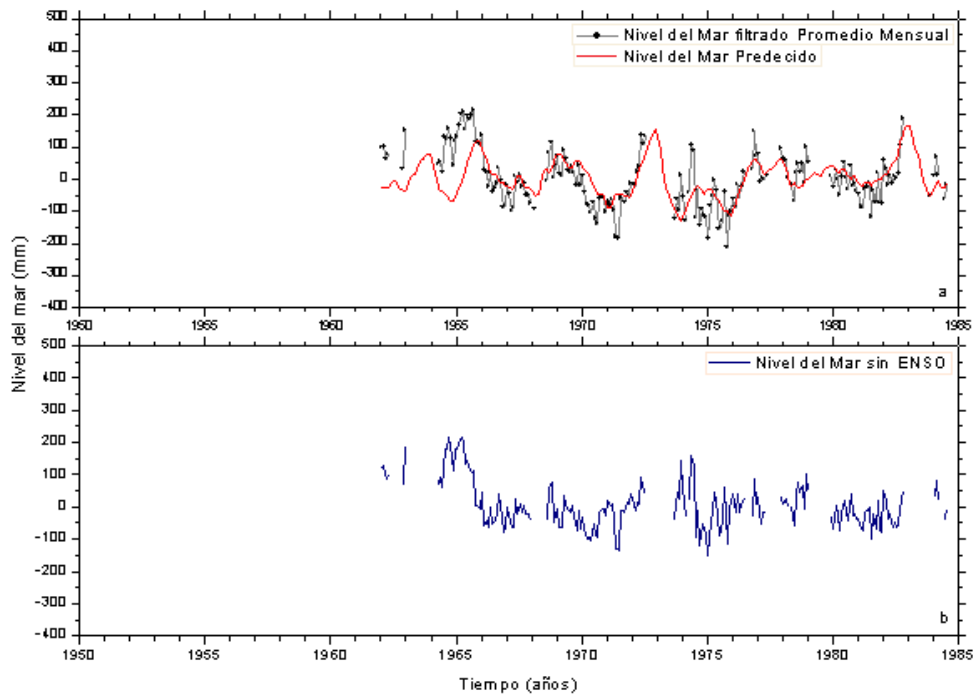


Figura 41. (a) Señal mareográfica en Puerto Ángel anteriormente filtrada con el modelo armónico y el nivel del mar predecido a partir de la regresión lineal con los datos del ENSO. (b) Residual de las señales mostradas en (a), eliminando así parcialmente el efecto de El Niño.

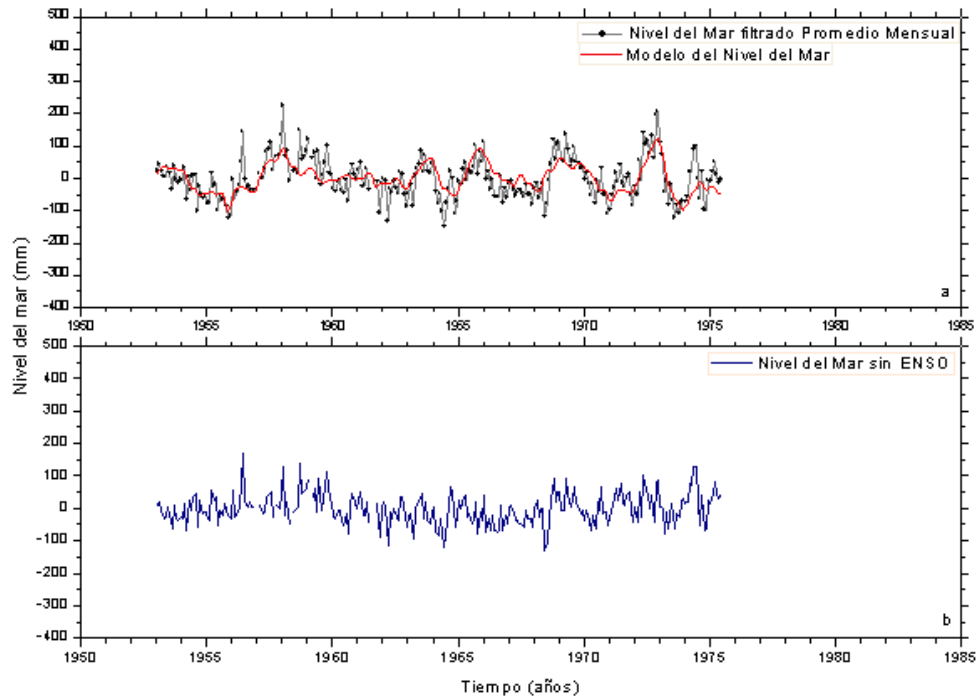


Figura 42. (a) Señal mareográfica en Mazatlán anteriormente filtrada con el modelo harmónico y el nivel del mar predecido a partir de la regresión lineal con los datos del ENSO. (b) Residual de las señales mostradas en (a), eliminando así parcialmente el efecto de El Niño.

En las siguientes gráficas se muestran las regresiones lineales de los registros de las estaciones mareográficas de Manzanillo = MZ, Salina Cruz = SC, Puerto Ángel = PA y Mazatlán = MAZ con los datos del ENSO.

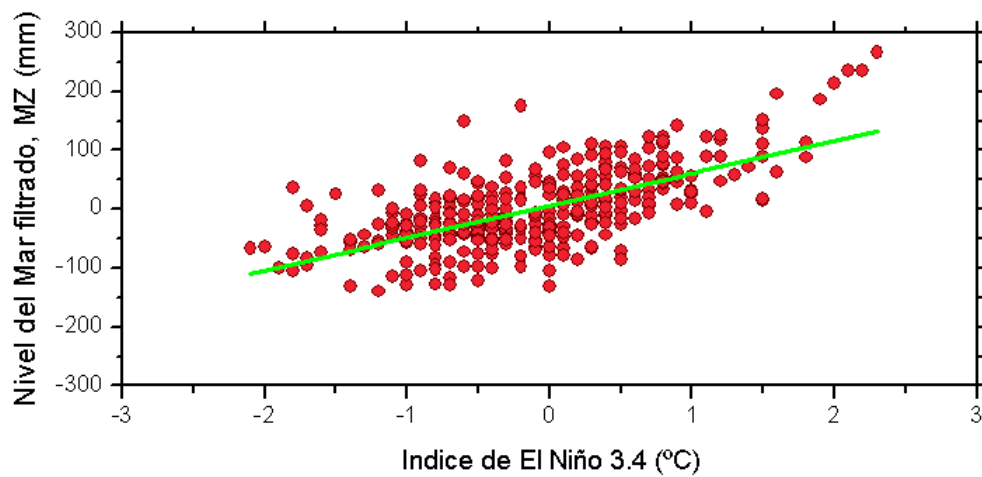


Figura 43. Gráfica de la regresión lineal de la señal del nivel del mar filtrada de Manzanillo = MZ y los datos del ENSO.

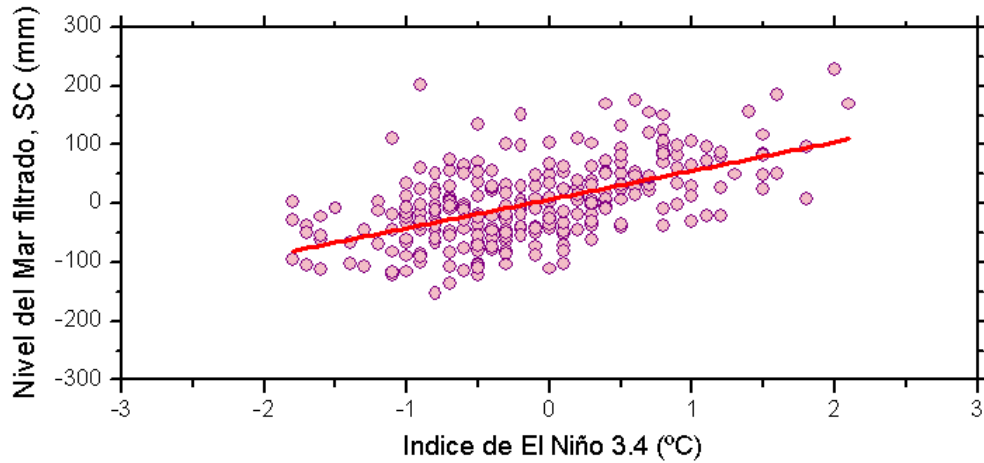


Figura 44. Gráfica de la regresión lineal de la señal del nivel del mar filtrada de Salina Cruz = SC y los datos del ENSO.

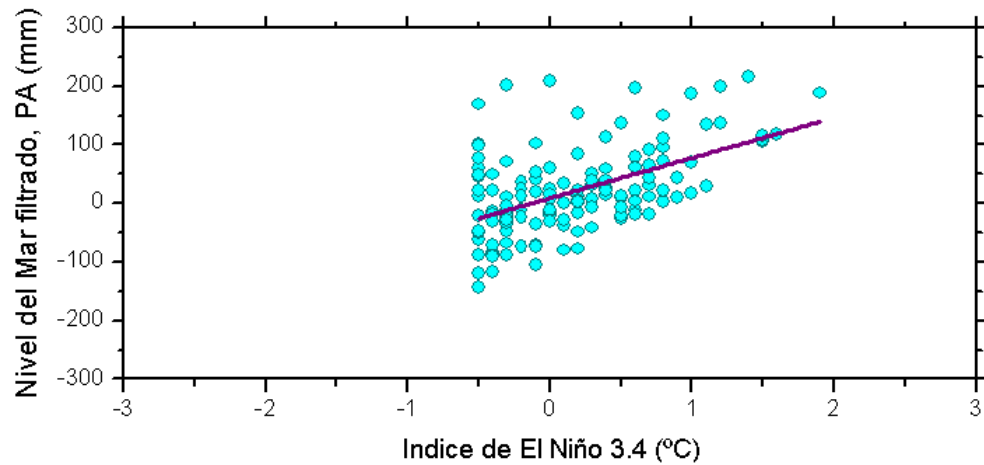


Figura 45. Gráfica de la regresión lineal de la señal del nivel del mar filtrada de Puerto Ángel = PA y los datos del ENSO.

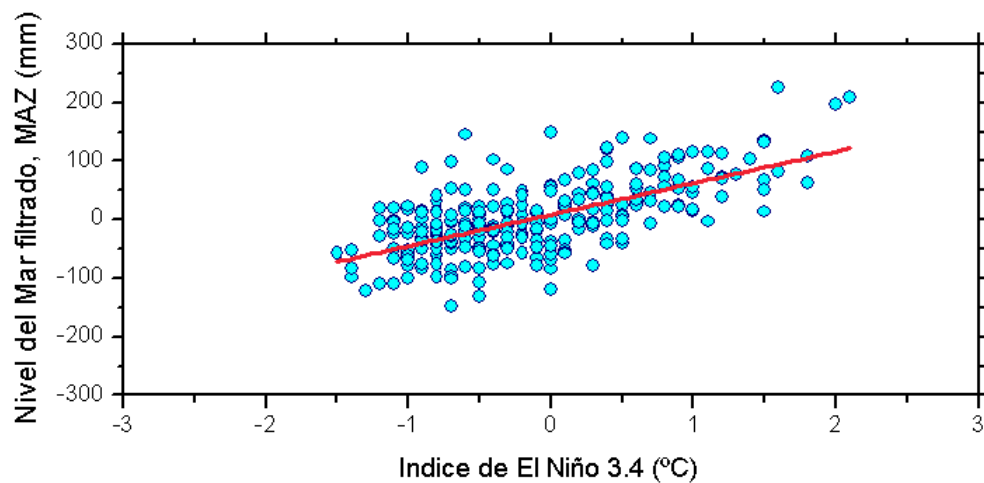


Figura 46. Gráfica de la regresión lineal de la señal del nivel del mar filtrada de Mazatlán = MAZ y los datos del ENSO

ANEXO E

En este anexo se encuentra el código fuente del programa Origin 8.0 que se utilizó para determinar el periodo debido a la actividad solar y de esta manera poder quitarlo de las estaciones mareográficas de Manzanillo, Salina Cruz, Puerto Ángel y Mazatlán. Se debe señalar que el programa permite editar una parte del código fuente, de acuerdo para lo que se le requiera usar y sin modificar demasiado el código.

```
#include <origin.h>
#include <fft_utils.h>

//-----
//
void _nlsfParamSine(
// Parametro(s) de prueba:
double& xc, double& w, double& A, double& y0,
// Conjunto(s) de Datos de Variable Independiente:
vector& x_data,
// Conjunto(s) de Datos de Variable Dependiente:
vector& y_data,
// Curva(s):
Curve x_y_curve,
// Código de Error Auxiliar:
int& nErr)
{
    // Iniciando parte editable

    vector<uint> vi;
    x_data.Sort(SORT_ASCENDING, TRUE, vi);
    y_data.Reorder(vi);
    int N=y_data.GetSize();
    double t;
    vector r(N);
    vector<complex> vc(N);
    t = (x_data[N-1] - x_data[0]) / (N-1);
    vc=y_data;
    fft_complex(N, vc);
    vc.GetAmplitude(r);
    if (t==0)
    {
        y0 = r[0] / N;
        A = 0;
        w = 1;
        return;
    }

    y0 = r[0] / N;
    double dMin,dMax;
    y_data.GetMinMax(dMin, dMax);
    A = 0.5 * (dMax - dMin);
    int iMin, iMax;
    r[0] = NANUM;
```

```

r.GetMinMax(dMin,dMax,&iMin, &iMax);

int k=iMax;
if(k>N/2) k=N-k;
double freq=k/(t*N);
w=1.0/(2.0*freq);

xc = xatymax(x_y_curve);
if( xc == NANUM) xc = 0;
xc = xc - 2*w*floor(xc/2/w) - 0.5*w;

// Fin de la parte editable
}

```

Aquí también se muestran las comparaciones de las gráficas entre el nivel del mar filtrado por análisis armónico y filtro parcial del ENSO por regresión lineal, y el residual de la señal después de obtener el periodo debido a la actividad solar.

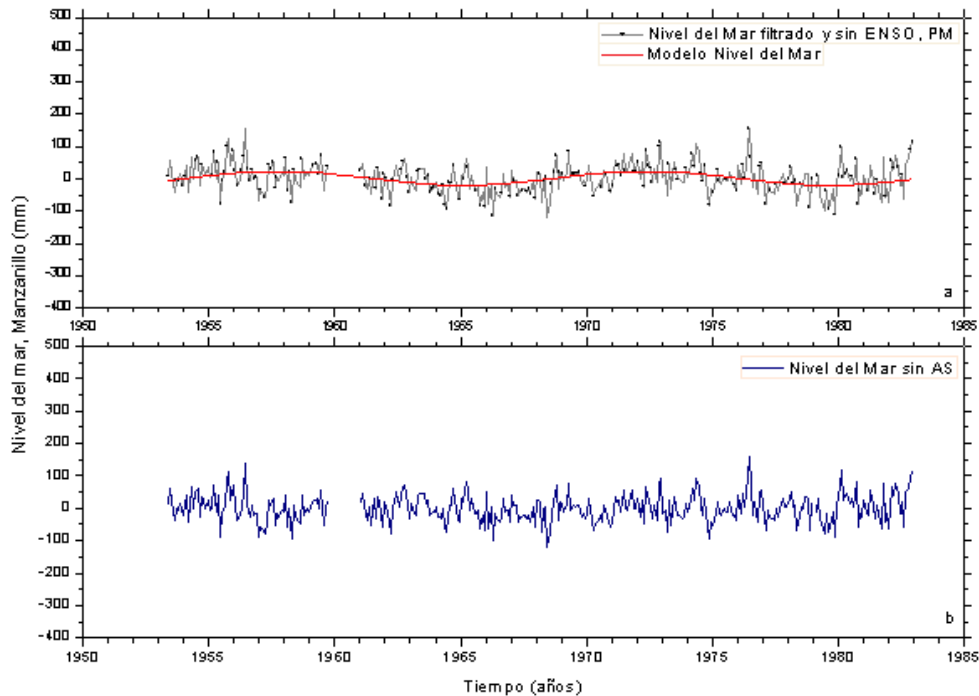


Figura 47. (a) Registro mareográfico de Manzanillo anteriormente filtrado donde se eliminó parcialmente el ENSO con el método de regresión lineal y enfrente se muestra el ajuste (modelo de la ec. 13, Cap. II) del nivel del mar. (b) Residual de la señal mostrada en (a), eliminando así el efecto producido por la Actividad Solar (AS). PM = Promedio Mensual.

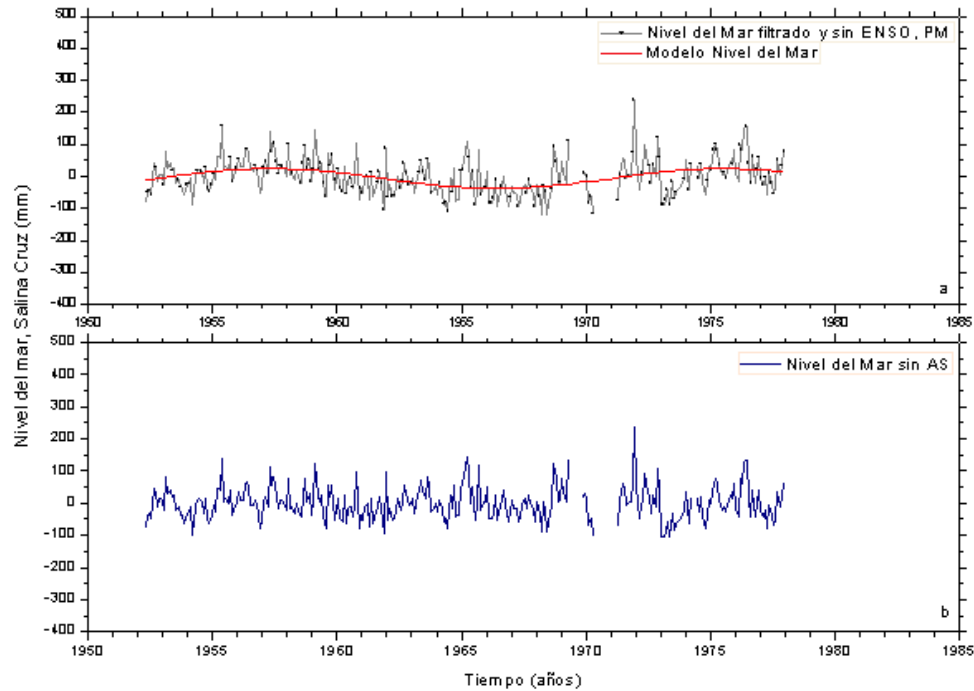


Figura 48. (a) Registro mareográfico de Salina Cruz anteriormente filtrado donde se eliminó parcialmente el ENSO con el método de regresión lineal y enfrente se muestra el ajuste (modelo de la ec. 13, Cap. II) del nivel del mar. (b) Residual de la señal mostrada en (a), eliminando así el efecto producido por la Actividad Solar (AS). PM = Promedio Mensual.

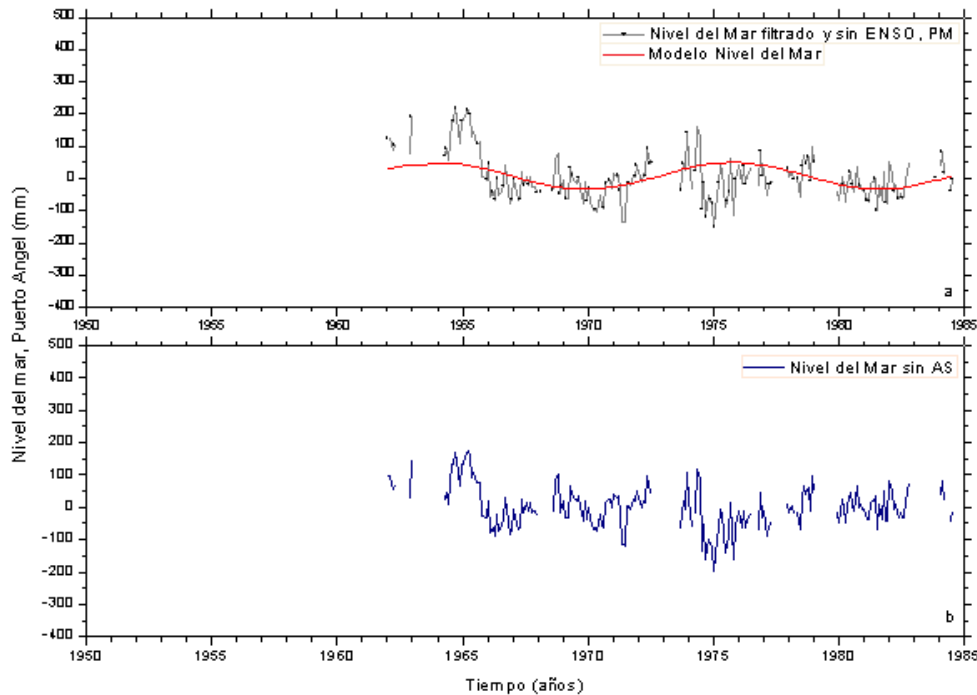


Figura 49. (a) Registro mareográfico de Puerto Ángel anteriormente filtrado donde se eliminó parcialmente el ENSO con el método de regresión lineal y enfrente se muestra el ajuste (modelo de la ec. 13, Cap. II) del nivel del mar. (b) Residual de la señal mostrada en (a), eliminando así el efecto producido por la Actividad Solar (AS). PM = Promedio Mensual.

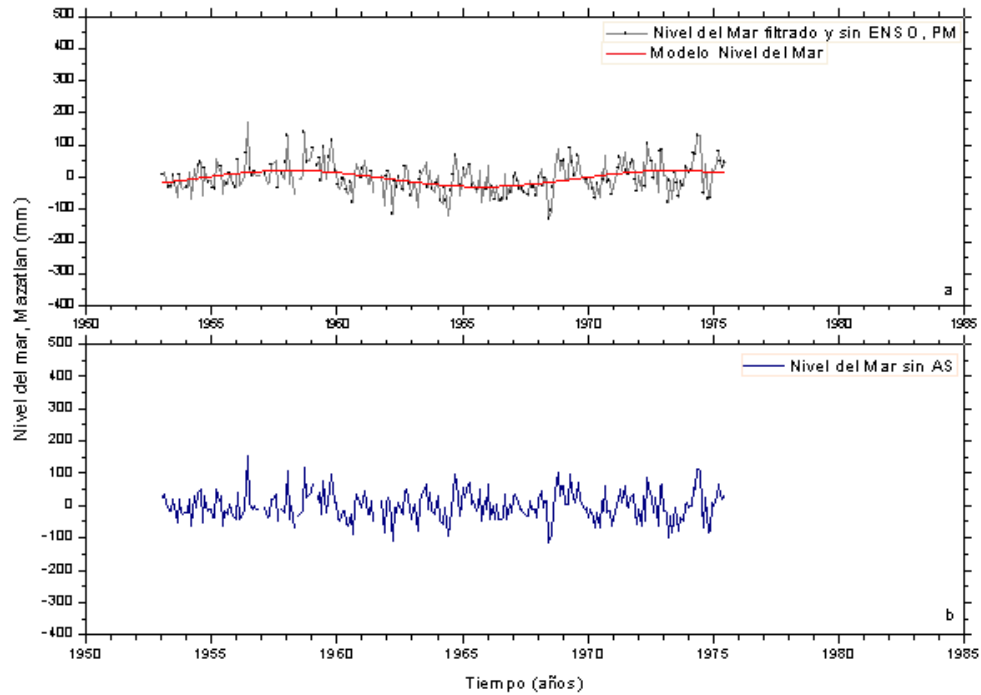


Figura 50. (a) Registro mareográfico de Mazatlán anteriormente filtrado donde se eliminó parcialmente el ENSO con el método de regresión lineal y enfrente se muestra el ajuste (modelo de la ec. 13, Cap. II) del nivel del mar. (b) Residual de la señal mostrada en (a), eliminando así el efecto producido por la Actividad Solar (AS). PM = Promedio Mensual.

BIBLIOGRAFÍA

- Bandy W., V. Kostoglodov, A. Hurtado Diaz and M. Mena, Structure of the southern Jalisco subduction zone, Mexico, as inferred from gravity and seismicity, *Geofísica Internacional*, 38, 3, pp. 127-136, 1999.
- Blewitt, G., and David, L., Effect of annual signals on geodetic velocity, *J. Geophys. Res.*, 107, B7, pp. 1-11, 2002.
- Colan, R., Service, R., El Niño and La Niña: Tracing the Dance of Ocean and Atmosphere, *National Academy of Sciences*, 2000.
<http://www7.nationalacademies.org/opus/elnino.html>.
- Cruz, G. and M. Wyss, Large earthquakes, mean sea level, and tsunamis along the Pacific coast of Mexico and Central America, *Bull. Seism. So. Am.*, 73, 553-570, 1983.
- Douglas, B. C., Global Sea Rise: A Redetermination, *Surveys in Geophysics*, 18, 279-292, 1997.
- Dragert, H., K. Wang and S. J. Thomas, A Silent Slip Event on the Deeper Cascadia Subduction Interface, *Science*, 292, 1525-1528, 2001.
- Foreman, M.G.G., and Henry, R.F., Tidal Analysis based on high and low water observations, 1979, *Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney B.C.*, Revised 2004.
http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/sci/osap/projects/tidpack/tidpack_e.htm.
- Franco, S.I., Kostoglodov, V., Larson, K.M., Manea, V.C., Manea, M., and Santiago, J.A., Propagation of the 2001-2002 silent earthquake and interplate coupling in the Oaxaca subduction zone, Mexico, *Earth Planets Space*, 57, 973-985, 2005.
- Frey Mueller, J., H. Fletcher, S. Hreinsdttir, S.C. Cohen, and M. Wyss, The Great Alaska "Earthquake" of 1998-2001, *Eos. Trans. AGU*, 82 (47), Fall Meet. Suppl., Abstract G22D-11, F264-265, 2001.
- Genrich, J.F., Y. Bock, and C. Subarya, Spatial and temporal variations in strain accumulation at the Sumatra subduction zone from recent GPS measurements, *Eos. Trans. AGU*, 82 (47), Fall Meet. Suppl., Abstract G31A-0125, F266, 2001.

-
- Grivel, F., Anomalies of the mean sea level at Acapulco, Gro., Mexico, *Geofís. Int.*, 7, 53-61, 1967.
- Hathaway, D. H., Wilson, R. M., What the sunspot record tells us about the space climate, *Submitted to Solar Phys.*, 2004.
- Hirose, H., K. Hirarahara, F. Kimata, N. Fujii and S. Miyazaki, A show thrust slip event following the two 1996 Hyuganada earthquakes beneath the Bungo Channel, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 21, 3237-3240, 1999.
- Kostoglodov, V., Pacheco, J., "Cien años de sismicidad en México", *Instituto Geofísica, UNAM*, 1999,
<http://tlacaelel.igeofcu.unam.mx/~vladimir/sismos/100a%F1os.html>.
- Kostoglodov, V., W. Bandy, J. Dominguez, and M. Mena, Gravity and seismicity over the Guerrero seismic gap, Mexico, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 3385- 3388, 1996.
- Kostoglodov, V., S. K. Singh, J. A. Santiago and S. I. Franco, A large silent earthquake in the Guerrero seismic gap, Mexico, *Geophys. Res. Lett.*, 30, No. 15, 2003.
- Larson, K.M., Kostoglodov, V., Miyazaki, S., and J.A. Santiago, The 2006 aseismic slow slip event in Guerrero, Mexico: New results from GPS, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L13309, 2007.
- Lombard, A., Cazenave, A., Le Traen, P. Y., Ishii M., Contribution of thermal expansion to present-day sea level change revisited, *Glob. Planet. Change*, 47, 1-16, 2005.
- Lowry, A. R., K. M. Larson, V. Kostoglodov, and R. Bilham, Transient fault slip in Guerrero, southern Mexico, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3753- 3756, 2001.
- McCaffrey, R., Wallace, L., and Beavan, J., Slow slip events, temperature and interseismic coupling at the Hikurangi subduction zone, New Zealand, *Eos. Trans. AGU*, 82 (47), Fall Meet. Suppl., Abstract 2007AGUFM.T21A0367M, A367, 2007.
- McPhaden, M. 2001. El Niño and La Niña: causes and global consequences, En: M. Cracken y J. Perry (ed). *Encyclopedia of global environmental change*, 1, John Wiley & Sons, New York, pp. 353-370.
- Ortiz, M., S. K. Singh, V. Kostoglodov and J. Pacheco, Source areas of the Acapulco-San Marcos, Mexico earthquakes of 1962 (*M* 7.1; 7.0) and 1957

(M 7.7), as constrained by tsunami and uplift records, *Geofís. Int.*, 39, 4, pp. 337-348, 2000.

Savage, J. C., A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 88, 147- 157, 1983.

Schmitt, S.V., A Geodetic Study of the 22 January 2003 Tecoman, Colima, Mexico Earthquake, *Eos. Trans. AGU*, 86(52), Fall Meet. Suppl. Abstract G21B-1284, 2005.

Singh, S.K., J. Havskov, and L. Astiz, Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican subduction zone, *Bull. Seism. Soc. Am.* 71, **3**, pp. 827-843, 1981.

Ugur Sanli, D., and G. Blewitt, Geocentric sea level trend using GPS and >100-year tide gauge record on postglacial rebound nodal line, *J. Geophys. Res.*, 106, B1, 713-719, 2001.

University Hawai'i Sea Level Center, <http://uhslc.soest.hawaii.edu/>.

Vanicek, P., Further development and properties of the spectral analysis by least-squares, *Astrophys. Space Sci.*, 12, 70-73, 1971.

Vanicek, P., To the problem of noise reduction in sea-level records used in vertical crustal movement diction, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 17, 265-280, 1978.