

Zavala-Hidalgo, J., R. de Buen Kalman, R. Romero-Centeno, y F. Hernández Maguey, 2011. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas, p. 315-334. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático (segunda edición). Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 754 p.

VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS
MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO (SEGUNDA EDICIÓN)

Tendencias del nivel del mar en la costas mexicanas

*J. Zavala-Hidalgo, R. de Buen Kalman,
R. Romero-Centeno y F. Hernández Maguey*

RESUMEN

Se presentan estimaciones del ciclo anual y tendencias de largo plazo en el nivel del mar para 16 sitios de las costas mexicanas, nueve en el Pacífico y siete en el Golfo de México. Se consideran los promedios mensuales de las series de nivel del mar más largas del país con datos obtenidos por el Servicio Mareográfico Nacional. Para cada sitio se obtiene el ciclo anual, calculando los promedios mensuales y la desviación estándar. Para calcular las tendencias de largo plazo, únicamente se consideran años completos para evitar sesgos por la variación estacional. Los sitios en el Golfo de México muestran un máximo en el nivel del mar durante septiembre-octubre y un mínimo en distintos meses del año. Las tendencias en el golfo son positivas, siendo Cd. Madero el sitio que presenta el mayor incremento por año (9.2 ± 5.1 mm año⁻¹), Alvarado el menor (1.8 ± 2.3 mm año⁻¹). Destaca Veracruz por ser la serie más larga y, por lo tanto, la más robusta (1.9 ± 0.6 mm año⁻¹). Las costas del Pacífico muestran un máximo en distintas épocas del año, observándose en julio en Salina Cruz, Puerto Ángel y Acapulco; de julio a septiembre en Manzanillo, Mazatlán, Topolobampo y Guaymas, y en septiembre en La Paz y Ensenada. En cuanto a las tendencias sobresale Acapulco por ser la única serie con una tendencia negativa para el periodo (2.4 ± 3.2 mm año⁻¹), mientras que la serie con mayor tendencia es Guaymas, (4.2 ± 1.7 mm año⁻¹). Los resultados muestran que las tendencias y variaciones en el nivel del mar son distintas para cada región debido a procesos oceanográficos y movimientos verticales de la corteza terrestre, por lo que es necesario fortalecer los estudios regionales y apoyar las mediciones operacionales de nivel del mar.

Palabras clave: nivel del mar, procesos oceanográficos, costas mexicanas.

INTRODUCCIÓN

El nivel del mar es una importante variable oceanográfica afectada por el cambio climático. De acuerdo con el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), datos globales indican que en el periodo comprendido entre 1961 y 2003 el nivel del mar aumentó a una tasa promedio de $1.8 \pm 0.5 \text{ mm año}^{-1}$ (Rosenzweig *et al.*, 2007). Estos datos muestran también que en el periodo 1993-2003 la tasa de incremento fue de $3.1 \pm 0.7 \text{ mm año}^{-1}$, aunque no se sabe si el aumento en este período es debido a oscilaciones naturales de escala decadal o si puede ser atribuido al cambio climático. Las proyecciones del IPCC señalan que el nivel del mar seguirá aumentado, lo cual afectará las zonas costeras.

Los cambios en la morfología de las zonas costeras son el resultado de la influencia de muchos procesos, siendo uno de ellos el aumento en el nivel del mar. Entre los procesos más importantes se puede mencionar el balance entre el aporte y la remoción de sedimentos, el transporte litoral de sedimentos, la incidencia de eventos extremos y los movimientos verticales de la corteza terrestre.

Es importante señalar que los cambios en el nivel del mar medidos en una localidad son la respuesta a una gran variedad de fenómenos, entre los que se pueden mencionar la marea; los seiches; las corrientes costeras; los fenómenos meteorológicos de escala sinóptica como nortes y huracanes; los fenómenos oceanográficos de gran escala como el fenómeno de El Niño; variaciones interdecadales como la oscilación decadal del Pacífico; condiciones

oceanográficas que son la respuesta a fenómenos que se originan lejos de la zona de influencia, como las ondas atrapadas a la costa; los tsunamis; los movimientos verticales de la corteza terrestre; los cambios en la presión atmosférica y, por supuesto, la señal del cambio del nivel del mar debida al calentamiento global del planeta.

Los datos de nivel del mar en México muestran tendencias similares a las globales y dichas tendencias son investigadas en este trabajo. Las mediciones del nivel del mar realizadas por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) representan uno de los esfuerzos pioneros y más importantes de monitoreo de variables ambientales en forma operacional en México.

El Servicio Mareográfico Nacional (SMN) es uno de los proyectos más antiguos de la UNAM, contando en su acervo con algunas de las series de datos ambientales más largas que existen en México (con series que datan de 1946). La UNAM inició el monitoreo del nivel del mar en la década de los 40s del siglo pasado para lo cual, además de la instalación de los mareógrafos, se instalaron bancos de nivel en las inmediaciones de las estaciones mareográficas, los cuales han sido fundamentales para la georeferenciación y muchos de ellos han sido utilizados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) para sus labores de cartografía del territorio nacional. Actualmente la UNAM mantiene, en colaboración con otras instituciones, 15 sitios de medición del nivel del mar, los cuales se encuentran en un proceso de modernización utilizando técnicas de telemetría y cómputo

que permiten conocer el estado de esta variable en tiempo real o casi real. Cabe mencionar que el estudio de las tendencias del nivel del mar en los distintos sitios de monitoreo se ve limitada por la longitud y la continuidad de las series de tiempo.

OBJETIVO

Estimar, mediante el análisis de las series de datos del SMN, el ciclo anual y las tendencias de largo plazo del nivel del mar en las costas mexicanas.

METODOLOGÍA

Para estimar los cambios de largo plazo en el nivel del mar se requieren series de tiempo largas pues, además de la marea, el nivel del mar se modifica por diversos fenómenos que ocurren en distintas escalas de tiempo, desde los cambios estacionales hasta las variaciones decadales asociadas a oscilaciones en los grandes océanos del planeta. Con base en los datos de la UNAM, disponibles en el sitio de <http://www.mareografico.unam.mx>, se identificaron las series de tiempo que cubren los períodos más largos y se calculó la tendencia considerando únicamente los registros que contienen datos de los doce meses del año. Este criterio es necesario para evitar que exista un sesgo debido a la amplitud de la señal del ciclo anual.

Para calcular las tendencias se siguió el método de mínimos cuadrados y la incertidumbre de la pendiente se calculó al 95% de confianza. La tendencia, es decir, el incremento promedio por año se calculó mediante la ecuación:

$$Tendencia = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$$

donde x_i son las fechas en que hay observaciones, y_i las observaciones, \bar{x} y \bar{y} son los promedios de x_i y y_i respectivamente.

La incertidumbre en la pendiente se calculó como el producto del error estándar (SE) y el valor crítico (VC) que se obtiene de la distribución *t-Student* con $n-2$ grados de libertad, donde n es el número de observaciones:

$$Incertidumbre = SE \times VC$$

El error estándar se calculó utilizando la ecuación

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{(n-2) \sum (\bar{x}_i - \bar{x})^2}}$$

Donde \hat{y}_i son los valores estimados a partir del ajuste de la recta por el método de mínimos cuadrados

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ciclo anual del nivel del mar en los sitios analizados (figura 1) se presenta en las gráficas de la figura 2, las cuales muestran los promedios mensuales referidos al cero de la regla del mareógrafo, que no corresponde con el nivel medio del mar. Las barras indican \pm una desviación estándar y la línea horizontal marca el valor promedio del período analizado en cada sitio. El análisis de las tendencias en el nivel del mar para los distintos sitios se muestra en las gráficas de la figura 3. En estas gráficas los promedios mensuales se indican con líneas negras delgadas, los promedios corridos de doce meses (o menos si no existen los datos de algunos meses) se muestran con una línea gruesa y los promedios de los años en que existen datos completos se indican

con puntos negros. Estos últimos son los que se utilizaron para estimar la tendencia en el período y su incertidumbre.

En las tablas 1 y 2 se resumen las tendencias del nivel del mar para los sitios analizados en el Golfo de México y el Pacífico mexicano respectivamente. Se incluye el período de muestreo y el número de años considerado en el cálculo.

Los datos de la tabla 1 muestran tendencias bastante disímiles para el Golfo de México, ya que van de 1.8 ± 2.3 mm año⁻¹ en Alvarado, Ver., hasta 9.2 ± 5.1 mm año⁻¹ en Cd. Madero, Tamps., aunque debe tenerse en cuenta que las series de datos con las que se realizaron estas estimaciones no corresponden a los mismos períodos.

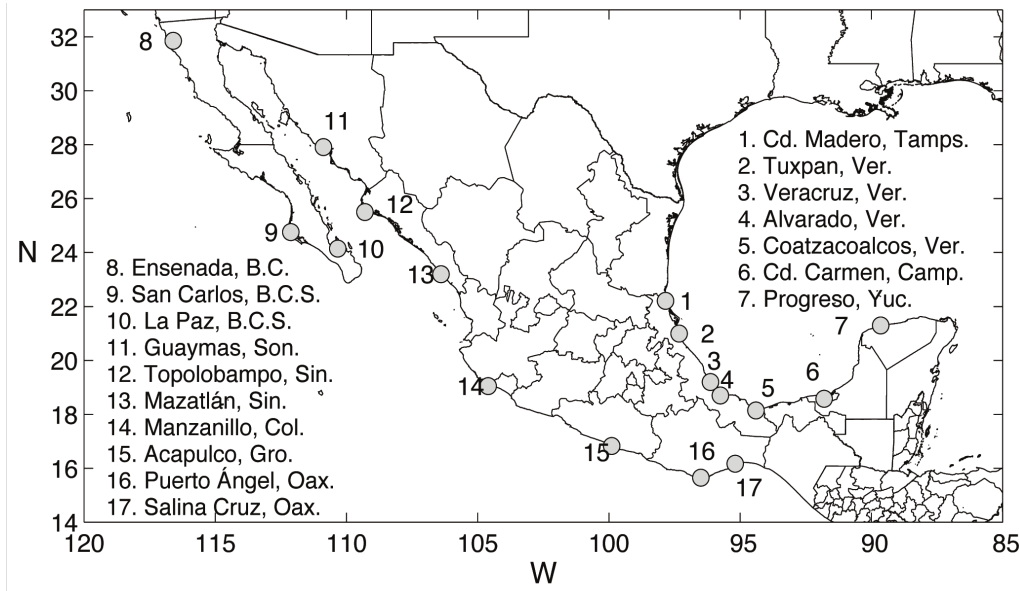


Figura 1. Localización de los sitios de las estaciones mareográficas consideradas en este estudio.

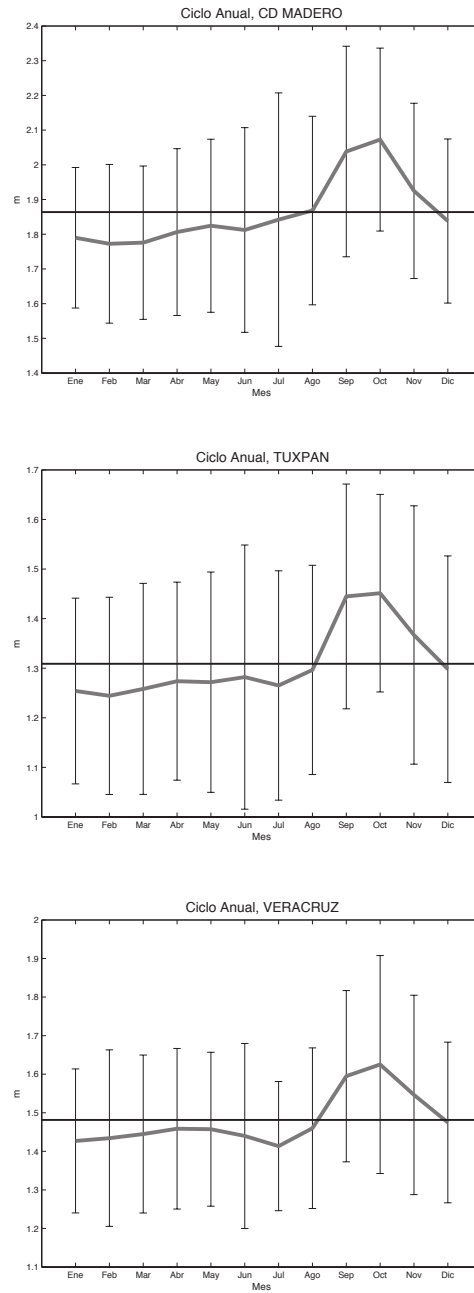


Figura 2. Ciclo anual del nivel del mar en varias ciudades costeras de la República Mexicana. Con línea gruesa se indican los promedios mensuales, con barras delgadas el valor de una desviación estandar y la línea horizontal representa el valor promedio del período analizado. Los datos están referidos al cero de la regla.

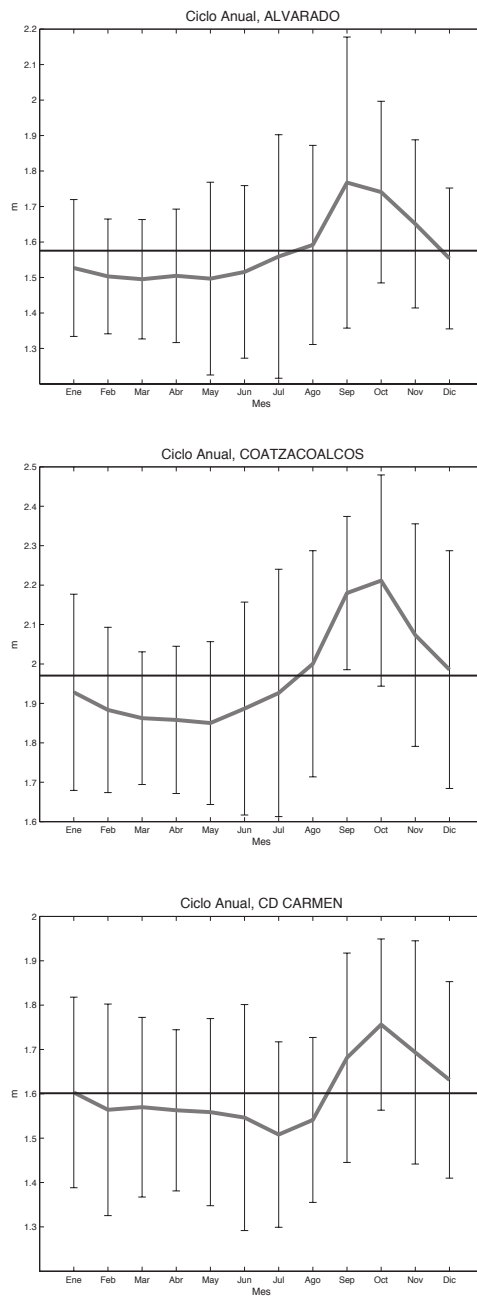


Figura 2 (continuación). Ciclo anual del nivel del mar en varias ciudades costeras de la República Mexicana. Con línea gruesa se indican los promedios mensuales, con barras delgadas el valor de una desviación estandar y la línea horizontal representa el valor promedio del período analizado. Los datos están referidos al cero de la regla.

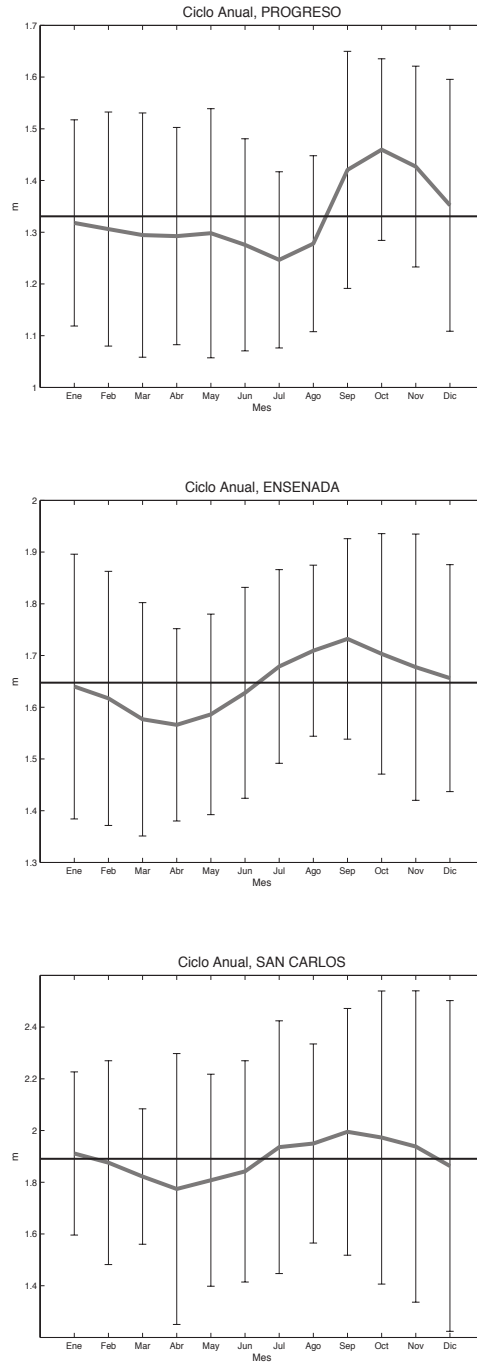


Figura 2 (continuación). Ciclo anual del nivel del mar en varias ciudades costeras de la República Mexicana. Con línea gruesa se indican los promedios mensuales, con barras delgadas el valor de una desviación estandar y la línea horizontal representa el valor promedio del período analizado. Los datos están referidos al cero de la regla.

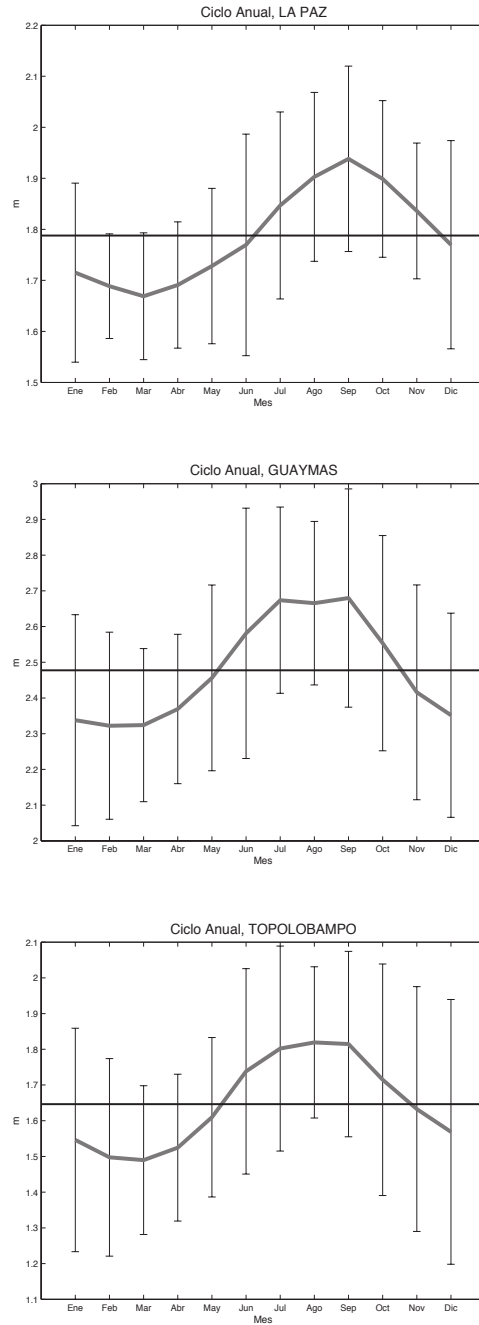


Figura 2 (continuación). Ciclo anual del nivel del mar en varias ciudades costeras de la República Mexicana. Con línea gruesa se indican los promedios mensuales, con barras delgadas el valor de una desviación estándar y la línea horizontal representa el valor promedio del período analizado. Los datos están referidos al cero de la regla.

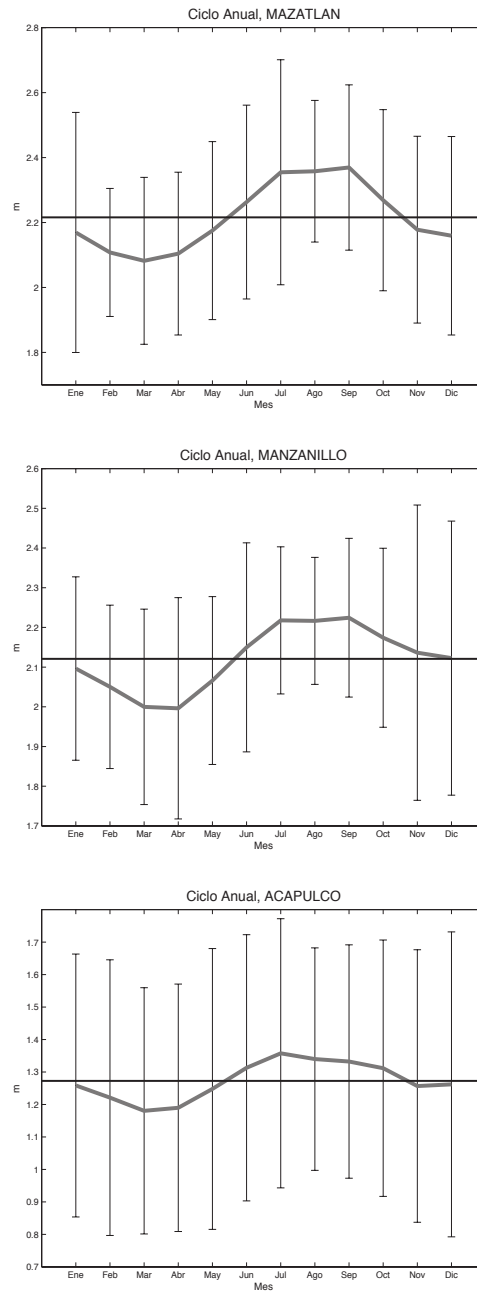


Figura 2 (continuación). Ciclo anual del nivel del mar en varias ciudades costeras de la República Mexicana. Con línea gruesa se indican los promedios mensuales, con barras delgadas el valor de una desviación estandar y la línea horizontal representa el valor promedio del período analizado. Los datos están referidos al cero de la regla.

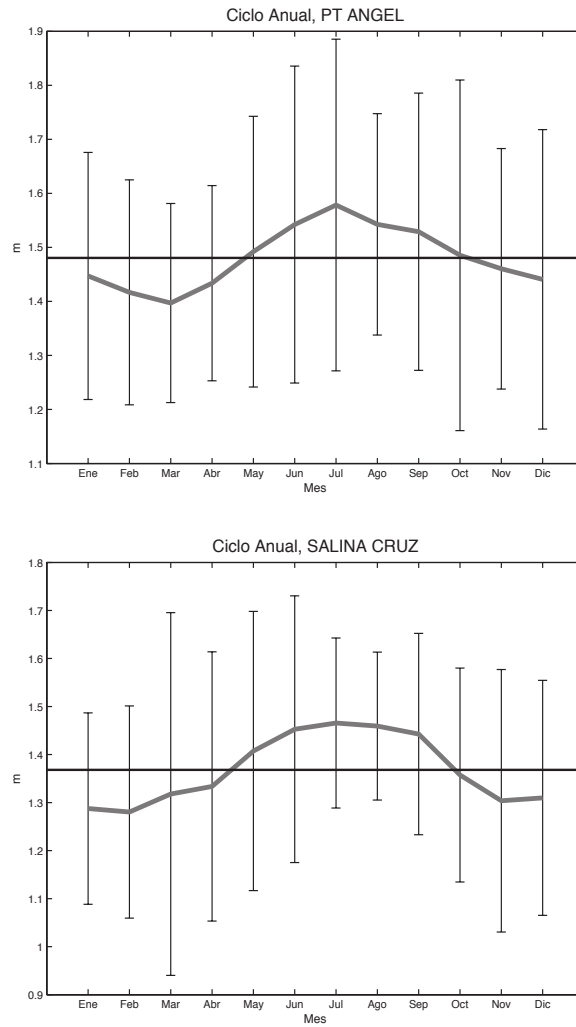


Figura 2 (continuación). Ciclo anual del nivel del mar en varias ciudades costeras de la República Mexicana. Con línea gruesa se indican los promedios mensuales, con barras delgadas el valor de una desviación estandar y la línea horizontal representa el valor promedio del período analizado. Los datos están referidos al cero de la regla.

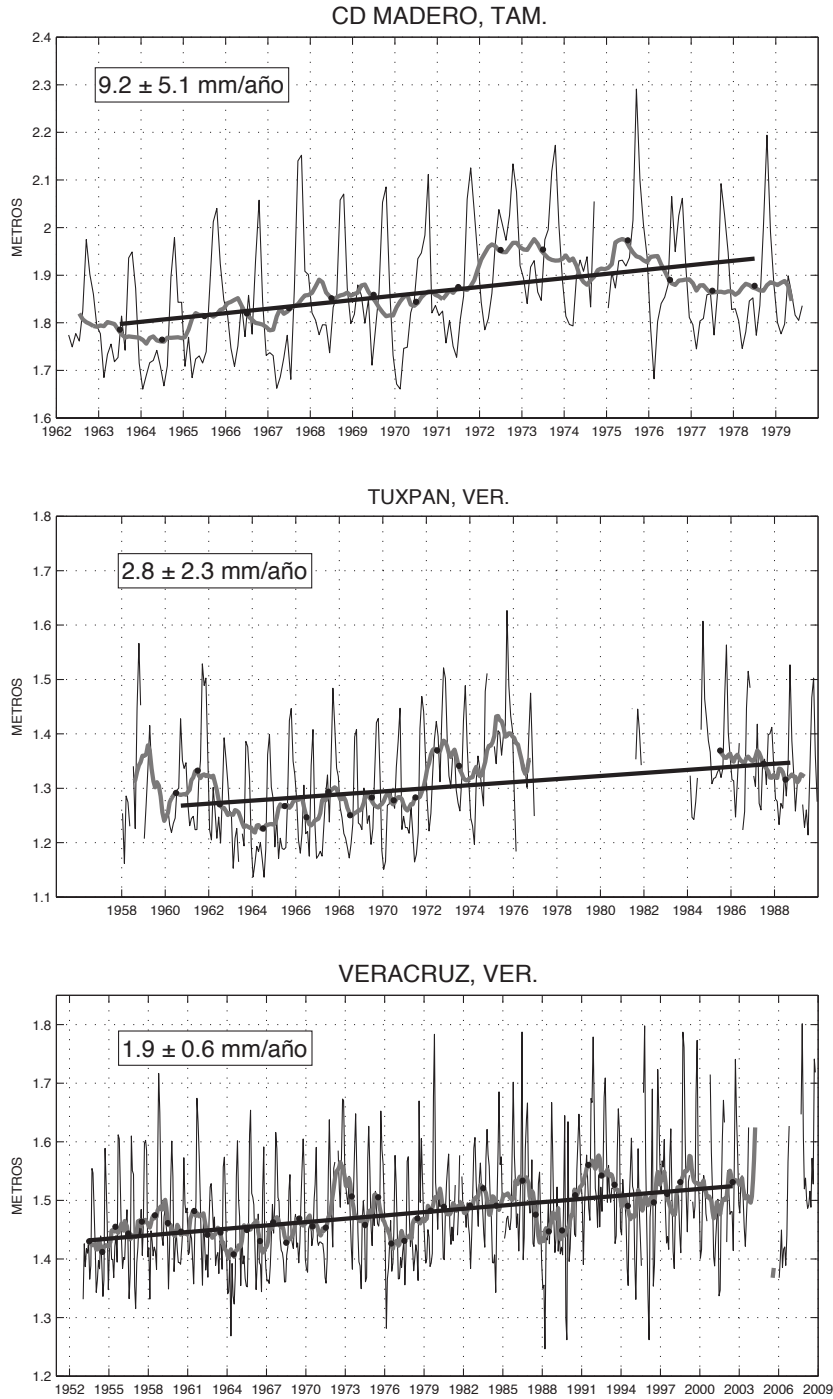


Figura 3. Tendencia del nivel del mar en diferentes ciudades costeras de la República Mexicana. En el recuadro se indica la tendencia y su incertidumbre al 95% de confianza.

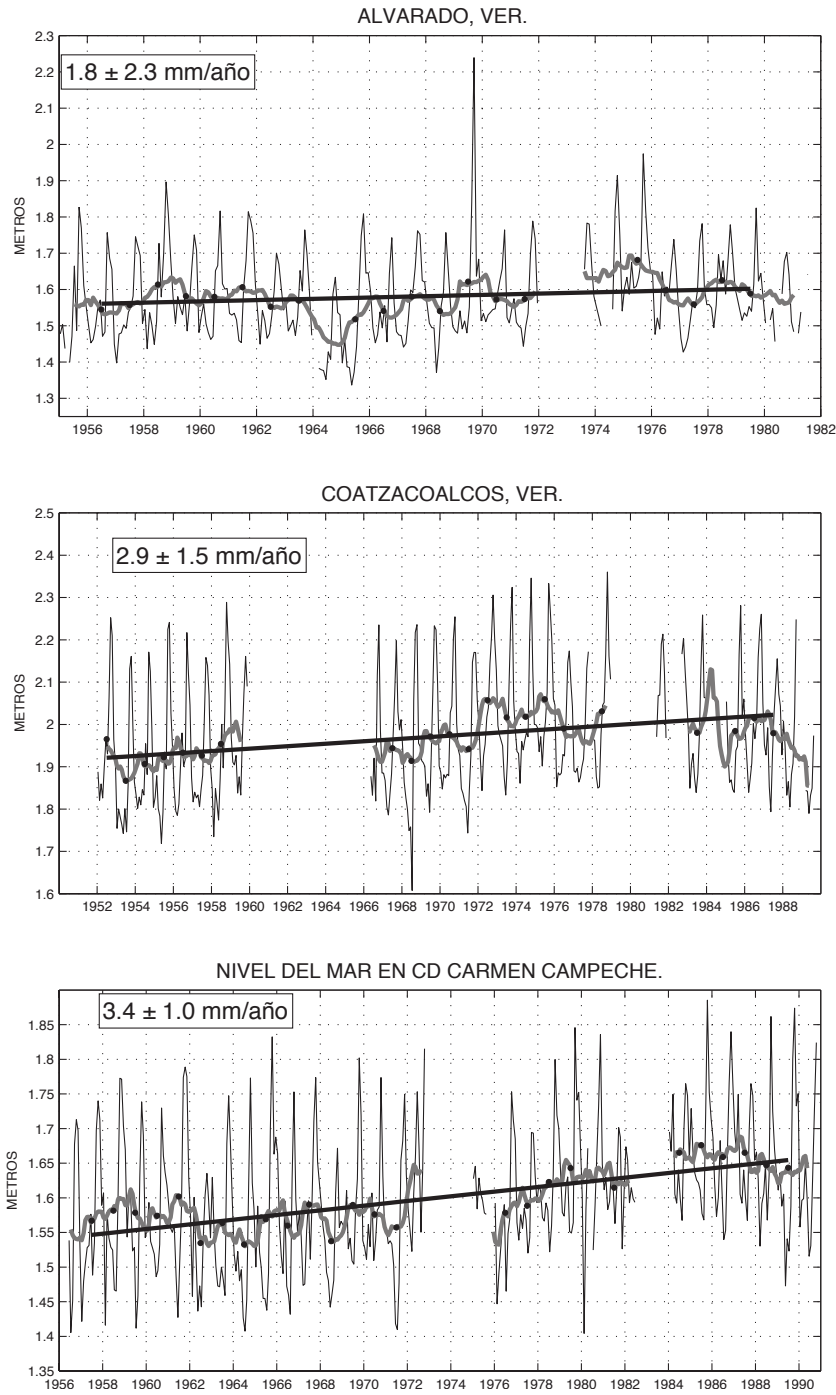


Figura 3 (continuación). Tendencia del nivel del mar en diferentes ciudades costeras de la República Mexicana. En el recuadro se indica la tendencia y su incertidumbre al 95% de confianza.

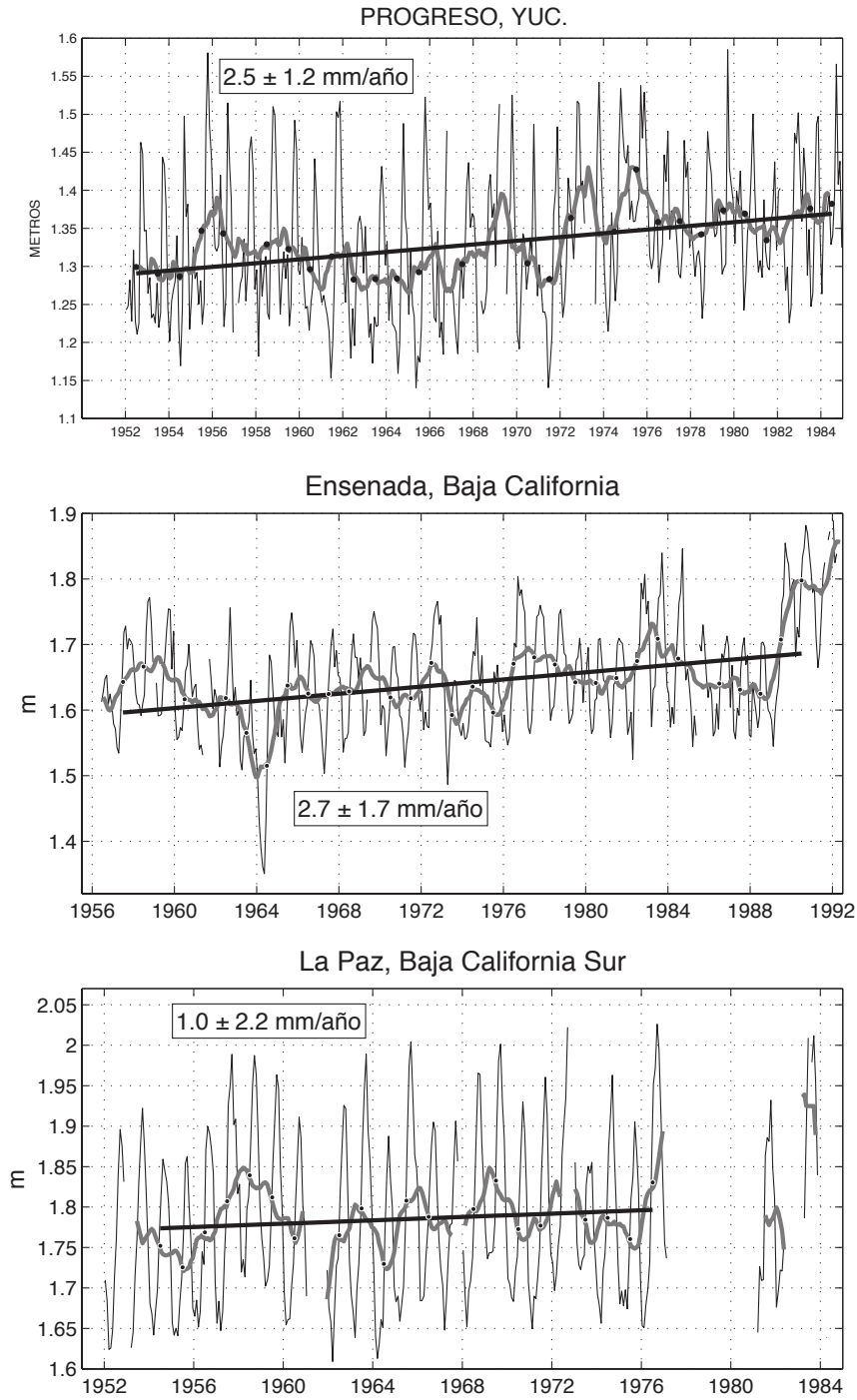


Figura 3 (continuación). Tendencia del nivel del mar en diferentes ciudades costeras de la República Mexicana. En el recuadro se indica la tendencia y su incertidumbre al 95% de confianza.

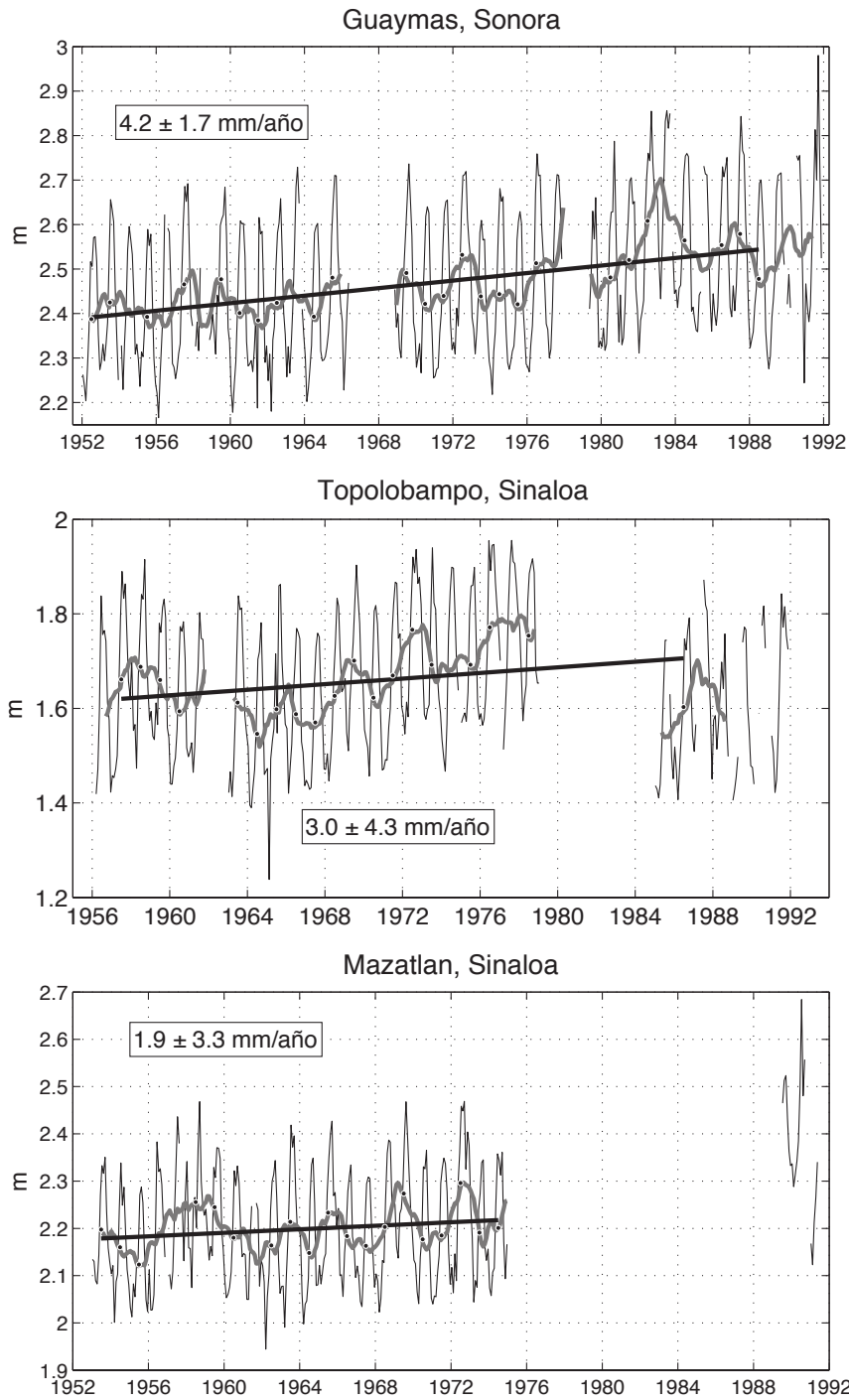


Figura 3 (continuación). Tendencia del nivel del mar en diferentes ciudades costeras de la República Mexicana. En el recuadro se indica la tendencia y su incertidumbre al 95% de confianza.

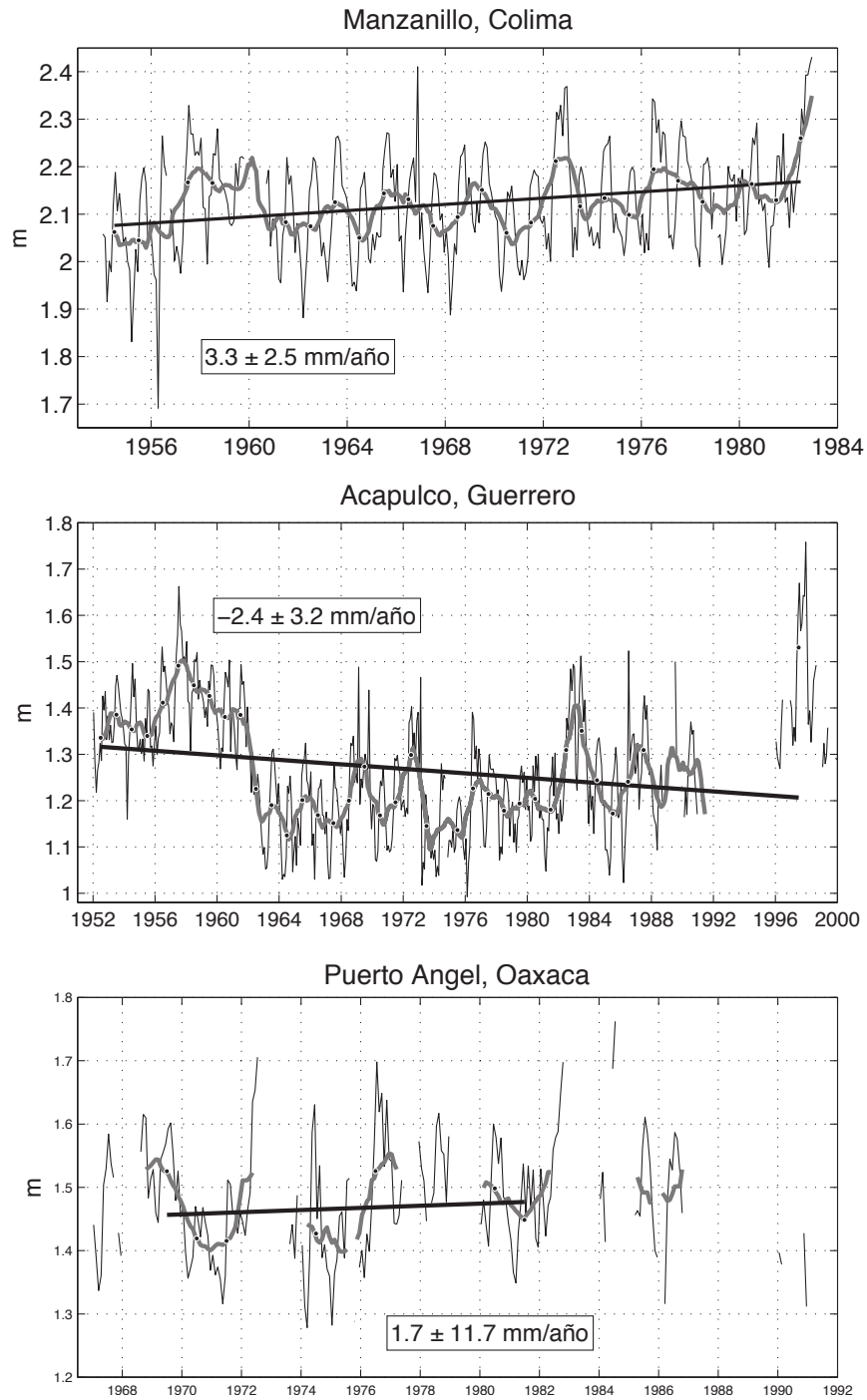


Figura 3 (continuación). Tendencia del nivel del mar en diferentes ciudades costeras de la República Mexicana. En el recuadro se indica la tendencia y su incertidumbre al 95% de confianza.

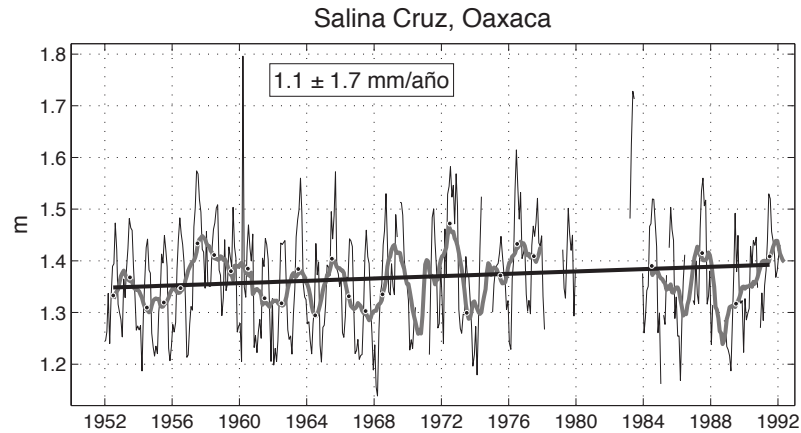


Figura 3 (continuación). Tendencia del nivel del mar en diferentes ciudades costeras de la República Mexicana. En el recuadro se indica la tendencia y su incertidumbre al 95% de confianza.

Tabla 1. Tendencias del nivel del mar para los sitios analizados en el Golfo de México. Se indica también el período en el cual hay datos disponibles.

| Sitio | Tendencia (mm año ⁻¹) | Período | No. de años en el cálculo |
|-----------------------|-----------------------------------|-----------|---------------------------|
| Alvarado, Ver. | 1.9 ± 2.3 | 1955-1981 | 19 |
| Cd. del Carmen, Camp. | 3.4 ± 1.0 | 1956-1990 | 26 |
| Cd. Madero, Tamps. | 9.2 ± 5.1 | 1962-1979 | 15 |
| Coatzacoalcos, Ver. | 2.9 ± 1.5 | 1952-1988 | 22 |
| Progreso, Yuc. | 2.5 ± 1.2 | 1952-1984 | 27 |
| Veracruz, Ver. | 1.9 ± 0.6 | 1952-2003 | 16 |
| Tuxpan, Ver. | 2.8 ± 2.3 | 1958-1989 | 43 |

Tabla 2. Tendencias del nivel del mar para los sitios analizados en el Pacífico. Se indica también el período en el cual hay datos disponibles.

| Sitio | Tendencia (mm año ⁻¹) | Período | No. de años en el cálculo |
|--------------------|-----------------------------------|-----------|---------------------------|
| Acapulco, Gro. | -2.4 ± 3.2 | 1952-1999 | 36 |
| Ensenada, B.C. | 2.7 ± 1.7 | 1956-1992 | 30 |
| La Paz, B.C.S. | 1.0 ± 2.2 | 1952-1991 | 20 |
| Manzanillo, Col. | 3.3 ± 2.5 | 1954-1988 | 25 |
| Mazatlán, Sin. | 1.9 ± 3.3 | 1953-1992 | 19 |
| Puerto Angel, Oax. | 1.7 ± 11.7 | 1967-1990 | 7 |
| Salina Cruz, Oax. | 1.1 ± 1.7 | 1952-1992 | 26 |
| San Carlos, B.C.S. | 16.1 ± 13.2 | 1968-1987 | 8 |
| Topolobampo, Sin. | 3.0 ± 4.3 | 1952-1992 | 19 |
| Guaymas, Son. | 4.2 ± 1.7 | 1951-1991 | 25 |

CICLO ESTACIONAL

Las estaciones analizadas muestran un claro ciclo estacional, tanto en el Golfo de México como en el Océano Pacífico y el Golfo de California. En el Golfo de México se ha encontrado que las variaciones en el nivel del mar en escala estacional están asociadas al cambio en la circulación costera, con niveles máximos en las costas mexicanas durante septiembre y octubre y mínimos en distintos meses del año, observándose principalmente en mayo y julio. También hay una contribución de las variaciones de la presión atmosférica al cambio en el nivel del mar y otra asociada a los cambios en la temperatura superficial del mar (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2003).

En las costas del Pacífico mexicano se ha encontrado que existe una onda costera de Kelvin estacional que tiene asociada una elevación del nivel del mar (Ripa, 1997), que alcanza un máximo en el mes de julio en los sitios del sur, como es el caso de Puerto Ángel, Salina Cruz y Acapulco. Más al norte, en Manzanillo, Mazatlán, Topolobampo y Guaymas, se observan dos máximos, uno en julio y el otro en septiembre, probablemente producto del aumento de la temperatura en la región. En La Paz, en el sur del Golfo de California, y en las costas del Pacífico de la península de Baja California se observa un máximo en septiembre, probablemente asociado con el cambio en la temperatura en las capas superficiales. En el Golfo de California puede contribuir el cambio en la dirección del viento, el cual apila agua en el norte del Golfo durante el verano contribuyendo a la elevación del nivel del mar.

TENDENCIAS EN EL GOLFO DE MÉXICO

Es notorio que en los siete sitios analizados en el Golfo de México se encontró una tendencia de aumento en el nivel del mar. Las series de tiempo muestran variaciones interanuales y de escala decadal que, para ser separadas del cambio producido por el calentamiento global del planeta, es deseable tener series más largas, de varias décadas. Es importante notar que la tendencia de aumento en el nivel del mar en Veracruz, de 1.9 mm año^{-1} , es muy similar a la reportada por el IPCC para el océano mundial lo que sugiere que, en principio, no ha habido movimientos verticales de la corteza terrestre importantes en la región lo cual hace que el sitio sea una buena referencia para comparar con las variaciones en otros sitios.

Los resultados muestran una menor tendencia en Veracruz y Alvarado, con $1.9 \pm 0.6 \text{ mm año}^{-1}$ y $1.8 \pm 2.3 \text{ mm año}^{-1}$ respectivamente. Progreso muestra una tendencia de $2.5 \pm 1.2 \text{ mm año}^{-1}$ y le siguen Cd. del Carmen, Camp., Coatzacoalcos, Ver., y Tuxpan, Ver., con tendencias entre 2.8 y 3.4 mm año^{-1} , mientras que en Cd. Madero, Tamps. la tendencia es mucho mayor con un valor de $9.2 \pm 5.1 \text{ mm año}^{-1}$.

TENDENCIAS EN EL PACÍFICO

En las estaciones del Pacífico mexicano sobresale la tendencia negativa en Acapulco. En las gráficas de la serie de Acapulco es notable el salto en el año de 1962 debido a un movimiento de la corteza terrestre provocado por un doble sismo, el cual fue documentado por

Ortiz *et al.* (2000). Este evento provocó una elevación de la corteza terrestre de 22 cm, con una disminución relativa del nivel medio del mar. En las tendencias previas y posteriores a este evento, se observa un aumento en el nivel medio del mar que se interrumpe con el evento sísmico.

En todas las demás estaciones se observan tendencias positivas en el nivel medio del mar. En el sur de México, en Puerto Ángel y en Salina Cruz, se observan tendencias de 1.7 ± 11.7 mm año⁻¹ y de 1.1 ± 1.7 mm año⁻¹ respectivamente.

En Mazatlán hay un período, entre 1953 y 1975, en que se interrumpió el muestreo y vuelve a haber registros hasta 1989 y 1990. Es notable que entre un período y otro hay un

aparente incremento en el nivel del mar que no parece corresponder con la tendencia observada en el primer período. Se sabe que el sitio de muestreo se modificó, pero habrá que revisar la fecha en que se realizó el cambio y si éste puede ser la causa de dicho incremento.

En Manzanillo, Col. se encontró una tendencia de 3.3 ± 2.5 mm año⁻¹ mientras que en Topolobampo, Sin., se obtuvo una tendencia de 3.0 ± 4.3 mm año⁻¹. En Guaymas, Son., se encontró una tendencia más alta, de 4.2 ± 1.7 mm año⁻¹. En Ensenada, que es una de las series más largas, se encontró una tendencia de 2.7 ± 1.7 mm año⁻¹. La serie de tiempo de San Carlos, BCS., es muy corta y por lo tanto las tendencias encontradas no son significativas.

CONCLUSIONES

Las series de datos del Servicio Mareográfico de la UNAM muestran tendencias de un aumento en el nivel del mar en todos los sitios analizados excepto en Acapulco, Gro., en donde se observa una tendencia negativa. En el Golfo de México los incrementos menores se observan en la región central, en Veracruz y Alvarado, mientras que hacia el sur se observan valores más altos en Cd. del Carmen e intermedios en Progreso. El valor más alto se obtuvo en Ciudad Madero, Tamaulipas.

En el Pacífico sobresale la estación de Acapulco que es el único sitio que presenta una tendencia negativa en la elevación del nivel medio del mar. Esta tendencia se debe al movimiento de la corteza terrestre provocado por los sismos de 1962, previamente documentados. Las tendencias en La Paz, Puerto Ángel y Salina Cruz, son las menores y la mayor se

encontró en Guaymas, Son.; Mazanillo, Mazatlán, Topolobampo y Ensenada muestran tendencias intermedias. La tendencia en San Carlos no es significativa debido a que tiene una incertidumbre muy grande porque su serie es muy corta.

Las tendencias obtenidas en el nivel medio del mar muestran que estas varían regionalmente y que su incertidumbre es del mismo orden que la señal, observándose que en las series más cortas la incertidumbre llega a ser mayor que la señal que se está buscando estimar. Las diferencias en las tendencias se deben, entre otras causas, a movimientos verticales regionales de la corteza terrestre y a fenómenos oceanográficos. Es muy importante continuar con las mediciones de esta variable en los sitios en donde se tienen las series de tiempo más largas para poder mejorar las es-

timaciones en las tendencias de largo plazo y reducir la incertidumbre. En los sitios analizados se están rehabilitando las estaciones mareográficas, por lo que habrá que dar seguimiento a los datos que se vayan generando

para actualizar estas tendencias, las cuales fueron calculadas con datos de mediciones que, en la mayoría de los casos, se interrumpieron en las décadas de los ochentas o noventas.

AGRADECIMIENTOS

Se usaron datos del Servicio Mareográfico Nacional operado por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Este trabajo se realizó con

el apoyo de los proyectos Inter-American Institute for Global Change Research CRN II# 2048 y PAPIIT IN 120408.

LITERATURA CITADA

- Ortiz, M., S. K. Singh, V. Kostoglodov, y J. Pacheco, 2000. 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. *Geofis. Int.*, 39(4): 337-348.
- Ripa, P., 1997. Toward a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27(5): 597-614.
- Rosenzweig, C., G. Casassa, D.J. Karoly, A. Imeson, C. Liu, A. Menzel, S. Rawlins, T.L. Root, B. Seguin, P. Tryjanowski, 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. p. 79-131. In: M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds.). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Zavala-Hidalgo, J., S. L. Morey, y J. J. O'Brien, 2003. Seasonal circulation on the western shelf of the Gulf of Mexico using a high-resolution numerical model. *J. Geophys. Res.*, 108(C12), 3389, doi:10.1029/2003JC001879,2003.

