

TENDENCIAS DEL NIVEL DEL MAR EN LAS COSTAS DEL CARIBE MEXICANO

Jennifer D. Ruiz-Ramírez, MC.

Universidad de Quintana Roo, Quintana Roo

Jorge I. Euán-Ávila PhD

Edgar Torres-Irineo PhD

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-Unidad Mérida, México

Abstract

Sea level trends from four stations of Quintana Roo, Mexican Caribbean are presented. Time series data were obtained from the Red Mareográfica Institucional of the Secretaría of Marina, Mexico Navy and from the Servicio Mareográfico Nacional of the Universidad Nacional Autónoma of México; further regional time series data were collected jointly from the TOPEX / Poseidon, Jason-1 and OSTM/Jason-2 altimeters on the Caribbean Sea over a period of 20 years. For each gage, daily data were used and analyzed by setting the trend line. The trend for each station is positive: Isla Cozumel with 0.3 mm yr^{-1} , Isla Mujeres with 3.6 mm yr^{-1} , Mahahual with 1.2 mm yr^{-1} and Puerto Morelos with 1.4 mm yr^{-1} . The overall trend for the gauges is positive, with 1.6 mm yr^{-1} , less than the trend depicted by the altimeters on the Caribbean region (2.0 mm yr^{-1}). We concluded that locally, the increase is not homogeneous and regional trends variations are not only positive, in certain periods are negative, this was yielded with longer time scales, as observed with radars. This coincides with the results from the IPCC which show that these increases are not similar throughout the world and it is a priority to know the change rates and individual factors affecting in each region, in order to effectively address the risks associated with sea level rising.

Keywords: Altimeters, Mexican Caribbean, sea level rise, tide gauges

Resumen

Se presentan las tendencias en el nivel del mar en cuatro estaciones de Quintana Roo, Caribe mexicano. Los datos provienen de las series obtenidas por la Red Mareográfica Institucional de la Secretaría de Marina, Armada de México y el Servicio Mareográfico Nacional de la Universidad Nacional Autónoma de México; además se consultó la serie de datos

regionales recabados en conjunto, por los altímetros TOPEX/Poseidón, Jason-1 y OSTM/Jason-2 para el Mar Caribe en un periodo de 20 años. Por mareógrafo, se utilizaron los datos diarios y se analizó la línea de tendencia de las series de tiempo. En cada estación, las tendencias son positivas: Isla Cozumel con $0.348 \text{ mm año}^{-1}$, Isla Mujeres con $3.670 \text{ mm año}^{-1}$, Mahahual con $1.247 \text{ mm año}^{-1}$ y Puerto Morelos con $1.471 \text{ mm año}^{-1}$. En promedio, la tendencia de los mareógrafos es positiva, con $1.684 \text{ mm año}^{-1}$, similar a la tendencia mostrada por los altímetros para la región del Caribe (2.0 mm año^{-1}). Se puede concluir que a nivel local, el incremento no es homogéneo y que a nivel regional las variaciones en la tendencia no sólo son positivas, en ciertos periodos se comportan de forma negativa, siendo esto perceptible a escalas de tiempo mayores, como fue observado en los radares; esto coincide con los resultados del IPCC que demuestran que este incremento no es similar en todo el mundo y que es prioritario conocer las tasas y factores particulares en cada región, para enfrentar los riesgos asociados al incremento del nivel del mar.

Palabras clave: Altímetros, Caribe Mexicano, incremento en el nivel del mar, mareógrafos

Introducción:

El incremento del nivel del mar es un tema que ha sido abordado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), el cual ha mostrado especial interés en las zonas costeras e islas, debido a la importancia global en términos de valores ecológicos y socioeconómicos. A nivel mundial se ha generado interés para implementar estrategias encaminadas a la mejor planeación y manejo de las áreas costeras y sus recursos (pesquerías, acuicultura, turismo, extracción de hidrocarburos y minerales, etc.), porque se estima que más de la mitad de la población mundial se ubica dentro de una franja de 100 km de costa y se pronostica que para el año 2025, el 75% de la misma podría establecerse en las zonas costeras, por lo que se requiere prevenir su degradación y su vulnerabilidad a los potenciales impactos del cambio climático aunado al incremento del nivel del mar (Bijlsma, *et al.*, 1995; IPCC, 2012; SEMARNAT, 2006). Las mediciones de la elevación del nivel del mar y de sus oscilaciones han sido detectadas con datos mareográficos, indispensables para estimar el incremento del nivel del mar en una región. Tan sólo en E.U.A., la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) cuenta con 3,000 estaciones, que registran los cambios en el nivel del mar, poseen datos históricos y en tiempo real de sus mediciones (NOAA, 2013). Lo anterior indica la importancia y necesidad de conocer y estimar el aumento del nivel del mar debido a las consecuencias que puede ocasionar.

Frank, *et al.* (2011) realizaron un estudio en las costas de Alemania para determinar la elevación promedio del mar en el Mar del Norte, el cual a partir de datos mareográficos en un periodo de 50 a 166 años de registros en 13 estaciones demostraron que han habido periodos de aceleración en el incremento del nivel del mar (SLR sea level rise) y que éste es progresivo y positivo.

En México, los primeros estudios del nivel del mar fueron con datos mareográficos en la costa del estado de Guerrero para verificar anomalías, debido a fuertes sismos que provocaron a su vez maremotos y que fueron registrados en los mareógrafos; estas anomalías fueron revisadas en los periodos 1952-1960 y 1963-1966 (Grivel, 1967). El país posee 11,122 km de longitud de línea costera, donde habita el 15% de la población, pero en esa franja costera se realiza una serie de actividades económicas, donde el turismo ocupa el 45% y la extracción de petróleo y gas es la principal fuente de divisas para el país (SEMARNAT, 2006), por lo que el monitoreo del nivel del mar debe ser una prioridad. Zavala-Hidalgo, *et al.* 2010 analizaron la tendencia del nivel del mar con datos mareográficos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), que incluyeron 10 sitios del litoral del Pacífico y siete sitios en el Golfo de México, dando como resultado un incremento positivo. Sin embargo, estos autores no incluyeron el litoral del caribe mexicano en su estudio.

Recientemente, para analizar la tendencia del nivel del mar, es frecuente la combinación de datos mareográficos y datos registrados por altímetros. Cazenave y Nerem (2004) presentaron las causas y consecuencias a nivel global del cambio en el nivel del mar, utilizando datos mareográficos y datos de los altímetros TOPEX/Poseidón y Jason-1 (1993-2003), considerando los resultados del Tercer Reporte del IPCC dedicado al cambio en el nivel del mar. En la actualidad, globalmente se tienen reportes en tiempo real del incremento del nivel del mar contrastando los datos mareográficos y altimétricos ofrecidos por el Laboratorio de Altimetría Satelital de la NOAA y por el Centro de Oceanografía Física (PODAAC) de la NASA, ambas agencias han reportado un incremento global del nivel del mar de 3.2 mm año^{-1} (NASA, NOAA, 2014). Pero, el IPCC (2013) también señala que los modelos climáticos, los datos satelitales y las observaciones hidrográficas muestran que el nivel del mar no sube uniformemente en todo el mundo. En algunas regiones, las tasas son muy superiores al promedio mundial, mientras que en otras regiones el nivel del mar disminuye.

Contribuyendo con esta dinámica, este estudio se enfoca en el Caribe mexicano (Quintana Roo) que cuenta con 1,176 km de litoral, lo que representa el 10.6% del total nacional (INEGI, 2012). La costa consiste de una baja pendiente en la llanura costera, su superficie forma parte de la provincia Península de Yucatán. Quintana Roo tiene la mayor superficie de

selvas en el país y los manglares coexisten con los arrecifes de coral, los ceibadales, las lagunas costeras, las playas y la vegetación de duna costera (Hirales-Cota, 2010; Vázquez Botello, 2008). Por su posición geográfica, Quintana Roo tiene acceso directo a los mercados de la Costa Atlántica de E.U., de la Cuenca del Golfo de México, del Caribe y de Centro y Sur de América, sus riquezas naturales y el patrimonio cultural, en conjunto con la infraestructura y los servicios que incluyen, permitió que en el 2009, se captaran más de 6 millones de turistas, incluidos 3 millones de visitantes en destinos de cruceros, ya que se reciben más de 1,250 cruceros al año y cuenta con los dos destinos de cruceros más importantes del mundo; lo cual genera un mercado de consumo superior a los 1,000 millones de dólares. La entidad aporta el 33% del total de divisas que ingresan al país, por medio del sector turismo, lo cual representa un fuerte impacto antropogénico en las zonas costeras, visitadas principalmente por los turistas (SEDE, 2011).

El objetivo de este estudio es estimar la tasa de incremento del nivel del mar en el Caribe Mexicano y mostrar la tendencia de éste a partir de datos obtenidos de cuatro mareógrafos de la Red Mareográfica institucional de la Secretaría de Marina, Armada de México y del Servicio Mareográfico Nacional de la Universidad Nacional Autónoma de México, instalados en cuatro sitios del litoral del Caribe mexicano. A su vez, se incluyen los datos de mediciones del nivel del mar, obtenidos de los altímetros TOPEX/Poseidón, Jasón-1 y OSTM/Jason-2, con una serie de tiempo de 20 años (1993-2013) para la región del Mar Caribe.

Métodos

En México, se ha analizado la tendencia del nivel del mar con datos mareográficos (Zavala-Hidalgo, *et al.*, 2010), sin embargo no se ha analizado en conjunto con datos de altímetros. Por lo que en el presente estudio se incluyen ambos métodos para obtener una tendencia más precisa en Quintana Roo. Las mediciones de la elevación del nivel del mar y de los cambios en éste, se obtuvieron de cuatro mareógrafos en el estado: Isla Cozumel (20°30'26" N y 86°57' 22" W), Isla Mujeres (21° 15' 09" N y 86° 44' 42" W), Mahahual (18° 43' 53" N y 87° 41' 16" W) y Puerto Morelos (20° 52.1' N y 86° 52.0' W) (Fig. 1). Los datos de los tres primeros mareógrafos fueron obtenidos de la Red Mareográfica Institucional de la Secretaría de Marina, Armada de México (www.oceanografia.semar.gob.mx/); con datos de 3 a 4 registros diarios del 2008 al 2012; los datos del último mareógrafo fueron obtenidos del Servicio Mareográfico Nacional de la UNAM (www.mareografico.unam.mx), con el mismo número de registros, pero del 2007 al 2011. Las mediciones del nivel del mar para la región del Mar Caribe se obtuvieron de 3 altímetros: TOPEX/Poseidón (1993-2001), Jason-1 (2001-2008) y OSTM/Jason-2 (2008 a la fecha) (www.sealevel).

colorado.edu/content/regional-sea-level-time-series). La información de estos altímetros fue combinada para tener una serie de tiempo. Estos altímetros monitorean el nivel del mar global, sus datos se registran cada 10 días para el mismo sitio, con una serie de tiempo de 20 años, pero se pueden manejar por regiones. Cabe mencionar que se seleccionaron los datos regionales para el Mar Caribe para una mejor estimación del nivel del mar y su comparación con los datos mareográficos locales.

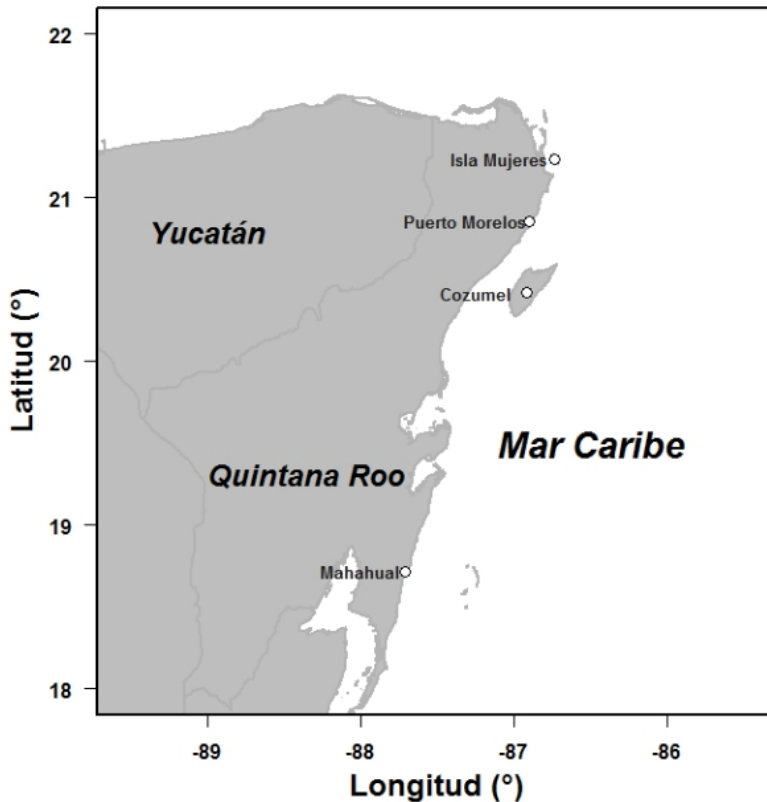


Fig. 1. Sitios en el Caribe mexicano con estaciones mareográficas.

Resultados y Discusión

Tendencia regional (Mar Caribe)

La serie de tiempo de los altímetros (TOPEX/Poseidón, 1993-2001; Jason-1, 2001-2008; y OSTM/Jason-2, 2008-a la fecha) que corresponden al periodo 1993-2013 muestra un incremento del nivel del mar positivo para el Mar Caribe, con una tendencia de 2.0 mm año^{-1} , menor al promedio mundial de 3.2 mm año^{-1} (Fig. 2).

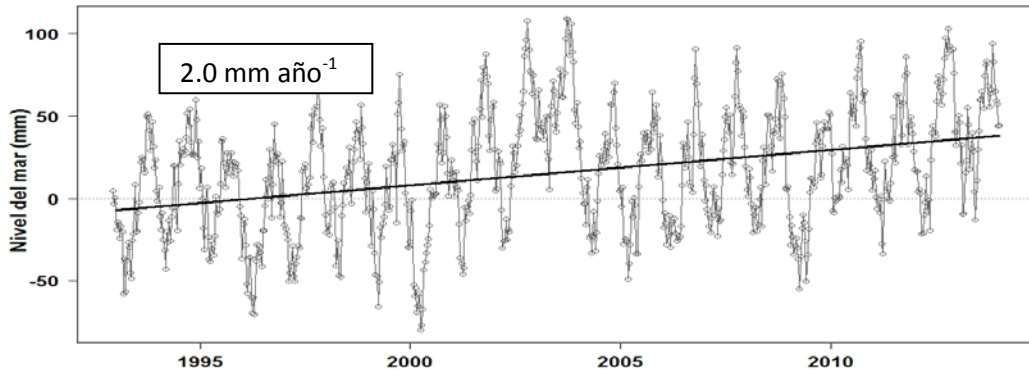


Fig. 2. Tendencia del nivel del mar para el Mar Caribe.

Esta tendencia no ha sido uniforme en el transcurso de este periodo, para el quinquenio 1993-1997 se observó una tendencia positiva de 1.5 mm año^{-1} ; casi 7 veces menor que el segundo quinquenio 1998-2002 (10.4 mm año^{-1}). En el tercer quinquenio 2003-2007, se observó una tendencia negativa, con -4.9 mm año^{-1} ; y para el cuarto y último quinquenio 2008-2013, se observó una tendencia positiva (al igual que las dos primeras) de 8.0 mm año^{-1} (Fig. 3). Lo anterior, concuerda con lo mencionado por el IPCC, que existen variaciones graduales o continuas, además de variaciones temporales, como el caso de oscilaciones a mayor escala de tiempo.

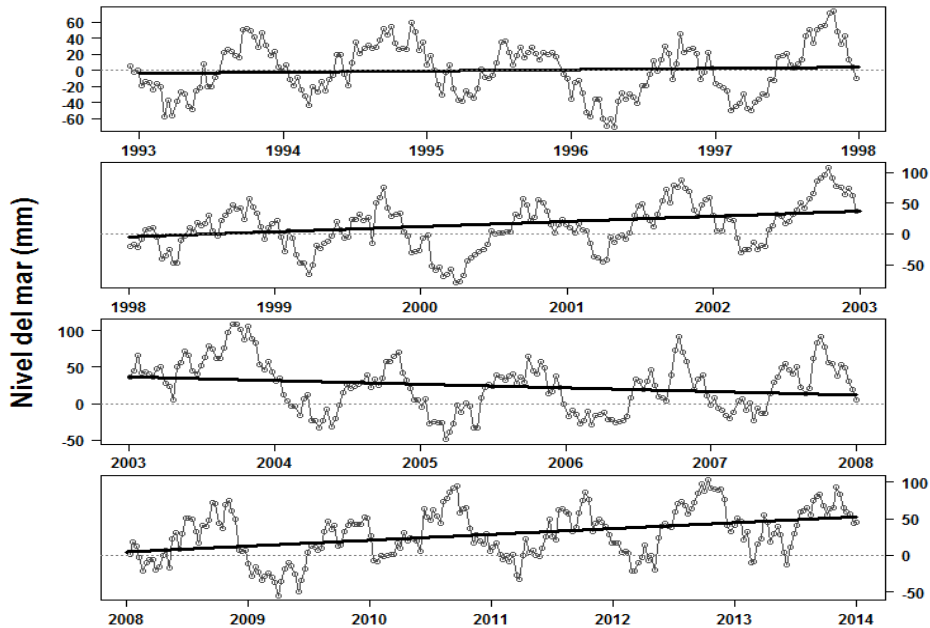


Fig. 3. Tendencia quinquenal promedio para el Mar Caribe

Tendencia local (Caribe mexicano)

Los registros por cada estación presentan variaciones (todas positivas), siendo la mayor la de Isla Mujeres, con 3.6 mm año⁻¹ y la menor de Isla Cozumel, con 0.3 mm año⁻¹; Mahahual registra una tendencia de 1.2 mm año⁻¹, similar a la de Puerto Morelos, con 1.4 mm año⁻¹. La tendencia quinquenal promedio de los mareógrafos es positiva, con 1.6 mm año⁻¹ (Fig. 4, Tabla 1).

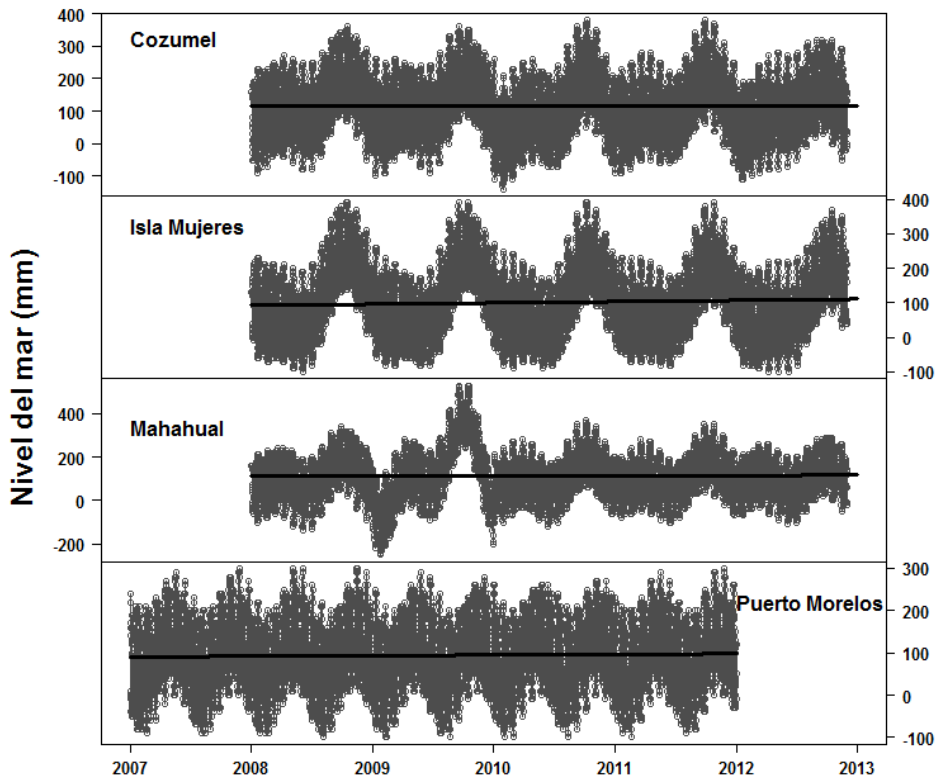


Fig. 4. Tendencia del nivel del mar para el Caribe Mexicano

Tabla 1. Tendencias del nivel del mar para los sitios en el Caribe Mexicano

Sitio	Tendencia (mm año ⁻¹)	Período
Isla Cozumel	0.3	2008-2012
Isla Mujeres	3.6	2008-2012
Mahahual	1.2	2008-2012
Puerto Morelos	1.4	2007-2011

Es importante señalar que el aumento en el nivel del mar no es similar a lo largo de las costas de México, Zavala, *et al.* (2010) señalaron que la tendencia en el Pacífico y el Golfo de México es positiva, y aunado al caribe mexicano, se comprueba que la tendencia es positiva para todo el

litoral del país, pero el ritmo del incremento difiere para éste último, ya que tanto para el Golfo de México como para el Pacífico, es el doble y si se compara con la tendencia mundial (3.2 mm año^{-1}), ambos están por encima del promedio (Tabla 2).

Tabla 2. Tendencias del nivel del mar para las costas mexicanas

Sitios	Tendencia (mm año ⁻¹)	No. de sitios
Pacífico	3.8*	10
Golfo de México	3.5	7
Caribe Mexicano	1.6	4

*No se incluye la tendencia del sitio Acapulco, que fue negativa debido a subsidencia en la corteza terrestre.

Como se puede observar, la tendencia en el aumento del nivel del mar para el Caribe Mexicano, corresponde casi la mitad del promedio mundial, y se encuentra debajo del promedio para el Mar Caribe. Sin embargo, en las costas de Honduras, los mareógrafos reportan una tendencia de 9.2 mm año^{-1} (F. Secaira, comunicación personal, 6 de septiembre de 2013), por ello la importancia de monitorear las costas con los instrumentos disponibles para precisar los potenciales impactos debido al aumento del nivel del mar (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación de las tendencias del nivel del mar a tres escalas

Escala	Tendencia (mm año ⁻¹)	Instrumento
Mundial	3.2	Mareógrafo y Altímetro
Regional (Mar Caribe)	2.0	Altímetro
Local (Caribe Mexicano)	1.6	Mareógrafo

El IPCC (2013) menciona que el nivel del mar se elevó en unos 120 m durante los milenios que siguieron al final del último período glacial (hace unos 21,000 años) y se estabilizó hace unos 2,000 ó 3,000 años. Los registros instrumentales de las variaciones del nivel del mar comenzaron durante ese siglo XIX y las estimaciones del siglo XX muestran que el nivel medio mundial del mar se elevó a una tasa de 1.7 mm año^{-1} . Adicionalmente, las observaciones vía satélite, disponibles desde principios del decenio de 1990, brindan datos más precisos sobre el nivel del mar con una cobertura casi mundial. Estos datos altimétricos señalan que el nivel del mar se ha elevado a un ritmo de unos 3 mm año^{-1} , superior al promedio observado durante la primera mitad del siglo. Al compararlo con las mediciones de la marea en las costas confirman estos registros e indican que en decenios anteriores hubieron tasas similares.

El IPCC (2013) también señala que los modelos climáticos, los datos satelitales y las observaciones hidrográficas muestran que el nivel del mar no

sube uniformemente en todo el mundo. En algunas regiones, las tasas son muy superiores al promedio mundial, mientras que en otras regiones el nivel del mar disminuye. A partir de observaciones hidrográficas, la variabilidad espacial en las tasas de elevación del nivel del mar se debe a cambios no uniformes en la temperatura y la salinidad y está relacionado con los cambios en la circulación oceánica. Otros estudios (Zavala, *et al.*, 2010) revelan que el nivel del mar puede estar directamente relacionado con la elevación/subsidencia en la corteza terrestre, resultando en una diferencia relativa con respecto a los registros de variación en el nivel del mar en regiones relativamente cercanas.

Se pronostica que el nivel del mar mundial se elevará en el siglo XXI a una velocidad mayor que durante el período 1961-2003. En el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones del IPCC (IE-EE), en el escenario A1B para mediados del decenio de 2090, por ejemplo, el nivel del mar alcanzará de 0,22 a 0,44 m por encima de los niveles de 1990, con elevaciones anuales de unos 4 mm año⁻¹. Como en el pasado, los cambios futuros en el nivel del mar no serán geográficamente uniformes, con cambios regionales del nivel del mar con variaciones en el rango de unos ±0,15 m dentro de la media, teniendo en cuenta una proyección típica de modelos (IPCC, 2013).

El escenario para 1 m de incremento del nivel del mar para fines del siglo XXI en Quintana Roo, afectaría una superficie de 4, 011 km² (un 9.47% de superficie relativa), representa una pérdida neta de 73.9 % en extensión de humedales. La amenaza crítica para la región es el aumento en frecuencia e intensidad de los huracanes, que afectará a los ecosistemas costeros, impactará las construcciones hoteleras, centros turísticos, viviendas y sobre todo a la población, como el caso del huracán Wilma (en el año 2005) con pérdidas de más de \$10 mil millones de dólares, propiciando fuertes pérdidas en la economía regional y en ocasiones pérdidas de vidas humanas (Vázquez Botello, 2008).

Conclusión

El incremento del nivel del mar es un tema preocupante en la actualidad, por lo que es necesario utilizar todas las herramientas y dispositivos disponibles para su análisis.

La tendencia del incremento del nivel del mar en México es positiva, pero ésta es desigual en sus costas. En la costa del Pacífico y el Golfo de México sus tasas son superiores al promedio global, por lo que las medidas de adaptación que se tomen deben ser diferentes a las del Caribe mexicano, que aunque su incremento es menor al promedio mundial, su topografía es relativamente plana.

Para el estado de Quintana Roo es prioritario conocer la tendencia y los cambios asociados al incremento del nivel del mar, ya que su principal actividad económica es el turismo de playa. En consecuencia se ha propiciado el incremento de la población en sus ciudades y comunidades que están establecidas en las costas por la diversificación e intensificación de sus actividades socioeconómicas, incrementando la vulnerabilidad natural de los ecosistemas y social de sus habitantes.

Es necesario el estudio multidisciplinario del nivel del mar para explicar las tendencias, asociaciones y comportamiento del mismo, para poder diagnosticar y modelar escenarios de su incremento, conociendo las tasas como lo menciona el IPCC, por lo que las estimadas en este estudio servirían de base para estudios más complejos, incluyendo los fenómenos que están directa o indirectamente relacionados con el nivel del mar, con el fin de representar lo mejor posible las situaciones actuales y crear modelos más coherentes, bajo diferentes escenarios que prevengan estudios de caso en el futuro.

Agradecimientos

La primera autora agradece a la Universidad de Quintana Roo (UQROO) por la gestión de una beca PROMEP para realizar los estudios de doctorado en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV- Unidad Mérida). A la Red Mareográfica Institucional de la Secretaría de Marina, Armada de México y al Servicio Mareográfico Nacional de la Universidad Nacional Autónoma de México, por los registros que sirvieron de insumos a este trabajo, al igual que la Universidad de Colorado (USA) por la serie de tiempo y registros aportados por los altímetros TOPEX/Poseidón, Jason-1 y OSTM/Jason-2.

Referencias:

- Bijlsma, L., C.N. Ehler, R.J.T. Klein, S.M. Kulshrestha, R.F. McLean, N. Mimura, R.J. Nicholls, L.A. Nurse, H. Pérez Nieto, E.Z. Stakhiv, R.K. Turner, and R.A. Warrick. 1995. Coastal Zones and Small Islands. *In* Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Robert T. Watson, Marufu C. Zinyowera, and Richard H. Moss. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 289-324.
- Cazenave, A., and R. S. Nerem. 2004. Present-day sea level change: Observations and causes, *Rev. Geophys.*, 42, RG3001, doi:10.1029/2003 RG000139.
- Frank, T.; Wahl, T. and Jensen, J., 2011. Mean Sea Level and Tidal Analysis at the German North Sea Coastline. *Journal of Coastal Research* (Proceedings

of the 11th International Coastal Symposium), Szczecin, Poland, Special Issue 64: 501-505. ISSN 0749-0208

Grivel, F. 1967. Anomalías en el nivel medio del mar en Acapulco, Gro., México. *Geofísica Internacional*. 7(2): 53-61.

Hirales-Cota, M., J. Espinoza-Avalos, B. Schmook, A. Ruiz-Luna, R. Ramos-Reyes. 2010. Agentes de deforestación de manglar en Mahahual-Xcalak, Quintana Roo, sureste de México. *Ciencias Marinas*. 36(2): 147-159.

SEDE, 2011. Quintana Roo: Estado de Inversión por excelencia. Gobierno de Quintana Roo. México. 22 p.

SEMARNAT, 2006. Política Ambiental Nacional para el Desarrollo Sustentable de Océanos y Costas de México: Estrategias para su conservación y uso sustentable. Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental. Dirección General de Política Ambiental Integración Regional y Sectorial. Dirección de Integración Regional. México, D.F. 86 p.

Vázquez Botello, A. 2008. Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos. Informe final. INE-UNAM-SEMARNAT. 121 p.

Zavala-Hidalgo, J., R. de Buen Kalman, R. Romero-Centeno, y F. Hernández Maguey, 2010. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas, p. 249-268. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.

Referencias electrónicas:

INEGI. 2012. <http://www.inergi.org.mx/>

IPCC. 2012. www.ipcc.ch/organization/organization_history.shtml

IPCC. 2013. www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-5-1.html

NASA. 2014. http://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/dataset/MERGED_TP_J1_OSTM_OST_GMSL_ASCII_V2

NOAA. 2013. www.tidesandcurrents.noaa.gov/station_index.shtml?

NOAA. 2014. <http://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/>

Red Mareográfica Institucional, Secretaría de Marina, Armada de México. www.oceanografia.semar.gob.mx/

Servicio Mareográfico Nacional, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica. www.mareografico.unam.mx

University of Colorado, U.S.A. – Sea Level Research Group. Sea Level Time Series of Caribbean Sea.

<http://sealevel.colorado.edu/content/regional-sea-level-time-series>