

TENDENCIAS DEL NIVEL DEL MAR PARA LA COSTA CENTRAL DEL GOLFO DE MÉXICO 1999-2018

Karen Miriel TAPIA FLORES¹, Alberto UTRERA ZÁRATE², Adalberto TEJEDA MARTÍNEZ¹

¹*Licenciatura en Ciencias Atmosféricas. Universidad Veracruzana, México*

²*Instituto Oceanográfico del Golfo y Mar Caribe. Universidad Naval, México*

miriel.tapi@gmail.com, autreraz@gmail.com, atejeda@uv.mx

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el comportamiento actual y a futuro en el litoral centro del golfo de México para determinar si presenta un aumento similar al identificado a nivel global. Se analizaron datos mareográficos de tres estaciones mexicanas pertenecientes a la Red Mareográfica de la Secretaría de Marina: Coatzacoalcos, Frontera y Veracruz. Con datos medios anuales se construyeron gráficas de evolución temporal, a las cuales se les asoció una línea de tendencia a través del método de mínimos cuadrados. Los resultados muestran una tendencia global media negativa en la región, con una magnitud de $-1,86 \text{ mm año}^{-1}$ en el periodo 1999 a 2018. El aumento medio comprendido en la primera década del periodo es $3,6 \text{ mm año}^{-1}$; en la segunda década se observó una disminución de aproximadamente $-1,26 \text{ mm año}^{-1}$. Este comportamiento negativo identificado en la costa central del golfo de México puede obedecer a influencias de eventos meteorológicos de mesoescala, movimientos verticales continentales o episodios del fenómeno de La Niña. Finalmente, haciendo uso de extrapolaciones, se construyeron predicciones del comportamiento del nivel del mar para comparar el desarrollo de esta variable: las líneas resultantes en este trabajo subestiman el aumento en el nivel del mar en la región.

Palabras clave: amenazas costeras, ciclos de marea, expansión térmica oceánica, mareógrafos, predicciones de nivel del mar

ABSTRACT

To determine if an increase exists in the national shoreline, we evaluated the current and projected nature of sea level in the Gulf of Mexico. Three tide gauge stations located on the Gulf of Mexico's central coast were analyzed in this paper: Coatzacoalcos, Frontera, and Veracruz. Based on average annual records, we build graphs of the temporal evolution of sea level. For each of these plots, the trend lines were fitted using the least-squares method. The resultant global trend in the region was downward. From the 1999 to 2018 period, the slope has a $-1,86 \text{ mm per year}$ magnitude. The first decade —1999 to 2010— presents a rate of $3,6 \text{ mm per year}$; in the second decade —2011 to 2018—, the sea-level decreases roughly by $-1,26 \text{ mm per year}$. The negative behavior identified in the Gulf of Mexico central coast may obey a variety of external influences such as mesoscale events, vertical continental movements, or episodes of the La Niña phenomenon. Finally, through extrapolations,

predictions of the behavior of the sea level were constructed to compare the evolution of this variable: the resulting lines in this work underestimate the rise in sea level in the region.

Keywords: coastal threats, tidal cycles, ocean thermal expansion, tide gauge, sea level predictions

1. INTRODUCCIÓN

Los eventos hidrometeorológicos y climáticos en nuestra atmósfera son resultado de la interacción de más de una esfera en el planeta Tierra. De todas las interacciones con la atmósfera, probablemente la más significativa sea precisamente la interacción océano-atmósfera. Encargado de proveer humedad, transportar momento, energía y almacenar calor, el océano cubre el 71% del planeta, desempeñando un papel clave en la mayoría de los fenómenos que ocurren en la atmósfera terrestre (IPCC, 2019).

Múltiples estudios han sido dedicados a identificar los principales impactos que el calentamiento global tiene en las aguas oceánicas. Entre los efectos más importantes destacan el aumento de la temperatura de la capa superficial, la acidificación del océano, la pérdida de cobertura de hielo Ártico y Antártico, la disminución en la extensión del mar de hielo, el desbalance en el contenido de oxígeno en las profundidades, y el aumento en el nivel medio del mar global (Cazenave y Cozannet, 2014). De todos los anteriores, la elevación en el nivel medio del mar es posiblemente el efecto que representa la amenaza más preocupante y un peligro potencial para la población asentada en zonas costeras (McGranahan et al., 2007).

Cuando hablamos del nivel del mar estamos refiriéndonos a la altura media de la superficie del océano entre la marea alta y baja. Los cambios en las mareas y el oleaje con el tiempo, se promedian para determinar un nivel de agua estacionaria que se puede utilizar para identificar si el nivel del mar ha cambiado y también la altura del terreno sobre el nivel del mar (British Geological Survey, s.f.). A través de esta y otras variables oceanográficas, fue posible para los científicos identificar tendencias —por lo general positivas— en el comportamiento de la altura oceánica a distintas escalas temporales y espaciales (IPCC, 2021).

Este aumento observado, a nivel local puede atribuirse a una miríada de fenómenos, desde movimientos continentales, hasta la presencia o ausencia de El Niño; a nivel global, la situación es más compleja. Señalar categóricamente una sola causa resulta intrincado, sin embargo, se considera altamente probable que desde 1971 la influencia humana sea la causa principal de esta elevación en el nivel medio del mar (IPCC, 2021).

En el reporte especial del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2019) sobre el océano y la criósfera, se estableció un valor medio de 0,16 m de aumento en el nivel del mar global en el periodo de 1902 a 2015, y una tendencia global media de 3,6 mm año⁻¹ considerando el periodo de 2006 a 2015. De acuerdo con el sexto reporte de evaluación del IPCC (2021), se ha observado un aumento en el nivel medio del mar global de aproximadamente 0,20 m durante el periodo de 1901 a 2018, y una tendencia actualizada del nivel medio del mar de 3,7 mm año⁻¹. Algunos

escenarios futuros estiman una elevación de entre 0,30 y 2 m hacia 2200 dependiendo el manejo de emisiones de gases de efecto invernadero.

En México los estudios relacionados con los cambios en el nivel medio del mar, al igual que la mayoría de estudios a nivel global, concluyen una tendencia positiva en el nivel del mar de la región. Zavala-Hidalgo et al. (2011) identificó una tendencia positiva tanto en la cuenca del Pacífico como en la del golfo de México. De manera general, se estableció que la tendencia en los litorales Pacífico y Atlántico mexicanos es positiva, pero irregular. Ruíz-Ramírez et al. (2014) encontraron que el nivel del mar en México aumenta de manera global; el litoral del golfo y el Pacífico aumentan a una razón mayor (3,8 y 3,5 mm año⁻¹, respectivamente), mientras que el Caribe mexicano tiene una razón de aumento menor (1,6 mm año⁻¹) respecto a la media global considerada en el estudio.

Con estos antecedentes, al analizar series de tiempo de nivel del mar para puntos centrales en el golfo de México se puede esperar una tendencia positiva cuya magnitud sea consistente con los valores establecidos por Ruíz-Ramírez et al. (2014) y Zavala-Hidalgo et al. (2011) y a su vez, con la media global establecida por el IPCC (2019, 2021). De acuerdo con varios autores, que incluyen a Conde-Álvarez y Palma Grayeb (2006) el aumento en el nivel medio del mar representa un riesgo importante para los asentamientos humanos ubicados en el litoral del golfo de México. El análisis y caracterización de la llanura efectiva, así como una evaluación de las zonas más vulnerables y los estudios de análisis de datos mareográficos, son fundamentales para los estados costeros. En este contexto, se determinó el litoral del golfo de México como región de estudio por su importancia nacional y local, para fortalecer las medidas de mitigación y adaptación ante uno de los riesgos asociados al calentamiento global más potencialmente impactantes para las poblaciones costeras de la zona.

A través del cálculo de ciclos diarios, ciclos anuales y la construcción de series de tiempo de valores medios anuales se caracterizó el comportamiento a pequeña escala temporal del nivel del mar. A través de estimaciones futuras se caracterizó el comportamiento a gran escala temporal del nivel del mar en la región.

2. MÉTODOS

Para estimar valores de tendencias del nivel del mar en el litoral del golfo de México, primero se caracterizó la marea utilizando datos mareográficos de la Red Mareográfica Nacional de la Secretaría de Marina. Este trabajo se realizó con los registros horarios históricos de tres estaciones instaladas en el litoral del golfo: Coatzacoalcos, Veracruz (18°09' N, -94°26' W); Frontera, Tabasco (18°32' N, -92°38' W); y Veracruz, Veracruz (19°12' N, -96°08' W) (Figura 1). En adelante, estas tres estaciones serán referidas como “costa central del golfo de México”.

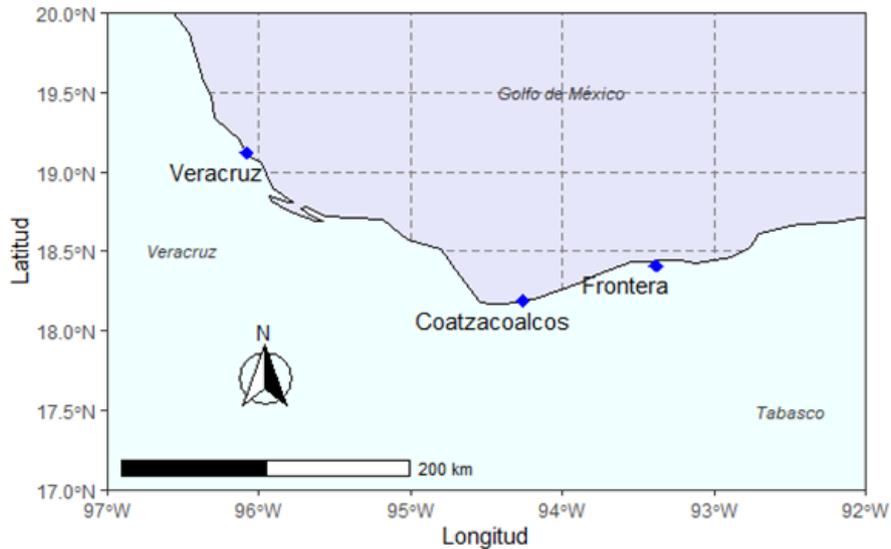


Fig. 1: Costa central del golfo de México. Fuente: Original.

Para los tres sitios analizados fueron construidas series de evolución temporal para los años disponibles en cada base (1999 a 2018 en Frontera, y 2000 a 2018 en Coahuila y Veracruz), promediando los valores para un mismo año en cada estación —bases de valores medios anuales—. De manera general, las estaciones presentan porcentajes relativamente altos de datos faltantes, especialmente la estación de Coahuila, con solo 55% de datos disponibles. Frontera fue la estación más completa y la única en presentar un año completo sin datos faltantes (2002). Posteriormente, cada serie de evolución temporal fue representada en una gráfica en función del año y nivel del mar —metros—. A esta gráfica se le ajustó una línea de tendencia a través del método de regresión lineal por mínimos cuadrados para describir su comportamiento. Para cada valor de tendencia fue calculado un intervalo de incertidumbre, definida a partir del trabajo de Zavala-Hidalgo et al. (2011) como el producto del valor crítico y el error típico (ET):

$$ET = \frac{\sigma}{\sqrt{|n|}}$$

Donde σ es la desviación estándar y n el tamaño de la serie de datos horarios. El valor crítico se calculó con un nivel de significancia de 0.01 (1%) y con $n-2$ grados de libertad. Los cálculos descritos, así como todos los productos presentados en este trabajo fueron realizados con apoyo del software Rstudio (Rstudio, 2018).

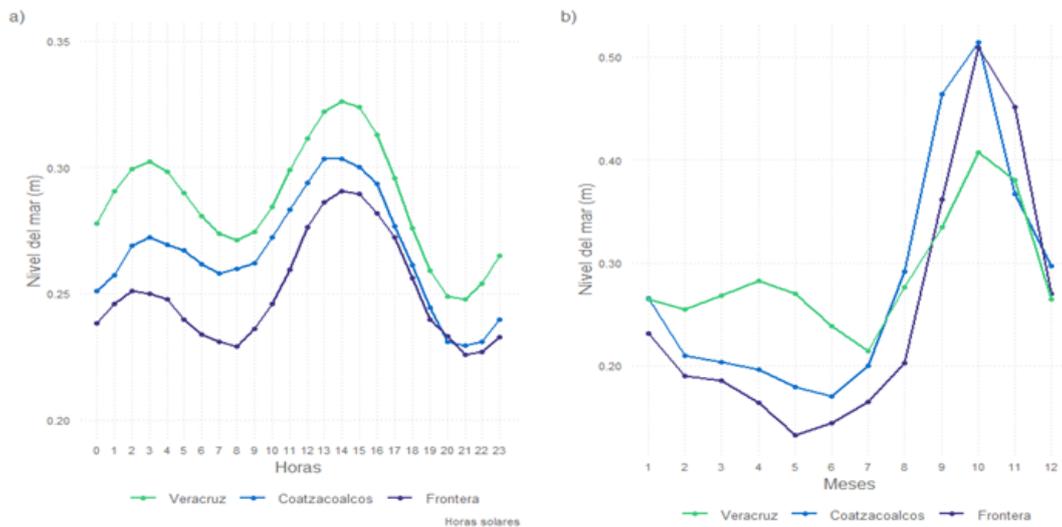
Al presentarse años enteros con falta de datos, en este estudio se calcularon tres tipos de tendencias distintas: la tendencia global que considera a las series de tiempo como un solo segmento, la tendencia segmentada que se calcula para cada periodo ininterrumpido de datos y la tendencia corregida, que considera la serie completa tras la imputación de los datos faltantes. Para la imputación fue utilizado el valor medio de la estación correspondiente. Esta sustitución se hizo siguiendo el procedimiento utilizado por la Secretaria de Marina en los cálculos para los calendarios de predicción de marea (A. Utrera, comunicación personal, 6 de enero de 2022).

De acuerdo al glosario del IPCC (2013) una predicción es el resultado de un intento de obtener –a partir de un estado particular del sistema- una estimación de la evolución real de la variable en el futuro. Considerando esto, a través de extrapolaciones basadas en las tendencias segmentadas calculadas para cada sitio, se estimó el comportamiento a futuro del nivel del mar y fueron construidas gráficas de predicciones para la costa central del golfo de México. Estas gráficas de predicciones fueron comparadas con las predicciones de nivel del mar construidas por el Climate Central (Climate Central, 2020) correspondientes a los escenarios de las RCP 2.6, 4.5 y 8.5.

Las estimaciones de nivel del mar relacionadas con las RCP 2.6, 4.5 y 8.5 calculadas por el Climate Central toman como base principal el trabajo de Kopp et al. (2014) y Kopp et al. (2017).

3. RESULTADOS

Se promediaron todos los valores disponibles en las series cuyo indicador de hora fuera igual para obtener el comportamiento medio diario para cada sitio. La Figura 2a muestra los ciclos diarios construidos de esta manera. Del mismo modo, se promediaron todos los valores disponibles en las series cuyo indicador de mes fuera igual para obtener el comportamiento medio anual en cada sitio. La Figura 2b muestra los ciclos medios anuales construidos de esta manera.



*Fig. 2: Ciclos diarios y anuales medios en la costa central del golfo de México.
Fuente: Original.*

Se puede apreciar un comportamiento regular cíclico en toda la costa que parece obedecer patrones diurnos y estacionales.

Adicional a las tendencias globales se calculó una tendencia segmentada para cada periodo de ininterruptiones, ajustando dos —o más— líneas a la gráfica arrojando dos —o más— resultados numéricos para cada base. Posteriormente, se calculó una tendencia corregida que considera nuevamente la serie completa, esta vez con los

datos faltantes imputados por la media de la estación. Los resultados incluyen únicamente tendencias corregidas.

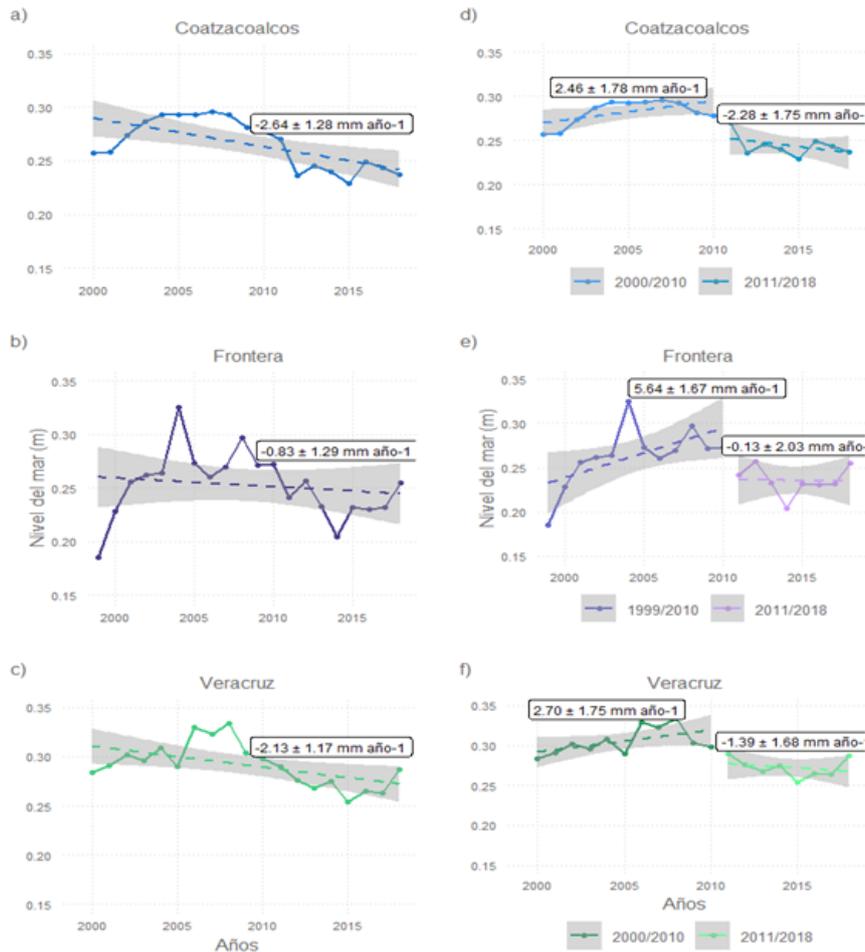


Fig. 3: Líneas de tendencia globales y segmentadas asociadas a la evolución temporal en la costa central del golfo de México. Fuente: Original

La Figura 3 (a, b y c) representa las series de tiempo y las tendencias globales asociadas a ellas. La Figura 3 (d, e y f) muestra las tendencias segmentadas para la costa central del golfo de México. Frontera destaca como la única serie de tiempo sin discontinuidades, sin embargo, se calculó igualmente una tendencia segmentada y segmentada corregida para el periodo 2011 – 2018, que incluye al único periodo ininterrumpido común en los tres sitios. Se aprecia el comportamiento negativo predominante en la costa central del golfo de México, con una modesta recuperación al final de la segunda década.

Finalmente se utilizaron las tendencias segmentadas para construir líneas de predicción y comparar el resultado con los escenarios de las RCP 2.6, 4.5 y 8.5 calculados por el Climate Central. Los datos disponibles en el portal del Climate Central incluían predicciones para Coatzacoalcos, pero no para los municipios de Frontera y Veracruz, por lo cual estas dos últimas estaciones fueron comparadas con ciudades aledañas: Ciudad del Carmen, Campeche ($18^{\circ}38' \text{ N}$, $-91^{\circ}50' \text{ W}$) y Alvarado,

Veracruz (18°46' N, -95° 46' W) respectivamente. La figura 4 (a, b y c) muestra esta comparación hasta el año 2200.

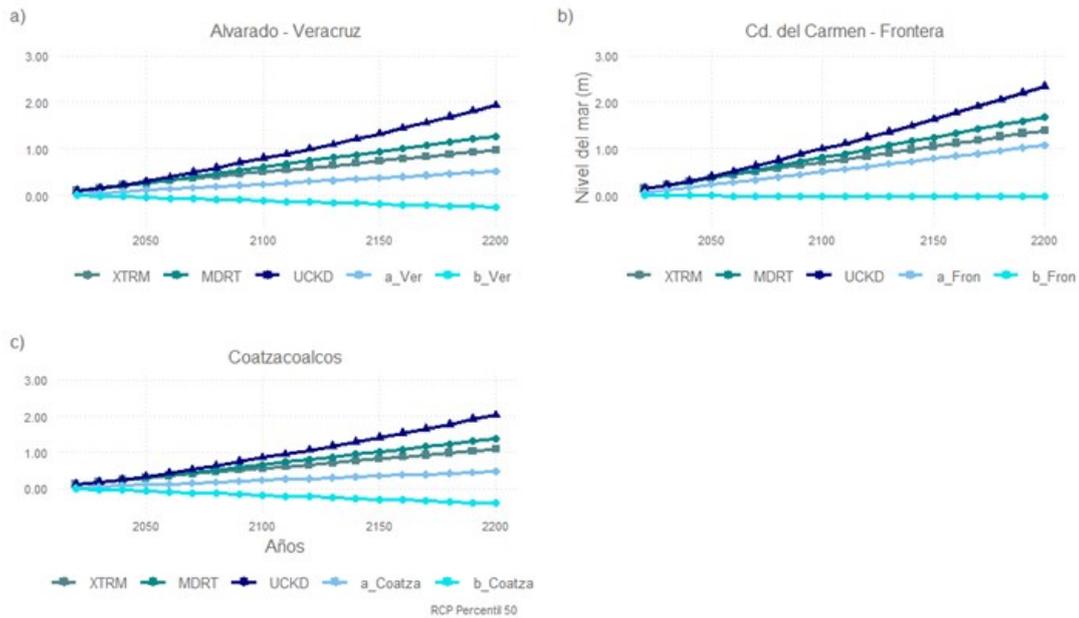


Fig. 4: Comparación de predicciones de nivel del mar en la costa central del golfo de México.

Las líneas XTRM, MDRT y UCKD hacen referencia al manejo de emisiones —en inglés: “extreme carbon cuts”, “moderate carbon cuts” y “unchecked pollution”— que considera el Climate Central para construir los escenarios RCP 2.6, 4.5 y 8.5 respectivamente. Las líneas etiquetadas ‘a’ son las líneas construidas con las tendencias segmentadas de la primera década; las líneas etiquetadas ‘b’ son las líneas construidas con las tendencias segmentadas de la segunda década. Como se observa, todas las predicciones de este trabajo subestiman el aumento en el nivel del mar respecto a las predicciones del Climate Central.

4. DISCUSIÓN

4.1 Comportamiento actual

El comportamiento diario y anual medio de las estaciones, así como las tendencias corregidas representa —en este estudio— el comportamiento actual del nivel del mar en la costa central del golfo de México; se puede apreciar un comportamiento muy definido a lo largo del día y a lo largo del año (Figura 2). De esto se sigue que, en la región, el nivel del mar se ha comportado hasta la fecha de manera regular y obedece a su naturaleza cíclica. No se aprecia ninguna perturbación.

Respecto a las tendencias globales corregidas en cada sitio, así como a la tendencia global media para la costa central del golfo de México, se presentan valores negativos, lo que refiere un comportamiento descendente en el nivel medio del mar en la región. Este comportamiento contradice activamente los resultados planteados por la

bibliografía consultada tanto a nivel local (Zavala-Hidalgo et al., 2011 y Ruíz-Ramírez et al., 2014) como a nivel global (IPCC, 2021).

En los tres sitios, el primer periodo de las tendencias segmentadas corregidas corresponde físicamente a un aumento en el nivel medio del mar, cuya magnitud se comporta de manera irregular. En los tres sitios, el segundo periodo corresponde físicamente a una disminución en el nivel del mar, sin embargo, es posible apreciar una ligera recuperación posterior a 2015.

De acuerdo al primer segmento, —1999 a 2010 en Frontera y 2000 a 2010 en Coatzacoalcos y Veracruz— el nivel del mar en Coatzacoalcos ($2,46 \pm 1,78 \text{ mm año}^{-1}$) y Veracruz ($2,70 \pm 1,75 \text{ mm año}^{-1}$) se eleva a una razón menor al valor medio establecido por Ruíz-Ramírez et al. (2014) para el golfo de México. Por su parte, el nivel del mar en Frontera ($5,64 \pm 1,67 \text{ mm año}^{-1}$) se eleva a una razón mayor a este valor medio. De acuerdo al segundo periodo de las tendencias segmentadas corregidas —2011 a 2018 en las tres estaciones— el nivel del mar disminuye con más velocidad en Coatzacoalcos ($-2,28 \pm 1,75 \text{ mm año}^{-1}$), seguido por Veracruz ($-1,39 \pm 1,68 \text{ mm año}^{-1}$) y finalmente, Frontera ($-0,13 \pm 2,03 \text{ mm año}^{-1}$) presenta la disminución más lenta.

Promediando los valores de tendencia global en cada sitio, se calculó un valor de tendencia global media para la costa central del golfo de México, el resultado sugiere una disminución de alrededor de $-1,86 \text{ mm año}^{-1}$ para el periodo de 1999 a 2018. Del mismo modo, para los dos periodos de las tendencias segmentadas fueron calculados valores medios representativos. El periodo de 1999 a 2010 presenta un aumento medio de aproximadamente $3,6 \text{ mm año}^{-1}$, valor numérico que coincide con la tendencia media a nivel global establecida por el IPCC (2019, 2021). El periodo de 2011 a 2018 presenta una tendencia media de $-1,26 \text{ mm año}^{-1}$.

Todos los conjuntos de las bases de datos sufren una caída en sus registros alrededor de 2011, que coincidentemente, es un año entero de datos faltantes tanto en la base de Coatzacoalcos, como en la base de Veracruz. En este estudio se desconoce —aunque no se descarta— el grado de influencia de esta caída en el resultado negativo de las tendencias globales y segmentadas posteriores a 2010.

4.2 Comportamiento a futuro

Considerando aquellos valores que sirvieron de base para calcular la única tendencia media que coincide con la media global ($3,6 \text{ mm año}^{-1}$), fue estimado el comportamiento a futuro del nivel del mar en la región. Para contrastar y completar el análisis, se realizó el mismo procedimiento con las tendencias segmentadas del periodo más cercano a la actualidad —2011 a 2018—. En este trabajo, este cálculo es considerado el análisis a futuro del nivel del mar en la costa central del golfo de México.

Las predicciones basadas en el primer periodo —1999 a 2010— describen un comportamiento ascendente y paulatino a través del tiempo, estimando un aumento medio en el nivel del mar entre 0,47 y 1,07 m a final de siglo XXII. Las predicciones construidas con base en las tendencias negativas posteriores a 2011 describen un comportamiento negativo persistente en el nivel medio del mar, estimando una disminución de aproximadamente -0,41 a -0,02 m a final del siglo XXII. Esta disminución no parece relacionarse a ningún resultado de estudios previos.

Ninguna línea de tendencia para la costa central del golfo de México fue idéntica a las líneas estimadas por el Climate Central. El único escenario al que superan las líneas resultantes de las predicciones propias, corresponde al percentil cinco de la RCP 2.6, el cual representa un corte estricto y una reducción de emisiones a nivel global, de manera que, ante un manejo poco regulado de emisiones y gases de efecto invernadero podemos esperar un aumento que duplique e incluso triplique a los valores calculados en este trabajo.

Para identificar las causas directas e indirectas de las diferencias en las tendencias entre este trabajo y trabajos anteriores, es importante profundizar en estudios multidisciplinarios para determinar el origen de la desigualdad en los valores.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó utilizando datos de la red mareográfica nacional proporcionados por la Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología (DIGAOHM) de la Secretaría de Marina de México.

REFERENCIAS

- British Geological Survey. (s.f.). Impacts of climate change. Recuperado el 7 de diciembre, 2021, de British Geological Survey website: <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/climate-change/impacts-of-climate-change/>
- Cazenave, A., y Cozannet, G. L. (2014). Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, 2(2), 15–34. <https://doi.org/10.1002/2013ef000188>
- Climate Central. (2020). *Surging Seas: Sea level rise analysis* by Climate Central. Retrieved April 16, 2021, from Climatecentral.org website: <https://sealevel.climatecentral.org/>
- Conde-Álvarez, C., y Palma Grayeb, B. (2006). Escenarios de riesgo para el territorio veracruzano ante un posible cambio climático. En A. Tejeda Martínez & C. Welsh Rosdríguez (Eds.), *Inundaciones 2005 En El Estado De Veracruz* (pp. 285–300). Xalapa, Veracruz: Universidad Veracruzana.
- McGranahan, G., Balk, D., y Anderson, B. (2007). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, 19(1), 17–37. <https://doi.org/10.1177/0956247807076960>
- IPCC, (2013) Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- IPCC, (2019) Summary for Policymakers. En: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. En prensa.

IPCC, (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. En prensa.

RStudio. (2018, October 11). RStudio. Retrieved May 4, 2021, from RStudio website: <https://www.rstudio.com/products/RStudio/>

Ruíz-Ramírez, J. D., Euan-Ávila, J. I., & Torres-Irineo, E. (2014). Tendencias del nivel del mar en las costas del caribe mexicano. *European Scientific Journal*, 10(1857-7431), 86–95. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/236410897.pdf>

Zavala-Hidalgo, J., de Buen Kalman, R., Romero Centeno, R., y Hernández Maguey, F. (2011). Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas. En A. Vázquez Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J. L. Rojas Galaviz (Eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (pp. 315–334). Recuperado de

<http://www.pincc.unam.mx/DOCUMENTOS/vulnerabilidad.pdf>