

El cambio en el nivel medio del mar en las costas mexicanas

López-Espinoza E.D.¹, Gómez-Ramos O.², Zarza Alvarado M.A.², Zavala-Hidalgo J.¹, Osorio-Tai M.E.³

Resumen

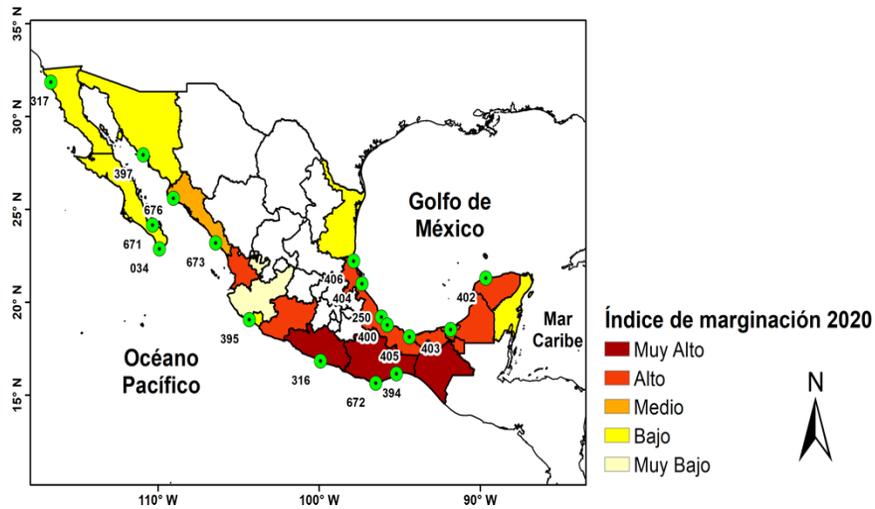
Se presentan estimaciones del ciclo anual y las tendencias a largo plazo en el nivel del mar en 17 sitios de las costas de México para un periodo que abarca de 1946 a 2006, (véase **Figura 1**). Además, para los dos sitios con las series de nivel del mar históricas más largas, Acapulco y Veracruz, se obtiene la tendencia lineal extendiendo el análisis hasta 2022 y 2015, respectivamente. Los datos empleados en el estudio son generados por el Servicio Mareográfico Nacional del Instituto de Geofísica de la UNAM (SMN-UNAM) y han pasado un estricto proceso de control de calidad que robustece los resultados. El ciclo anual es calculado a partir de los promedios mensuales y su desviación estándar, y las tendencias a largo plazo son calculadas empleando sólo los años completos para evitar sesgos por la variación estacional. Los resultados de las tendencias lineales se comparan con los cambios en el nivel del mar reportados a escala global por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su Sexto Informe de Evaluación (Fox-Kemper et al., 2021).

Figura 1. Estaciones mareográficas consideradas para el análisis del ciclo anual y las tendencias del nivel del mar.

¹ *Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM*

² *Servicio Mareográfico Nacional del Instituto de Geofísica, UNAM*

³ *Facultad de Ingeniería, UNAM*



1. El nivel del mar promedio en las costas de México debido al ciclo anual

- *El valor máximo promedio del nivel del mar para el Pacífico Mexicano ocurre principalmente en septiembre, mientras que para el Golfo de México ocurre en octubre, con amplitud promedio en el ciclo anual de 0.23 m y 0.26 m, respectivamente.*
- *La ocurrencia del valor mínimo para el Pacífico Mexicano se da entre febrero y abril, mientras que para el Golfo de México, se da en meses indistintos (enero, marzo, mayo y julio).*

Para el Pacífico Mexicano, la ocurrencia del valor máximo promedio del nivel del mar se da en el mes de julio y principalmente en septiembre, (veáse **Tabla 1**). Por otro lado, el valor mínimo promedio del nivel del mar ocurre en febrero, marzo y abril. Las amplitudes para el Pacífico Mexicano van desde 0.14 m en Pto. Ángel, Oax., a 0.36 m en Guaymas, Son. Para el Golfo de México los valores máximos ocurren en septiembre y octubre, mientras que los valores mínimos ocurren en distintos meses del año (enero, marzo, mayo y julio). Las amplitudes en el Golfo de México van desde 0.20 m en Tuxpan, Ver., a 0.37 m en Coatzacoalcos, Ver., (veáse **Tabla 1**).

Para una revisión de las gráficas del ciclo anual del nivel del mar de los 17 sitios se puede consultar la siguiente liga:

https://chalchiuhtlicue.geofisica.unam.mx/capitulo_nm/graficas_ciclo_anual.pdf

Tabla 1. Características generales del ciclo anual del nivel del mar para 17 sitios de estudio. Se presenta el nivel promedio del mar, el valor del máximo y mínimo en metros junto con el mes en que ocurre el máximo y mínimo.

ID	Estación	Amplitud promedio anual [m]	Ocurrencia del máximo	Ocurrencia del mínimo	
PM	316	Acapulco, Gro.	0.18	Jul	Mar
	317	Ensenada, B.C.	0.17	Sep	Abr
	395	Manzanillo, Col.	0.21	Sep	Mar
	394	Salina Cruz, Oax.	0.19	Jul	Feb
	397	Guaymas, Son.	0.36	Sep	Feb
	034	Cabo San Lucas, B.C.S.	0.20	Sep	Mar
	671	La Paz, B.C.S.	0.27	Sep	Mar
	673	Mazatlán, Sin.	0.27	Sep	Mar
	676	Topolobampo, Sin.	0.32	Sep	Feb
	672	Puerto Ángel, Oax.	0.14	Jul	Feb
	Promedio	0.23			
G M	250	Veracruz, Ver.	0.21	Oct	Jul
	402	Progreso, Yuc.	0.22	Oct	Jul
	405	Coatzacoalcos, Ver.	0.37	Oct	May
	400	Alvarado, Ver.	0.26	Sep	Mar
	403	Cd. del Carmen, Camp.	0.25	Oct	Jul
	404	Tuxpan, Ver.	0.20	Oct	Ene
	406	Cd. Madero, Tamps.	0.33	Oct	Mar
	Promedio	0.26			

PM: Pacífico Mexicano, GM: Golfo de México

2. Tasa promedio de incremento del nivel del mar en las costas de México

- *La tasa promedio de incremento del nivel medio del mar en el Golfo de México es de 3.2 mm año⁻¹ mientras que para el Pacífico Mexicano es de 1.8 mm año⁻¹. Esto puede deberse a la subsidencia.*
- *El Pacífico Mexicano, y particularmente la costa de Oaxaca y Guerrero, están experimentando decrementos en el nivel medio del mar, con una tasa promedio de 1.5 y 2.8 mm año⁻¹, respectivamente. Específicamente, para estos sitios se observa un índice de marginación muy alto (Consejo Nacional de Población, 2020).*
 - *Particularmente, los sitios de Puerto Ángel, Oax. y Acapulco, Gro., presentan tendencias negativas de 2.9 ± 9.4 y 2.8 ± 2.9 mm año⁻¹.*
- *Las series del nivel del mar de Oaxaca se compararon en el periodo coincidente (1962 a 1984) y la diferencia entre ambos puntos es muy grande; al menos para los primeros años (1962 y 1966) el cambio en el nivel del mar en Puerto Angel está muy por arriba de Salina Cruz. Todavía se debe determinar si esta diferencia es debido a movimientos verticales de la tierra o por la adquisición de los datos.*

El Golfo de México presenta tendencias a largo plazo positivas sobre los siete sitios analizados, con una tasa promedio de 3.2 mm año⁻¹ para el periodo de 1946 a 2006. Por otro lado, el Pacífico Mexicano presenta tendencias mayoritariamente positivas (7 de 10 sitios), sin embargo, se observan tendencias negativas en los dos sitios analizados sobre la costa de Oaxaca y el sitio analizado sobre la costa de Guerrero. La tasa promedio de incremento para el Pacífico Mexicano es de 1.8 mm año⁻¹, mientras que la tasa promedio negativa es de 1.9 mm año⁻¹, ambos para el periodo de 1952 a 2001. De acuerdo con el Sexto Informe de Evaluación (Fox-Kemper et al., 2021) del IPCC, la tasa promedio de aumento del nivel del mar a escala global para el periodo de 1971 a 2018 fue de 2.3 mm año⁻¹, con un rango de entre 1.6 y 3.1 mm año⁻¹. A nivel regional se observa que el cambio en el nivel medio del mar varía con respecto al cambio global reportado, esta variación regional se está dando en dos aspectos: 1) mayores y menores tasas y 2) tasas negativas. Particularmente, observamos que la tasa promedio de incremento en el Golfo de México es mayor que la reportada a escala global, siendo una diferencia de 0.9 mm año⁻¹; mientras que para el Pacífico Mexicano la diferencia es menor (0.5 mm año⁻¹).

- *La mayor tasa de aumento del nivel medio del mar se observa al sur y noroeste del Golfo de México. Además, cuatro de los siete sitios analizados presentan una mayor tasa de aumento que la reportada a escala global (Coatzacoalcos, Ver., con 2.8 [1.7 a 3.9] mm año⁻¹, Cd. del Carmen, Camp., con 3.0 [1.6 a 4.4] mm año⁻¹, Progreso, Yuc., con 3.7 [2.4 a 5.0] mm año⁻¹ y Cd. Madero, Tamps., con 8.3 [2.4 a 14.2] mm año⁻¹). Particularmente, la tasa de aumento observada en el sur del Golfo de México se presenta sobre sitios que se encuentran en ciudades con un índice de marginación alto (Consejo Nacional de Población, 2020).*
- *En el Pacífico Mexicano la tasa de aumento mayor del nivel del mar se observa en la parte central y en el Golfo de California (Manzanillo, Col., con 2.8 [0.6 a 5] mm año⁻¹ y Guaymas, Son., con 3.7 [1.8 a 5.6] mm año⁻¹).*

En el Golfo de México la tasa de aumento del nivel medio del mar va desde 1.0 [-1.6 a 3.6] mm año⁻¹ en Alvarado, Ver., hasta 8.3 [2.4 a 14.2] mm año⁻¹ en Cd. Madero, Tamps. Para el Pacífico Mexicano varía desde 0.2 [-3.3 a 3.7] mm año⁻¹ en Cabo San Lucas, B.C.S., hasta 3.7 [1.8 a 5.6] mm año⁻¹ en Guaymas, Son. Los dos estados que presentan un decremento en el nivel medio del mar son Oaxaca y Guerrero; en el sitio de Salina Cruz, con una tasa de -0.1 [-1.8 a 1.6] mm año⁻¹ y Puerto Ángel con una tasa de -2.9 [-12.3 a 6.5] mm año⁻¹ en Oaxaca, y Acapulco con una tasa de -2.8 [-5.7 a 0.1] en Guerrero, (véase **Tabla 2** y **Figura 2**). En el Golfo de México, la menor tasa de aumento en el nivel medio del mar se observa en Alvarado y Veracruz, con 1.0 [-1.6 a 3.6] mm año⁻¹ y 1.8 [1.2 a 2.4] mm año⁻¹, respectivamente. Tuxpan, Ver., muestra una tasa de aumento de 2.0 [-0.6 a 4.6] mm año⁻¹ y le siguen Coatzacoalcos, Ver., Cd. del Carmen, Camp., y Progreso, Yuc., con 2.8 [1.7 a 3.9], 3.0 [1.6 a 4.4] y 3.7 [2.4 a 5.0] mm año⁻¹. En Cd. Madero, Tamps., se observa la mayor tasa de aumento con un valor de 8.3 [2.4 a 14.2] mm año⁻¹ (Tabla 2). Sobre el Pacífico Mexicano la menor tasa de aumento se observa en Cabo San Lucas, B.C.S. con 0.2 [-3.3 a 3.7] mm año⁻¹, le siguen La Paz, B.C.S., Mazatlán, Sin., Topolobampo, Sin. y Ensenada, B.C., con incrementos de 1.4 [-0.7 a 3.5], 1.4 [-1.9 a 4.7], 1.5 [-1.3 a 4.3] y 1.9 [0.4 a 3.4] mm año⁻¹, respectivamente. Los sitios de Manzanillo, Col., y Guaymas, Son., presentan las

mayores tasas de aumento con valores de 2.8 [0.6 a 5], y 3.7 [1.8 a 5.6] mm año⁻¹, (véase **Tabla 2**).

Para una revisión de las gráficas de las tendencias a largo plazo del nivel del mar de los 17 sitios se puede consultar la siguiente liga:

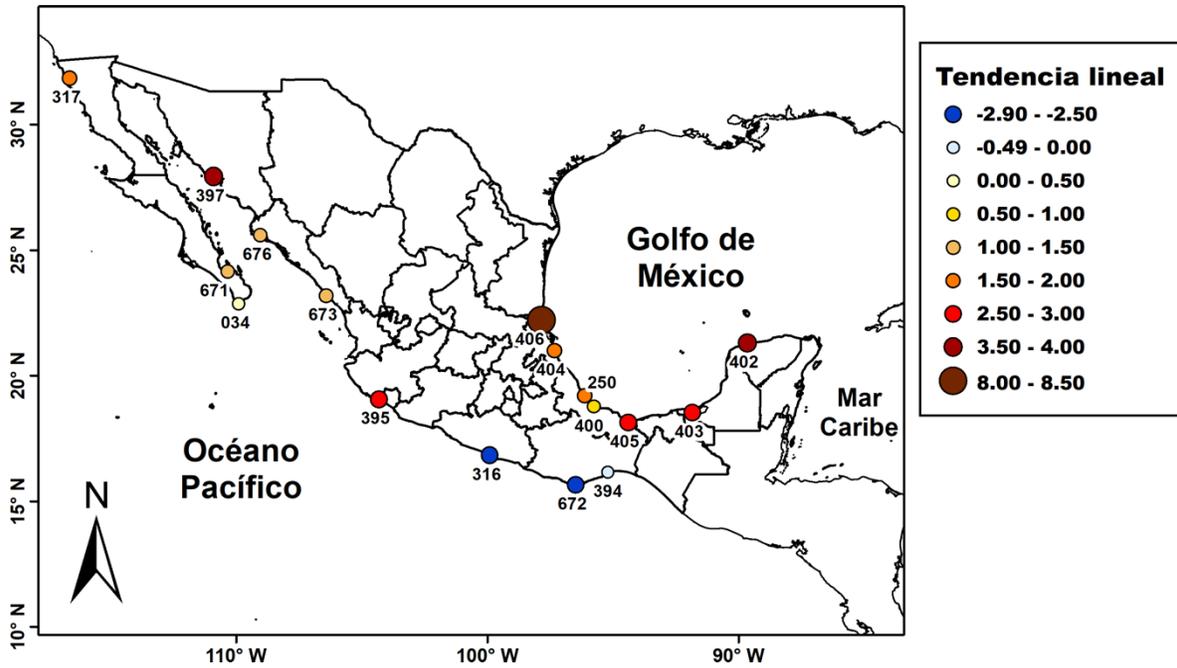
https://chalchiuhtlicue.geofisica.unam.mx/capitulo_nm/tendencias.pdf

Tabla 2. Tendencias del nivel del mar para los 17 sitios costeros.

ID	Estación	Periodo de análisis	Años completos	Tendencia [mm año ⁻¹]
316	Acapulco, Gro.	1952-1995	38	-2.8 ± 2.9
317	Ensenada, B.C.	1956-1991	27	1.9 ± 1.5
395	Manzanillo, Col.	1953-1982	27	2.8 ± 2.2
394	Salina Cruz, Oax.	1952-1995	26	-0.1 ± 1.7
397	Guaymas, Son.	1953-1995	26	3.7 ± 1.9
PM 034	Cabo San Lucas, B.C.S.	1973-2001	20	0.2 ± 3.5
671	La Paz, B.C.S.	1952-1983	20	1.4 ± 2.1
673	Mazatlán, Sin.	1953-1975	20	1.4 ± 3.3
676	Topolobampo, Sin.	1956-1994	18	1.5 ± 2.8
672	Puerto Ángel, Oax.	1962-1984	12	-2.9 ± 9.4
250	Veracruz, Ver.	1952-2006	44	1.8 ± 0.6
402	Progreso, Yuc.	1952-1994	30	3.7 ± 1.3
405	Coatzacoalcos, Ver.	1946-1993	23	2.8 ± 1.1
GM 400	Alvarado, Ver.	1956-1981	19	1.0 ± 2.6
403	Cd. del Carmen, Camp.	1957-1991	18	3.0 ± 1.4
404	Tuxpan, Ver.	1957-1989	16	2.0 ± 2.6

Pacífico Mexicano, GM: Golfo de México

Figura 2. Representación espacial de la tendencia a largo plazo del nivel del mar en los 17 sitios costeros de México.



2.1. Tasa de cambio actual para dos sitios en las costas mexicanas

- *La tasa de aumento del nivel del mar para Veracruz durante el periodo de 1952 a 2006 es de 1.8 [-1.2 a 2.4] mm año⁻¹ incrementándose a 2.6 [2.1 a 3.1] mm año⁻¹ si el periodo se extiende a 2015, y a 3.2 [2.7 a 3.7] mm año⁻¹ si se extiende a 2022.*
- *Para el periodo coincidente de 1971 a 2018, la tasa de aumento del nivel del mar para Veracruz es mayor (3.9 [3.2 a 4.6] mm año⁻¹) que la reportada a escala global (2.3 [1.6 a 3.1] mm año⁻¹). Si ahora el periodo coincidente es de 2006 a 2018, la diferencia aumenta, teniendo en Veracruz una tasa de 8.9 [4.5 a 13.3] mm año⁻¹ mientras que a escala global una tasa reportada de 3.7 [3.2 a 4.2] mm año⁻¹.*
- *La tasa de cambio del nivel del mar para Acapulco durante el periodo de 1952-1995 es de -2.8 [-5.7 a 0.1] mm año⁻¹, mientras que para el periodo actual de 2008 a 2022 es positiva con un valor de 6.7 [-2.5 a 15.9] mm año⁻¹. Estos valores consideran los desplazamientos verticales de la corteza terrestre que hubo en la región en 1962 y 2021 de 23 y 14 cm respectivamente, consecuencia de sismos superiores a Mw 7.*
- *La tasa de aumento del nivel del mar de Acapulco para el periodo de 2008 a 2018 (8.8 [-7.2 a 24.8] mm año⁻¹) es mayor que la tasa promedio a escala global (3.7 [3.2 a 4.2] mm año⁻¹) para el periodo de 2006 a 2018.*

A los dos sitios con las series de nivel del mar históricas más largas se les obtiene la tendencia lineal extendiendo el periodo al año 2022. Para Acapulco, sitio en el Pacífico Mexicano, se calcula la tendencia actual para el periodo de 2008 a 2022, mientras que para Veracruz, sitio sobre el Golfo de México, se calcula desde 1952 a 2015 y a 2022, (véase **Tabla 3**). Con esta nueva información de nivel del mar se observa para Acapulco que la tasa cambia de -2.8 [-5.7 a 0.1] mm año⁻¹, durante el periodo histórico de 1952 a 1995, a 6.7 [-2.5 a 15.9] mm año⁻¹ para el periodo de 2008 a 2022. Por otro lado, para Veracruz se incrementa de 1.8 [-1.2 a 2.4] mm año⁻¹ a 2.6 [2.1 a 3.1] mm año⁻¹ cuando se consideran datos actuales hasta 2015 y a 3.2 [2.7 a 3.7] mm año⁻¹ si se extiende a 2022. De acuerdo con el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (Fox-Kemper et al., 2021) la tasa promedio de aumento del nivel del mar a escala global para el periodo de 1971 a 2018 es de 2.3 mm

año⁻¹, con un rango entre 1.6 y 3.1 mm año⁻¹, y esta tasa se incrementa para el período de 2006 a 2018 a 3.7 mm año⁻¹, con un rango entre 3.2 y 4.2 mm año⁻¹. Acorde con esta información se observa que la tasa de incremento en ambos sitios es diferente a la reportada a escala global; particularmente para Acapulco se estima un valor de 8.8 [-7.2 a 24.8] mm año⁻¹ para el periodo de 2008 a 2018 siendo esta mayor que la estimada a nivel global de 3.7 [3.2 y 4.2] mm año⁻¹ para el periodo de 2006 a 2018. Actualmente, se está recopilando información histórica de las nivelaciones diferenciales en Acapulco para ligar ambas series (históricas y actuales) a la misma referencia. Mientras que para Veracruz la tasa de aumento del nivel del mar es siempre mayor que la reportada a escala global considerando ambos periodos.

Tabla 3. Tendencias del nivel del mar para dos sitios costeros de México, uno en el Pacífico Mexicano y otro en el Golfo de México.

Estación		Histórica		Actualizada	
		Periodo (AC)	Tendencia	Periodo (AC)	Tendencia
PM	Acapulco, Gro.	1952-1995 (38)	-2.8 ± 2.9	2008-2022 (13)	6.7 ± 9.2
GM	Veracruz, Ver.	1952-2006 (44)	1.8 ± 0.6	1952-2015 (51)	2.6 ± 0.5

PM: Pacífico Mexicano, GM: Golfo de México, AC: Años Completos involucrados en el cálculo, la tendencia se reporta en mm año⁻¹.

Los resultados obtenidos son similares a los reportados en estudios previos (Singh et al., 2000; Zavala-Hidalgo et al., 2010) pero nos dan mayor certeza por el control de calidad y revisión histórica de los procesos y procedimientos seguidos. Además, en este análisis se incluyen datos recientes que no habían sido considerados en estudios previos.

Perspectivas

Es muy importante que el monitoreo del nivel del mar no solo considere la operación cotidiana (mantenimiento) de las estaciones mareográficas, sino la instalación de nuevas estaciones en sitios donde no se tenga monitoreo. Del mismo modo, es muy importante dar

seguimiento al control de la calidad de los datos que se están obteniendo, así como al rescate y digitalización de la información mareográfica que todavía se tiene en papel. Todo esto para seguir dando continuidad para construir series de datos largas y robustas de las estaciones de monitoreo. Asimismo, se abren varias preguntas científicas relacionadas con los cambios locales del nivel medio del mar, que están influenciados no solo por los cambios en los océanos sino por movimientos locales de la corteza terrestre.

A partir de la última sección se hace notar la importancia de la labor del especialista en el nivel del mar, quien revisa los datos generados, y otorga un control de calidad a los mismos, dando una mayor robustez a los resultados de los cálculos de tendencias a largo plazo. Las tendencias históricas y actuales que se están reportando en este documento cuentan con los más novedosos métodos de control de calidad que el SMN-UNAM ha implementado y mejorado.

Agradecimientos

Gracias a la labor del equipo de trabajo del Servicio Mareográfico Nacional fue posible la obtención de los datos para generar este estudio, y en particular a Laura Elianne Huitzil Hinojosa y a Estefania Monserrat Viera Juárez por el apoyo en el control de calidad de los datos actuales del nivel del mar.

<https://chalchiuhtlicue.geofisica.unam.mx/index.php/contacto/>

Referencias

- Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, and Y. Yu. 2021. Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *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, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1211–1362. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>.
- CONAPO (Consejo Nacional de Población). 2020. Conoce los índices de marginación por entidad federativa, municipio, localidad y urbana, con base en el Censo de Población y Vivienda 2020. Available at: <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372>
- Singh, S. K., Pacheco, J., Ortiz, M., and Kostoglodov, V. 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. *Geofísica Internacional*, 39(4), 337-348.
- Zavala-Hidalgo, J., De Buen Kalman, R., Romero-Centeno, R., and Hernández-Maguey, F. 2010. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas. *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*, 249-268.