VULNERABILIDAD DE LAS ZONAS COSTERAS DE LATINOAMÉRICA AL CAMBIO CLIMÁTICO

12

Erosión costera y cambio climático en las costas del municipio de Salina Cruz, Oaxaca

Vicente Torres Rodríguez^{1,3}, Andrea Bolongaro Crevenna Recasens ¹ y Antonio Zoilo Márquez García²

¹Academia Nacional de Investigación y Desarrollo a.c., México ²Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, México ³Facultad de Ingeniería, unam, México e-mail: vicente.trorres@anide.edu.mx

Resumen

Se presentan resultados del análisis de la erosión costera en el municipio de Salina Cruz, Oaxaca, México, a partir del estudio del cambio en la línea de costa mediante imágenes de satélite de alta resolución (1967 a 2014), de la elevación del nivel del mar en escenarios de cambio climático y del papel de la tectónica local. Se detectó que en la zona coexisten procesos de acreción y erosión, los cuales son originados principalmente por actividades antrópicas. La creación de terrenos ganados al mar (hasta 338 metros mar adentro) obedece a las construcciones del puerto de Salina Cruz y de la refinería Ing. Antonio Dovalí Jaime, mientras que las zonas de erosión (con pérdidas de hasta 418 metros) se deben a los efectos de retención de sedimentos en la presa Benito Juárez localizada en el río Tehuantepec, que antes de la construcción de la presa alimentaban de sedimentos a las playas de la localidad. A estos impactos antropogénicos se les suma el impacto por cambio climático, ocasionando principalmente un aumento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos

Torres Rodríguez, V., A. Bolongaro Crevenna Recasens, y A. Z. Márquez García, 2017. Erosión costera y cambio climático en las costas del municipio de Salina Cruz, Oaxaca. p. 231-252. En: Botello A.V., S.Villanueva, J. Gutiérrez y J.L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de las zonas costeras de Latinoamérica al cambio climático. UJAT, UNAM, UAC. 486 p.

hidrometeorológicos extremos y el aumento del nivel del mar, los cuales favorecen los procesos de erosión costera. En el análisis de los cambios de la línea de costa se consideró también el efecto de la confluencia de los límites tectónicos dentro del golfo de Tehuantepec que incluyen la traza de la falla de Tehuantepec, ligada al sistema Motagua-Polochic. Los resultados muestran que la playa en la bahía La Ventosa es la que reporta los valores más altos de erosión en el Pacífico en México, con una tasa de erosión de 8 m/año y una pérdida de 418 metros de playa en el periodo de 1967 a 2014. El aumento histórico del nivel medio del mar en la zona costera de Salina Cruz se reporta 1.1 mm/año, mientras que el aumento proyectado en escenarios de cambio climático para la zona del Pacífico en el hemisferio norte puede alcanzar una tasa de 3.5 mm/año.

Palabras clave: Erosión costera, cambio climático, tectónica, Salina Cruz, Tehuantepec.

ABSTRACT

This chapter presents results from coastal erosion analysis in the Salina Cruz municipality, Oaxaca, Mexico. The starting point was to study changes in the coastline, using high-resolution satellite imagery (1967-2014), in addition to increases in sea level under climate change and local tectonic scenarios. Accretion and erosion processes were detected in the area, mainly originated by anthropic activity. Land has been reclaimed from the sea (up to 338 meters out to sea) for the construction of the Salina Cruz port and Ing. Antonio Dovalí Jaime Refinery, while the eroded areas (with losses of up to 418 meters) have been caused by sediment retention at the Benito Juárez Dam on the Tehuantepec River which, prior to the construction of the dam, would deposit sediments onto local beaches. These anthropogenic impacts are compounded by that of climate change, leading mainly to an increase in the frequency and intensity of extreme hydrometeorological phenomena and a rising sea level; both favor coastal erosion processes. When analyzing changes in the coastline, the effect of the convergence of tectonic boundaries within the Gulf of Tehuantepec was also taken into account, including the the Tehuantepec Faultline, linked to the Motagua-Polochic system. Results show that the highest erosion rates on the Mexican Pacific take place at Bahía La Ventosa beach, at 8 m/year and a loss of 418 meters of beach from the years 1967 to 2014. The historic increase in mean sea level for the Salina Cruz coastal area is reported to be 1.1 mm/year, while the increase projected in scenarios of climate change for the Pacific in the northern hemisphere may reach a rate of 3.5 mm/year.

Key words: Coastal erosion, climate change, tectonics, Salina Cruz, Tehuantepec.

INTRODUCCION

México, debido a sus condiciones geográficas, demográficas y socioeconómicas se encuentra en una posición de alta vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático (SEMARNAT, 2012). Su localización entre dos océanos, su latitud y sus relieves, lo hacen estar particularmente expuesto a los fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Entre las amenazas por cambio climático para la zona costera están la elevación del nivel medio del mar, el aumento en la frecuencia e intensidad de los huracanes y los eventos de marea de tormenta. Todos ellos favorecen los procesos de erosión costera, provocando así una mayor vulnerabilidad del litoral.

Los procesos que gobiernan la dinámica litoral como el aporte de sedimentos, el transporte litoral y los cambios de energía causados por el oleaje y las corrientes causan cambios en la geomorfología de las playas. Así, durante las diferentes temporadas climáticas, estos procesos varían en intensidad, siendo acentuados en las épocas de huracanes, que a su vez, en escenarios de cambio climático de verán incrementados en intensidad y frecuencia.

Por otra parte, a los impactos por cambio climático se le suman los impactos antropogénicos por la construcción de infraestructura tanto marina (muelles, espigones, escolleras y rompeolas) como continental (carreteras, presas, bordos, hoteles y otros), que generan modificaciones de la dinámica litoral, ocasionando así cambios en la geomorfología de las playas y favoreciendo la pérdida de ella por erosión costera. Además, la intensificación de los fenómenos hidrometeorológico en escenarios de cambio climático, podrán acelerar los procesos erosivos.

El objetivo del presente estudio fue cuantificar las tasas históricas de cambio de la línea de costa y señalar los lugares 'críticos de erosión para contar con elementos a fin de diseñar estrategias de adaptación y gestión del riesgo ante el cambio climático en una zona estratégica para el país, por su potencial turístico y por la presencia de la refinería "Antonio Dovalí Jaime".

La zona de interés en el presente estudio se ubica en el borde occidental del golfo de Tehuantepec, en la zona costera de municipio de Salina Cruz (Oaxaca, México), desde la bahía Conejo (al oeste) hasta la desembocadura del río Tehuantepec (al este) (figura 1). La zona se localiza tectónicamente en la zona de traslape de varios elementos tec-



Figura 1. Ubicación de la zona costera del municipio de Salina Cruz., Oaxaca. En el contexto de la plataforma continental del Golfo de Tehuantepec (Recuadro). Nota: batimetría del recuadro procesada a partir de datos de la GEBCO (www.geoco.net, 2017).

tónicos: las trazas de fallas de la sutura del Bloque Maya con la placa de Norteamérica (Sistema Polochic-Motagua), la presencia de la Fosa Centroamericana y la presencia de la Dorsal de Tehuantepec.

Metodología

Desde el año 2003 la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C. (ANIDE) ha desarrollado metodología para el estudio de la dinámica costera (ANIDE 2013a, 2013b, 2015 y 2016), desde el enfoque de cambio climático. Estas metodologías han sido probadas en variados estudios de vulnerabilidad de costas, de vulnerabilidad de la infraestructura estratégica, del sector turismo, estabilidad de playas, entre otros. A continuación se detallan las partes aplicables al estudio de la erosión costera.

Los procesos de erosión y acreción (pérdida y ganancia de costa, respectivamente) pueden ser estudiados por medio de la reconstrucción histórica de las líneas de costa obtenidas de documentos cartográficos de fechas diferentes, tales como mapas, fotografías aéreas, e imágenes satelitales. El trabajo principal consiste en obtener tales documentos en formatos de papel o digital y construir un marco de referencia geográfico común para todos ellos, utilizando las herramientas del procesamiento digital de imágenes y de sistemas de información geográfica. Por marco geográfico común se entiende que todos los materiales cartográficos sean llevados a una misma proyección. Para este caso se utilizó la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) con el esferoide wGs84 (Sistema Geodésico Mundial) (Torres et al., 2010).

Los materiales cartográficos disponibles consistieron en de imágenes satelitales de los satélites Corona (CIA), imágenes Digital Globe de los satélites Quickbird, Ikonos y Geoeye y juegos de ortofotografías del Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI).

Todas las imágenes fueron georreferenciadas con respecto a las ortofotografías del INEGI (1995-1996), tomando puntos geográficos inamovibles (puntos de control GCP) en esta imagen y corrigiendo las coordenadas en las imágenes objetivos, utilizando el método imagen-imagen, con deconvolución cúbica y un error medio cuadrático ("RMS") menor de 1.0, lo que significa un error menor de un píxel. El proceso se realizó con los programas de cómputo Ermapper (Erdas[®]) y Envi[®]. La plataforma de GIS fue ArcGis9.3[®].

Una vez georreferenciadas las imágenes se vectorizaron las líneas de máxima marea representadas por la zona húmeda en la playa, observable en las imágenes y fotografías disponibles. Básicamente se buscó la línea de pleamar húmeda, ya que en la mayoría de las imágenes no se conoce la hora de toma y por tanto tampoco se conoce el dato de estado de marea durante la obtención de la imagen. En la figura 2 se muestran como ejemplo, dos imágenes de la zona de estudio, la más antigua correspondiente a 1967 y la otra del año 2012. En ambas imágenes se han delineado las líneas de costa húmeda.

La estimación de la tasa de erosión se realizó mediante el método de cálculo de áreas de referencia como viene descrito en Torres



Figura 2. Imágenes de los satélites Corona (1967, arriba) y Digital Globe (2012, abajo) de la zona costera de Salina Cruz.

et al. (2010). En este método, para cada imagen de una fecha conocida se dibuja un polígono de referencia que contiene a la línea de costa húmeda y puntos conocidos fijos en el terreno continental. Cálculos algebraicos de mapas de los polígonos y sus componentes de diferentes fechas, permiten calcular el área de erosión, la longitud de la línea de costa, y tasas de cambio de ambos.

MATERIAL DE ESTUDIO

El material fotográfico e imágenes disponibles para la zona costera del municipio de Salina Cruz consistió en imágenes de satélite de la Misión Corona de CIA del año 1967, las cuales tiene una resolución espacial de 2.7 m; imágenes de Digital Globe

de los satélites Quickbird, Ikonos y Geoeye los años 2007, 2012 y 2014, con resoluciones espaciales desde 4.0 hasta 0.4 m; y de ortofotografías del INEGI del periodo 1995-1996 con resolución espacial de 2 m, estas últimas con apoyo de vértices geodésicos de primer orden. Cabe mencionar que como referencia común se tomó al ortofotomosaico del INEGI ya mencionado del cual se obtuvieron las coordenadas de los puntos de control que también fueran visibles en los demás materiales cartográficos.

RESULTADOS

El estudio de las líneas de costa se realizó con dos enfoques: el primero, de carácter regional, donde se analizó toda la línea de costa como un continuo, y el segundo, considerando separadamente los procesos de erosión y de acreción. También se hace énfasis en algunos puntos críticos con altos valores de acreción o de erosión según sea al caso. Cabe mencionar que con el primer enfoque los resultados tienden a suavizar los fenómenos de erosión/acreción, ya que por la propia dinámica costera, las costas tienden a alcanzar el equilibrio, y que el material erosionado en un sitio, regularmente es depositado en la colindancia del mismo. Es pertinente aclarar que en la zona existen grandes cambios en la conformación de la línea de costa por la construcción del puerto de Salina Cruz y por las instalaciones de la refinería Ing. Antonio Dovalí Jaime.

Línea de costa: enfoque regional

En el municipio de Salina Cruz dominan los procesos de acreción en la zona oeste, y los de erosión en la zona este. En otras palabras, al oeste dominan procesos constructivos de costa mientras que hacia el este dominan los procesos destructivos. En la figura 3 podrán observarse grandes extensiones de avance de la línea de costa ganando



Figura 3. Comparación de las líneas de costa de los años 1967 (satélite Corona, CIA, 2.7 m de resolución en rojo) y 2014 (Digital Globe, en verde, 0.6 m de resolución). La imagen base es la del satélite Corona

terrenos al mar, en la porción oeste, mientras que en la zona este el mar ha penetrado en el continente. No obstante, si se hacen balances regionales, ambos fenómenos, erosión y acreción se balancean en cuanto a áreas se refieren. En la tabla 1 se muestran los resultados regionales de la dinámica de las costas del municipio para el periodo 1967-2014. Podrá verse que la longitud de la línea de costa ha cambiado, pasando de 28.6 km en 1967 a 34.6 km en 2014. Las condiciones de crecimiento de playas en el municipio se explican por la creación de playas artificiales por obras de protección costera relacionadas con el puerto de Salina Cruz y con la refinería Dovalí Jaime y otras obras costeras. En la misma tabla se observa que las diferencias de área costera son todas de signo positivo en cada uno de los periodos estudiados, y que el balance neto en hectáreas para el periodo 1967-2014 (47 años) es una ganancia de 23.97 hectáreas como terrenos ganados al mar. Puede notarse que el mayor crecimiento de la zona costera fue en el periodo 1967-1995 con un total de 82.34 hectáreas, periodo de mayor construcción del puerto antes mencionado. En la misma tabla aparece que el desplazamiento neto de la línea de costa en el municipio fue de +6.93 m en el lapso de 47 años, lo que da una tasa neta de erosión/ acreción de 0.15 m/año. Todos estos resultados sugerirían una dominancia de los procesos acrecionarios, pero como se verá enseguida, si se analizan separadamente los procesos de erosión y de acreción, se plantean escenarios completamente distintos.

Enfoque procesos de acreción *vs* erosión

Un estudio separado de los procesos de acreción y de erosión para los periodos de estudio muestra que ambos procesos coexisten y tienen tasas altas cada uno, y que geográficamente ocupan espacios diferentes. En la tabla 2 se muestran los resultados de los análisis de superficies y desplazamiento de la línea de costa en zonas en procesos de acreción, y en la tabla 3 los correspondientes a zonas en erosión.

Ambas tablas muestran valores drásticos de acreción y erosión. Por ejemplo, podrá verse que la máxima acreción fue de 169.58 hectáreas durante el periodo 1967-1995 (tabla 2) coincidiendo con la máxima erosión que fue de -87.24 hectáreas para el mismo periodo (tabla 3). Es decir, mientras la parte oeste era construida artificialmente,

las zonas de acreción (crecimiento) y con signos negativos las de erosión.								
Periodo	Intervalo (Años)	Longitud linea de costa (m)	Diferencia Longitud de la línea de costa (m)	Diferencia de áreas de acreción - erosión (m ²)	Diferencia de áreas de acreción - erosión (ha)	Diferencia de desplazamiento línea de costa (m)	Tasa neta de erosión- acreción (m/año)	
1967-1995	28	28 659.67	6 161.91	823 413.17	82.34	28.73	1.03	
1995-2007	12	34 821.59	-493.97	9,998.03	1.00	0.29	0.02	
2007-2014	7	34 327.61	275.68	581 574.41	58.16	16.94	2.42	
1967-2014	47	34 603.29	5,943.62	239 738.51	23.97	6.93	0.15	

Tabla 1. Variaciones de la longitud y áreas de la línea de costa en el municipio de Salina Cruz, para el periodo 1967-2014. Nota: con signos positivos se muestran las zonas de acreción (crecimiento) y con signos negativos las de erosión.

 Tabla 2. Características de la línea de costa en zonas de acreción en el municipio de Salina

 Cruz, Oaxaca. Nota: con signos positivos se muestran las zonas de acreción (crecimiento)

 v con signos negativos las de erosión.

Periodo	Intervalo (años)	Longitud linea de costa (m)	Dif. Longitud de la línea de costa (m)	Area acrecionada (m²)	Area acrecionada (ha)	Desplazamiento promedio linea costa en acreción	Tasa de acreción (m/año)
						(m)	
1967-1995	28	28 659.67	6 161.91	1 695 811.98	169.58	59.17	2.11
1995-2007	12	34 821.59	-493.97	74 220.54	7.42	2.13	0.18
2007-2014	7	34 327.61	275.68	793 630.11	79.36	23.12	3.3
1967-2014	47	34 603.29	5,943.62	1 020 384.93	102.04	29.49	0.63

Tabla 3. Características de la línea de costa en zonas de erosión en el municipio de Salina
Cruz, Oaxaca. Nota: con signos positivos se muestran las zonas de acreción (crecimiento)
y con signos negativos las de erosión

Periodo	Intervalo (años)	Longitud linea de costa (m)	Dif. Longitud de la línea de costa (m)	Area erosiona- da (m2)	Area erosiona- da (ha)	Desplazamiento promedio linea costa en erosion (m)	Tasa de erosión (m/año)
1967-1995	28	28 659.67	6 161.91	-872 398.81	-87.24	-30.44	-1.09
1995-2007	12	34 ,821.59	-493.97	-64 222.51	-6.42	-1.84	-0.15
2007-2014	7	34 327.61	275.68	-212 055.70	-21.21	-6.18	-0.88
1967-2014	47	34 603.29	5 943.62	-780 646.42	-78.06	-22.56	-0.48

la parte este presentaba los mayores índices de erosión. Los valores netos de desplazamiento de la línea de costa también son extremos para el mismo periodo, alcanzando una longitud de desplazamiento máxima de 59.17 m en las zonas de acreción, y de -30.44 m en las zonas de erosión. Estos valores contrastantes se reflejan en las tasas de acreción y erosión calculadas para este mismo lapso, las cuales fueron de 2.11 m/a en acreción, y de -1.09 m/año en la zona en erosión, que también son valores máximos de la región desde 1967.

Una síntesis gráfica de los desplazamientos de la línea de costa y las tasas de acreción y de erosión en la zona de estudio se ilustran en la figura 4. Las descripciones corresponden a lo anotado en los párrafos precedentes.

Puntos críticos

Con base en el estudio regional, se detectaron varios "puntos críticos" en la zona costera de Salina Cruz. Se trata de localidades en donde se obtuvieron valores altos bien sea de acreción o de erosión, designadas aquí mediante las letras P1, P2 y P3 dentro de cada bahía (figura 5).

En la tabla 4 se presentan los resultados de mediciones de desplazamiento total de la línea de costa y las tasas de acreción/erosión respectivas en las localidades, consideradas como puntos críticos. Los nombres de los sitios vienen también en la mencionada tabla.

Se puede observar que las bahías Conejo, Salina del Marqués y Salina Cruz presentan predominantemente playas en proceso de acreción, siendo la bahía Salina del Mar-





Figura 4. Desplazamientos de la línea de costa y tasas de acreción y erosión en la zona costera del municipio de Salina Cruz, Oaxaca para varios periodos entre 1967 y 2014.



Figura 5. Localización de sitios críticos de erosión y acreción en la zona costera del municipio de Salina Cruz, Oaxaca. Para cada bahía se han designado los puntos más importantes (P1, P2, P3).

Tabla 4. Desplazamiento total de la línea de costa y tasas de erosión-acreción								
del municipio de Salina Cruz Oaxaca. Periodo 1967-2014.								
Sitio	Punto	Playa	Coordenadas		Erosión/	Periodo	Tasa de erosión	
			x	Y	Acreción Total (m)	(años)	y acreción promedio anual (m/año)	
Bahía Conejo	P1	Azul	256 154	1 783 187	161.3	47	3.43	
	P2	Brasil	257 361	1 784 564	-23.49	47	-0.5	
	P3	Guelaguichi	258 935	1 784 912	35.12	47	0.75	
	P1	Salina Cruz Oeste	260 146	1 786 953	308.25	47	6.56	
Bahía Salina Marqués	P2	Salinas del Marqués	260 751	1 787 309	338.42	47	7.2	
	P3	Salina Cruz Este	262 432	1 787 733	289.22	47	6.15	
Bahía Salina Cruz	P1	Puerto	265 992	1 788 815	88.78	47	1.89	
	P2	Miramar	266 841	1 788 794	61.33	47	1.3	
	P3	Conalep	267 790	1 788 509	-29.73	47	-0.63	
Bahía La Ventosa	P1	Oeste del Río Tehuantepec	270 374	1 790 476	-410.35	47	-8.73	
	P2	Boca del Río Tehuantepec	271 084	1 790 645	-418.79	47	-8.91	
	P3	Este del Río Tehuantepec	271 629	1 790 684	-408.71	47	-8.7	

240

qués donde se presenta la mayor acreción con una tasa 7.2 m/año cuantificada en el periodo 1967-2014. El avance de la línea de costa en el lapso de 47 años ha sido de 338 metros mar adentro.

En contraste, la bahía La Ventosa, localizada en el extremo poniente del municipio es la que presenta los más severos problemas de erosión con -8.9 m/año detectados frente a la desembocadura del río Tehuantepec, donde la pérdida de playa en el lapso de 47 años ha sido de 418.8 metros, lo que señala la magnitud del problema en esta bahía. La erosión se extiende hacia el este en la colonia Cuauhtémoc (fuera del municipio de Salina Cruz), donde se han comprobado desplazamientos de la línea de costa de hasta 410 metros con tasas de erosión de 8 m/año.

A continuación se describen con mayor detalle los desplazamientos de la línea de costa y las tasas de acreción/erosión en los sitios críticos, descritos desde la bahía Conejos al oeste, hasta la bahía La Ventosa en el este. En la figura 6 se ilustran de manera gráfica los valores registrados.

Bahía Conejo

En la bahía Conejo se estudiaron las playas Playa Azul (P1), Playa Brasil (P2) y Playa Guelaguichi (P3) (figura 7). En esta bahía se observa en el punto P1 un proceso de acumulación de 161.3 m con una tasa de 3.43 m /año (tabla 4), donde los vientos en época de "Nortes" desplazan los sedimentos arenosos hacia el sur incrementando la amplitud de la playa y formando dunas, pero causando erosión en la playa al norte del punto P1.

Por otro lado, en las playas Brasil y Guelaguichi (puntos P2 y P3, respectivamente), las variaciones de la línea de costa presentan erosión de 23 metros (-0.5 m/año) y acreción de 35 m (0.75 m/año), respectivamente. Estos valores muestran una morfología relativamente estable.

Puede concluirse que bahía Conejo, aparentemente no ha sido afectada por los cambios hidrometeorológicos ni antropogénicos, y su dinámica es muy parecida a la que tenía hace 50 años, por lo que se observa una morfología estable de sus playas.

Bahía Salina del Marqués

La bahía Salina del Marqués comprende las playas de Salina Cruz Oeste, Salina del Marqués y Salina Cruz Este. Se caracteriza por la presencia de obras de protección formadas por escolleras. En esta bahía se presentan fuertes acreciones de más de 300 metros, dando un promedio de acreción de 6.6 m/año, la cual es de origen antropogénico. (figura 8). La mayor parte del crecimiento de estas playas se debe a actividades de relleno de arena realizadas por la Terminal Marítima de Pemex. Al oeste de la bahía Salina del Marqués se observa un área de erosión.

El crecimiento de esta playa se debe principalmente a que las escolleras antes mencionadas interrumpen el transporte litoral proveniente del suroeste de la bahía. En combinación de con el vertido de material arenoso producto del desazolve de la Terminal Marítima de Pemex.

Cabe destacar que la parte comprendida entre la escollera central y la escollera oeste del puerto de Salina Cruz, mostró de 1967 al 2014 una acumulación de 289.22 m (P3) con una tasa de acreción de 6.15 m/año aproximadamente. El crecimiento de esta playa se debe a que las dos escolleras sirven como trampas de acumulación de los sedimentos arenosos provenientes del transporte litoral, donde parte de los sedimentos provendrían de la zona hoy ero-





Figura 6. Tasas de erosión promedio anual en sitios críticos de las bahías de Salina Cruz, Oaxaca.

242



Figura 7. Cambio en la línea de costa en el periodo 1967-2014 en la bahía Conejo, localizada en la parte oeste del municipio Salina Cruz, Oaxaca.



Figura 8. Cambio en la línea de costa en el periodo 1967-2014 en la bahía de Salina del Marqués, Oaxaca.

sionada localizada en el extremo suroeste de la bahía (figura 8). La mayor parte del crecimiento de estas playas se debe a actividades de relleno de arena realizadas por la Terminal Marítima de Pemex. Al oeste de la bahía Salina del Marqués se observa un área de erosión.

Bahía Salina Cruz

Analizando las líneas de costa de 1967 y de 2014, la playa de la bahía Salina Cruz ha tenido en los puntos de medición (P1 y P2) una acreción de 88 y 61 m, respectivamente, con una tasa de acreción de 1.8 y 1.3 m/año, que en un período de 47 años se puede considerar como una playa con ligero crecimiento. No obstante, en el P3, localizado al este de la bahía, se presenta un proceso erosivo de 30 m con una tasa de erosión de -0.6 m/año, denotando un transporte litoral de sedimentos con dirección de este a oeste de los materiales erosionados del litoral rocoso presentes al este de la Bahía (figura 9). Como en el caso de la bahía del Marqués, las zonas con acreción deben su mayor parte del sedimento nuevo a las obras del puerto adyacente

Bahía La Ventosa

En esta bahía se encuentra la desembocadura del río Tehuantepec y el estero La Ventosa formado por la descarga de una corriente que atraviesa la refinería Antonio Dovalí Jaime (figura 10).

En esta bahía se observa un fuerte cambio de la línea de costa entre 1967 y el año 2014, con una pérdida de playa de 410



Figura 9. Cambio en la línea de costa en el periodo 1967-2014 en la bahía de Salina Cruz, Oaxaca. P1: Puerto; P2: Miramar; P3: CONALEP.

244



Figura 10. Cambio en la línea de costa en el periodo 1967-2014 en la Bahía de La Ventosa.

m en promedio, estimándose una tasa de erosión de -8.0 m/año, que es de las más altas registradas en el país. La falta de sedimentos desde el continente, para el sostenimiento de la playa podría estar causado primero por la retención de arena en la presa Benito Juárez que produce una disminución del aporte sedimentos a la costa del río Tehuantepec, y por la interrupción del transporte litoral de los sedimentos provenientes del este por los vientos Tepehuanos (del norte) que desvían los sedimentos del litoral hacia el mar.

El crecimiento de esta playa se debe principalmente a que las escolleras antes mencionadas interrumpen el transporte litoral proveniente del suroeste de la bahía. En combinación de con el vertido de material arenoso producto del desazolve de la Terminal Marítima de Pemex.

CAMBIO CLIMÁTICO E INCREMENTO DEL NIVEL DEL MAR

El incremento del nivel es una de las mayores consecuencias del cambio climático, principalmente por el derretimiento de las zonas glaciares por el aumento de la temperatura. En este sentido, el reporte del ipcc-2007 (Rosenzweig *et al.*, 2007) con base en datos globales se afirma que en el periodo comprendido entre 1961 y 2003 el nivel del mar aumentó a una tasa promedio de $1.8 \pm 0.5 \text{ mm/año}$. Los mismos autores

muestran que la elevación del nivel del mar se incrementó a 3.1 ± 0.7 mm/año durante el periodo 1993-2003. Estos resultados coinciden con las modelaciones realizadas con el Modelo Magicc (Wigley, 2008), que para la zona de estudio muestran que la tasa de variación del nivel del mar aumenta progresivamente desde 1.2 mm/año en el año 2000 hasta 5.0 mm/año en el 2100. En este modelo se considera al año 1990 como valor de referencia cero (tabla 5).

Tabla 5. Modelo de elevación del nivel del mar utilizando el programa Maggic (Wigley, 2008).						
Ап́о	Elevación (cm) Tasa (mm/año)					
1990	0					
2000	1.2	1.2				
2010	3.5	2.3				
2020	5.3	1.8				
2030	8	2.7				
2040	11.2	3.2				
2050	15	3.8				
2060	19.2	4.2				
2070	23.9	4.7				
2080	28	4.1				
2090	33	5				
2100	37	5				

Tabla 6. XXX XXXX XXX XXX							
Sitio	Tendencia (mm/año)	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				
2090	33	5					
2100	37	5					



Figura 11. Tendencia del nivel del mar en Salina Cruz, Oaxaca. (Fuente: Zavala et al., 2011).

246

A nivel local, la morfología de las costas imprime su propio sello a la elevación del mar, pues la presencia de bahías como las de Conejo, Salina Cruz y La Ventosa generan dinámicas costeras distintas, más restringidas, a las que tendría una playa en mar abierto. Las bahías por su forma dificultan el libre flujo de las corrientes producidas por los vientos durante las tormentas, provocando un aumento de la marea de tormenta, inundación de aguas marinas en zonas terrestres, erosión, fallas de estructuras en obras civiles, arrastre de objetos, salinización del terreno y afectación a ecosistemas.

Las tendencias de cambio en el nivel medio del mar en el Océano Pacífico de México determinados del análisis estadístico de los registros del Servicio Mareográfico Nacional (SMN) (Zavala *et al.*, 2011), muestran que el nivel del mar se está incrementando en tasas variables desde 1 hasta 16 mm/año (tabla 6 y figura 11). Para el caso de la estación Salina Cruz es de 1.1.±1.7 mm/año.

Los resultados tanto de las modelaciones como de las observaciones mareográficas muestran coincidencia en cuanto que el nivel del mar en la región se está incrementando, y que la tasa mínima de incremento es de 1.1 mm/año. Por su parte los escenarios a futuro muestran tasas mayores de incremento del nivel del mar, siendo un valor aceptable para la región de 3.1 mm/año, cifra que es coincidente en la mayoría de los modelos. Los resultados de las tendencias actuales de variación del nivel del mar en México son consistentes con las de otras partes del mundo y con los valores medios propuestos en las comunicaciones 4 y 5 del IPCC.

DISCUSIÓN

En la zona costera de Salina Cruz se presentan dos hechos contrastantes: la predominancia de fenómenos de acreción en la zonas poniente y de erosión en la oriente.

El crecimiento de las playas de la zona costera al occidente es claramente de origen antrópico dadas las construcciones de las obras costeras del propio puerto como de la refinería Antonio Dovalí Jaime, que interrumpen el transporte litoral de sedimentos arenosos provenientes del oeste causando una acumulación mayor en la bahía de Salina del Marqué

Para explicar los orígenes de la erosión tan intensa en la zona poniente, particularmente en la bahía La Ventosa, se han propuesto varias hipótesis: antropogénicas, climáticas y tectónicas, donde cada una de ellas aporta al fenómeno de erosión.

Fuente de sedimentos y efectos antrópicos

De acuerdo con la dinámica de las playas, una playa requiere de un aporte de sedimentos que reemplace a los que de manera natural salen de las zonas protegidas. En la zona de bahía La Ventosa las fuentes de sedimentos son el río Tehuantepec y los provenientes del estero La Ventosa. Ambas fuentes han sido interrumpidas aguas arriba por la construcción de la presa Benito Juárez (construida en 1961), localizada en Jalapa del Marqués (figura 12), así como por las rectificaciones y los canales asocia-



Figura 12. Localización de la presa Benito Juárez en el río Tehuantepec y su relación con la bahía La Ventosa.

dos al estero La Ventosa por obras en la refinería Antonio Dovalí Jaime. Cabe mencionar que la presa se encuentra azolvada en más del 26%, pasando de una capacidad original de 947 millones de m³ en 1961 a 697 millones de m³ en 2017 (www.conagua.presas.mx). Es decir, en 56 años ha retenido 250 millones de m³ de sedimentos (4.46 millones de m³ al año), mismos que no arribaron a la zona costera para alimentar las playas de la bahía La Ventosa.

Flores-Vidal *et al.* (2011) en un estudio de circulación costera en el golfo de Tehuantepec en 2006, mostraron que las corrientes dominantes en la zona costera son hacia el oeste, y que durante los eventos de Vientos Tehuanos (del norte) y durante los "Nortes" propiamente dichos, el principal efecto es la formación de remolinos ciclónicos y anticiclónicos frente a las costas del golfo de Tehuantepec. Se entiende entonces, que habiendo una drástica diminución de fuentes de sedimentos, y la presencia de la corriente litoral (en dirección dominante al oeste) y los remolinos ciclónicos y anticiclónicos, el proceso de erosión se acentúe.

Con respecto a las condiciones climáticas, aunado a la interrupción del transporte litoral, los vientos predominantes en la zona son los denominados "Nortes" (pero que fluyen hacia el sur) ocasionan el desplazamiento hacia el mar de la arena que se llega a acumular, potenciando aún más el efecto erosivo en la bahía.

Consideraciones tectónicas

La zona costera del Pacífico mexicano, particularmente en la zona del golfo de Tehuantepec, está dominada por la confluencia de varios limites tectónicos: una

zona de divergencia del propio golfo de Tehuantepec y la zona de convergencia en la Trinchera Mesoamericana. Este contexto tectónico le imprime a la zona no solo una geodinámica de intensas fuerzas continentales sino una fuerte interacción con fuerzas exógenas especialmente las hidrodinámicas (interacción atmósfera-océano-continente) afectadas estas últimas por el entorno de cambio climático y elevación mundial del nivel del mar. El área de estudio se localiza frente a una estrecha plataforma continental (116 km de ancho), relativamente ancha si se considera que prácticamente no existe plataforma continental en litoral del Pacífico Mexicano. (figura 13 y figura 1, recuadro).

Las condiciones tectónicas actuales del Bloque Maya los describen como un bloque adherido a la Placa de Norteamérica (Dengo, 1985) a lo largo de la sutura del sistema de fallas Polochic-Motagua (sinestral) (Mann, 2007). Estas fallas son la extensión de una transformante que penetra al Golfo de Tehuantepec desde el Caribe a lo largo de la Fosas Caimán (Álvarez, 2009). Si bien el Bloque Maya ya está adherido a la Placa de Norteamérica, la zona de fallas de sutura presentan actividad actual. Una de ellas, la Chocoy-Polochic, está claramente marcada en el relieve y muestra actividad sísmica actual (White, 1985; Álvarez, 2009).

La actividad tectónica actual se ha comprobado mediante el análisis de la actividad sísmica de la zona, en la cual además de los sistemas sinestrales de fallas mencionados, se suman los eventos de convergencia de la Placa de Cocos bajo América Central, así como la presencia de la Dorsal de Tehuantepec.



Figura 13. Rasgos tectónicos de la zona del Golfo de Tehuantepec y América Central. Los alineamientos del Tensor "B" TMS fueron tomados del Harvard, 2008. Batimetría elaborada a partir de datos de GEBCO (2017). General Bathymetric Chart of the Oceans.

En 1988, Torres y González, y Morales et al., por medio de ecografías en el B/O El Puma obtuvieron la traza de fallas paralelas a la línea de costa del golfo de Tehuantepec dentro de su estrecha plataforma continental, la cuales son la continuación del sistema de fallas Chicoy-Polochic. En 2009, Álvarez realizó un análisis sismotectónico de la orientación de tensores de momento sísmico (TMS) en la zona, detectando la presencia de alineamientos del tensor B (eje intermedio) en dirección paralela a la línea de costa (figura 13), dirección asociada a la subducción. Estos alineamientos se curvean y penetran finalmente a lo largo del río Tehuantepec, tal como lo describieron Torres et al. (1988). Por otra parte, el Grupo de Modelado Sísmico de Harvard (2008) modeló rotaciones antihorarias del

eje de compresión P en un estudio TMS precisamente en la zona de Tehuantepec.

Lo anterior muestra que la geodinámica del sitio se presente con componentes de levantamiento cortical y rotación de bloques, y explicaría, localmente, el hundimiento progresivo de la parte este de la bahía La Ventosa y su levantamiento en la oeste. En la zona hundida la línea de costa avanza dentro del continente, interpretándose como erosión, mientras que en la zona levantada el fenómeno es de acreción. Lo anterior explicaría el extremo avance de la línea de costa hacia el continente en la zona Este de la bahía La Ventosa y los fuertes fenómenos de erosión costera de hasta 8 metros por año de esta zona, evidencian el posible hundimiento del Bloque Maya a partir del río Tehuantepec.

CONCLUSIONES

Los estudios de erosión y acreción de costas deben realizarse separadamente, ya que por la propia dinámica de las playas estos procesos tienden a equilibrarse.

La zona costera del municipio de Salina Cruz presenta procesos de acreción en la zona oeste y de erosión en la zona este, sin que se evidencien relaciones de causalidad entre ambas zonas. Es decir, los sedimentos erosionados de un sitio no van a parar al otro, ya que las características de acreción están asociadas no solo a las fuentes antrópicas (construcción de escolleras) sino a condiciones oceanográficas del oeste de Salina Cruz que son distintas a las características oceanográficas del este, relacionadas esta últimas con los vientos Tepehuanos. También en la zona este se presentan afectaciones antrópicas como la construcción de la presa Benito Juárez.

La mayor erosión presentada fue en la bahía de la Ventosa con más de 418 m de pérdida de playa y con una de las tasas de erosión más altas del país (-8.91 m/año). La erosión en esta zona es causada principalmente por la disminución del aporte de sedimentos arenosos debido a la retención de los mismos en la presa Benito Juárez y por la interrupción del transporte litoral de los sedimentos provenientes del este a causa de los vientos Tepehuanos.

La tasa de erosión costera puede aumentar en presencia de los nortes y huracanes intensificados por el cambio climático.

En el periodo estudiado (1967-2014) los valores extremos de acreción muestran un

avance de la línea de costa en la Salina del Marqués de 338 metros con una tasa de acreción de 7.2 m/año.

Los terrenos ganados al mar en la zona oeste se deben a la construcción del puerto Salina Cruz y la refinería Antonio Dovalí Jaime, mientras que la erosión del este se debe a la construcción de la presa Benito Juárez en el río Tehuantepec, la que retiene los sedimentos que deberían sostener la dinámica de la playa en esa zona (este). Ambos procesos de acreción y erosión están a su vez potenciados por la elevación del nivel del mar cuyo valor promedio es de 1.1 mm/año para la zona, y de las relaciones tectónicas de la falla de Tehuantepec.

La presencia de eventos tectónicos en la zona podría modificar las tasas de elevación locales por movimientos corticales.

LITERATURA CITADA

- Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C. (ANIDE), 2013a. Metodología aplicada para el análisis de la dinámica costera. (Registro INDAUTOR 03-2012-1218135255900-01). México: Academia Nacional de Investigación y Desarrollo.
- Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C. (ANIDE), 2013b. Estudio de la vulnerabilidad y programa de adaptación ante la variabilidad climática y el cambio climático en diez destinos turísticos estratégicos, así como propuesta de un sistema de alerta temprana a eventos hidrometeorológicos extremos. Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica en Turismo, SECTUR CONACYT-165452, 2011-2013.
- Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C. (ANIDE), 2015. Desarrollo y fortalecimiento de capacidades de adaptación al cambio climático en la zona costera de Oaxaca. Informe para el Centro Mario Molina. 248 p. Elaborado por: Torres Rodríguez Vicente, Bolongaro Crevenna Recaséns Andrea, Origel Gutiérrez Gabriel, Márquez García Antonio, Anglés Hernández Marisol, Márquez García Erik y Márquez García Ivonne. (Informe Interno, no publicado).
- Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C. (ANIDE), 2016. Estudio de vulne-

rabilidad al cambio climático en destinos turísticos seleccionados. Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica en Turismo, CONA-CYT-SECTUR, 2014-2016.

- Alvarez Gómez, J. A., 2009. Tectónica activa y geodinámica en el norte de Centroamérica. Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid. 241 p.
- Dengo, G., 1985. The Gulf of Mexico and the Caribbean, Cap. Mid America: tectonic setting for the Pacific margin from Southern Mexico to northwestern Colombia, p. 123–180, The Ocean Basins and Margins, 7A, Plenum Press, New York.
- Flores-Vidal, X., C. Chavanne, y P. Plament, 2011. Coastal circulation in absence of wind in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: High-frequency radar observations. *Ciencias Marinas*, 37(4 A): 493-512.
- GEBCO, 2017. General Bathymetric Chart of the Oceans. (www.geoco.net).
- Harvard, 2008. Harvard Seismology Group: Centroid Moment Tensor Catalog, http:// www.seismology.harvard.edu/.
- Mann, P., R. D. Rogers, y L. Gahagan, 2007. Central America: Geology, resources and hazards, Cap. Overview of plate tectonic his- tory and its unresolved tectonic problems, pp. 205–241, Tylor & Francis

- Morales de la Garza, E., Márquez, G.A. Carranza, E.A. Aguayo, C. E. y Torres R.V. (1988). Descubrimiento de una gran fractura en el Golfo de Tehuantepec. Sociedad Geológica Mexicana, IX Convención Nacional, Resúmenes.
- 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. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. Change. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press. Cambridge, UK. 79-131.
- SEMARNAT, 2012. Quinta comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático.
- Torres R.V., y P.E. González, 1988. La falla Motahua-Polochic en México: *Geos*, Boletín Extraordinario, Epoca II. Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, p. 65.
- Torres R.V., G.A. Márquez, A. Bolongaro-Crevenna, J. Chavarría-Hernández, G. Expósito-Díaz, y E. Márquez-García, 2010.

Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el Estado de Campeche debido a efectos del cambio climático. p. 413-432. En: Botello A.V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez y J.L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. UAM-Iztapalapa, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche, (ISBN 978-607-7887-30-0).

- Wigley, T., 2008. MAGICC/SCENGEN 5.3 User Manual (versión 2). Recuperado de http:// www.cgd.ucar.edu/cas/wigley/magicc/ UserMan5.3.v2.pdf.
- White, R. A., 1985. The Guatemala earthquake of 1816 on the Chixoy-Polochic fault, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(2): 455-473.
- 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). MéxicouAM-Iztapalapa, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche, (ISBN 978-607-7887-30-0).