

Cambios de la línea costera en el delta del río Balsas, Pacífico mexicano, entre los años 1943-2009

Coastline's changes in the Balsas River delta, Mexico, between the years 1943-2009

Mario Arturo Ortiz Pérez,^{*(†)} José Ramón Hernández Santana^{*} y José Manuel Figueroa Mah Eng^{*}

Recibido: 13/07/2016. Aprobado: 14/06/2017.

Resumen. A partir de la segunda mitad del siglo XX y hasta el presente, la construcción de numerosas obras de ingeniería hidráulica e hidroeléctrica han contribuido aceleradamente a la ruptura del equilibrio entre los flujos hidrológicos y sedimentarios en las cuencas fluviales y los procesos de progradación/regresión en el desarrollo de geoformas deltaicas y de otros tipos de relieve costero. A su vez, la retención sedimentaria en los embalses no sólo ha provocado la regresión de las costas sino que ha impactado severamente los ecosistemas naturales y socioproductivos. En el caso de las llanuras deltaicas del río Balsas, en el océano Pacífico, la construcción de las hidroeléctricas "El Infiernillo" y "La Villita", en los años 1964 y 1973, respectivamente, determinó una notable regresión del delta y numerosos cambios morfodinámicos fluviales y costeros. Estos cambios se analizan durante los 66 años comprendidos entre los años 1943 y 2009, a través de la evidencia documental de la cartografía oficial y de la restitución de la línea de costa de diversos materiales aeroftográficos. Los cambios más significativos en la regresión del delta, con tasas regresivas máximas de -20.5 m/año, ocurren en la etapa del escurrimiento hidrológico controlado, entre los años 1963 y 1974, debido al cierre de los embalses, luego de una larga fase de progradación en condiciones naturales, desde el año 1943 y hasta 1958. En el sector occidental del delta, la tasa regresiva promedio alcanzó -8.8 m/año (1958-2009) contrastando con la tasa progradativa de +27.47 m/año, previa a las construcciones ingenieras.

Palabras clave: morfodinámica litoral, delta, río Balsas, México.

Abstract. Since the second half of the twentieth century, the undertaking of a number of hydraulic and hydroelectric projects has contributed to the disruption of the balance of water and sediment flows in river basins, leading to accelerated processes of progradation and regression in deltaic and other coastal landforms. The retention of sediments in reservoirs has not only resulted in coastal regression, but has severely impacted natural and socio-productive ecosystems as well. In the case of the deltaic plains of the Balsas river in Mexico, the construction of El Infiernillo and La Villita hydroelectric plants in 1964 and 1973, respectively, led to a marked regression of the delta as well as several morphodynamic changes in riverine and coastal areas. The Balsas river basin is located between 17° and 20° North and 97° 30' and 103° 15' West, occupying the border between the states of Guerrero and Michoacan along the Mexican Pacific coast. The delta, itself an expression of fluvial sedimentation at the lower course, as the river leaves the mountainous terrain of the southern Sierra Madre, consists of a vast plain representing one third of the total watercourse from north to south, and is divided into two distributary arms leading all the way into the Pacific Ocean, where clear signs of progradation such as cross stratification and valley fills

* Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, C. P. 04510, México, D. F. Teléfono: (52-55) 5622-4356; Fax: (52-55) 5616-2145. Emails: santana@igg.unam.mx, mahengf@yahoo.com.mx

have been detected on the gentle slopes offshore, far away from the coast. This study analyzes the morphodynamic changes taking place at the Balsas river delta front over 66 years between 1943 and 2009, using documentary evidence from official maps (1964, 1980, 1990, 1998, 2001 and 2003), as well as photographic restitution of the coastline using various aerial photographic materials (1943, 1958-59, 1963, 1974, 1976-1977, 1981-1982, 1985, 1996, 2006 and 2009). In the western sector, between 1943 and 1958, prior to the construction of the engineering projects, a significant trend was observed in the progradation of the delta front of the order of +1,103 m, whereas at the apex of the delta the coastline advanced towards the sea at a rate of +73.53 m/year. The most significant changes in the regression of the delta, with maximum regressive rates of -20.5 m/year, occurred during the stage of controlled water flows between 1963 and 1974, due to the closure of reservoirs, after a long phase of natural progradation from 1943 to 1958. In the western part of the delta, the average progradation rate reached -8.8 m/year (1958-2009), in contrast to the progradation rate of +27.47 m/year prior to the construction of the projects. In the eastern part of the delta, on the other hand, regression prevailed during all the periods analyzed, especially between 1963 and 1974, when even the delta coastline lacked effective protection. The maximum linear regression at the coast reached -391.83 m during that period.

INTRODUCCIÓN

Diversos especialistas han abordado el análisis del comportamiento de la formación de los deltas, su dependencia de las interacciones entre los procesos hidrológicos y marinos, y las respuestas morfológicas deltaicas ante sus variaciones espacio-temporales. Los principales enfoques han considerado las influencias en el suministro de sedimentos (Reimnitz y Gutiérrez, 1970), los cambios batimétricos, las corrientes de marea, los patrones del oleaje, las tendencias del clima (Barnard, Hansen y Erikson, 2012) y otros factores formadores y modeladores de las características dimensionales, geométricas, morfológicas y estructurales de los deltas (Wright y Coleman, 1973; Boak y Turner, 2005; Coleman, Huk y DeWitt, 2008).

La interacción entre los procesos fluviales y marinos en la edificación de los deltas constituye el sistema de fuerzas rectoras cuya resultante determina los efectos ocasionados por los procesos regresión y/o progradación en dichas formaciones transicionales. Además, el comportamiento de estos procesos refleja indirectamente la influencia de múltiples variables, tanto del dominio terrestre

Later, in 1979, jetties and breakwaters started to be built to reduce the erosive impact of waves. These coastal protections resulted in a sustained reduction of erosion (average rate of -1.45 m/year) until 2009. When compared to the changes in the western sector, the regressive phase in the eastern part of the delta is notorious. The most significant extreme value occurs in the period 1963 to 1974, with a loss of beach surface of 86.68 ha, indicating an average rate of coastal regression of -10.12 m/year. It is expected that the process of coastal regression at the delta keep a low rate in coming years, given the routine maintenance to coastal protections and other infrastructure at the Lazaro Cardenas industrial port. Though they generally help improve the environmental and socio-economic conditions of upstream areas, dams may cause multiple imbalances and may adversely impact the environment towards the river mouth, leading to problems such as land losses, damages to the flora and fauna, decline of the water table, subsidence of alluvial and deltaic plains by differential sediment compaction, and the intrusion of saline water in areas adjacent to the coast, mainly during high tide, resulting in soil salinization and loss of fertility. These impacts are already identified at the Balsas River delta plain.

Keywords: coastline morphodynamics, delta, Balsas River, Mexico.

como del marino. Estudios realizados por Wright y Coleman (1973) en siete deltas del mundo les permitieron establecer una clasificación sobre la base del papel del factor preponderante en la interacción tierra-mar, reportando los tipos de delta fluvial dominante, de oleaje de baja energía, de oleaje dominante y de muy baja influencia fluvial.

Por otra parte, Fregenal (2009) estudió el delta del río Ebro, uno de los grandes deltas mediterráneos, y lo clasificó como un delta con control mixto fluvial y del oleaje en contexto micromareal, aunque ha transitado a un sistema controlado por el oleaje como resultado de la reducción de su aporte sedimentario. Tomando en consideración estos criterios, el delta del río Balsas, localizado en el límite entre los estados de Guerrero y Michoacán, México, antes del año 1958 y sin la influencia antropogénica de la construcción de las presas “Infiernillo” y “La Villita”, que redujeron significativamente sus aportes sedimentarios, podía catalogarse como un delta del tipo de oleaje dominante, delineado por costas rectas, barreras bien desarrolladas y crestas de playas con notable continuidad lateral de sedimentos arenosos.

Múltiples son los impactos que ha generado la construcción de embalses a nivel mundial, tales como la alteración de los equilibrios geodinámicos del escurrimiento hidrológico y sedimentario; la pérdida de la fertilidad edáfica, y la retención sedimentaria en los embalses, lo que determina la regresión de geoformas costeras, de carácter acumulativo, como los deltas, debido a la acción erosiva y modeladora del oleaje, como se presenta en el delta del río Nilo, a partir de la construcción de la presa de Asuán en el año 1964 (Majed y Arrojo, 2016). De acuerdo con estudios de Ghoneim *et al.* (2015), el delta ha experimentado una tasa de regresión de -137.4 m/año en el promontorio Roseta, lo que determinó la construcción de un dique de protección de 4.85 km de longitud como medida de estabilidad costera.

Ozturk, Beyazit y Kilic (2015) reportan una regresión de -655.60 m (-47 m/año aproximadamente) en el delta del río Kizilirmak, Turquía, entre los años 1987 y 2011, debido a la construcción de numerosas presas. De igual manera, Zhang, Zhang y Yang (2016) reportan rangos promedios de regresión del orden de -0.8 km/año y pérdida de 3.94 km², debido directamente a la dramática reducción del escurrimiento y del volumen de sedimentos por actividades humanas en la cuenca del delta del río Amarillo, en China, durante la última mitad del siglo XX. Otro tanto ocurre en el delta del río Yangtzé, donde miles de embalses retienen su flujo sedimentario, lo que ha determinado una reducción del rango de crecimiento de la superficie de sus humedales intermareales del orden de 12 km²/año y, en la década temprana de los años 70, hasta 3.3 km²/año (Yang *et al.*, 2005). Estos autores pronostican una reducción aun mayor de estos ecosistemas después de la construcción del gran embalse de las Tres Gargantas, finalizada en el 2010.

En el caso del río Nilo, en Egipto, Stanley y Wame (1998) reportaron que, en los últimos 150 años, el delta comenzó una fase de destrucción debido a la regulación de su escurrimiento por embalses y estructuras de irrigación, y a un elevado nivel de antropización, lo que determinó la ruptura del balance existente entre el flujo sedimentario, el efecto de los procesos erosivos costeros y la sostenida subsidencia. Por otra parte, la carga de

sedimentos en el río Mississippi, en los EE.UU., se ha reducido en un 50% debido a la construcción de numerosas presas, que conjuntamente con los efectos del ascenso del nivel medio del mar y la subsidencia, determinarán una pérdida entre 10 000 y 13 500 km² de la superficie de su delta para el año 2100 (Blum y Roberts, 2009).

En este sentido, el presente trabajo está enfocado al análisis de las variaciones espacio-temporales de la línea costera en el delta del río Balsas, en el Pacífico mexicano, dado que en ciertas porciones su costa es muy inestable y la dinámica litoral ha modificado constantemente su traza. La identificación y evaluación de este fenómeno se realizó mediante la fotointerpretación de imágenes aéreas de diferentes épocas (años 1943, 1958-1959, 1963, 1974, 1976-1977, 1981-1982, 1985, 1996, 2006 y 2009) y de la cartografía histórica comparativa (años 1964, 1980, 1990, 1998, 2001 y 2003). El objetivo central es conocer cuáles sectores de la costa deltaica presentan regresión o progradación, calculando los desplazamientos de la línea de costa, a través del análisis retrospectivo durante los últimos 66 años (1943-2009).

ÁREA DE ESTUDIO

Localización geográfica

La cuenca del río Balsas está comprendida entre los 17° y los 20° de latitud norte, y los 97° 30' y los 103° 15', de longitud oeste. Ocupa el límite entre los estados de Guerrero y Michoacán, en la costa mexicana del océano Pacífico (Figura 1).

Características físico-geográficas

El río Balsas constituye el eje principal de un complejo y vasto sistema fluvial de carácter alótromo (Ortiz, 2010) que en conjunto forma una unidad geográfica representada por una cuenca hidrográfica de amplia extensión, alcanzando los 117 406 km² (Toledo, 2003a, 2003b). El escurrimiento medio anual es de 13 863 millones de m³ (Maderey y Carrillo, 2005), en condiciones de un clima semicálido y subhúmedo, con una temperatura media anual de 22° C y precipitaciones de hasta 2 000 mm anuales (García, 2004).

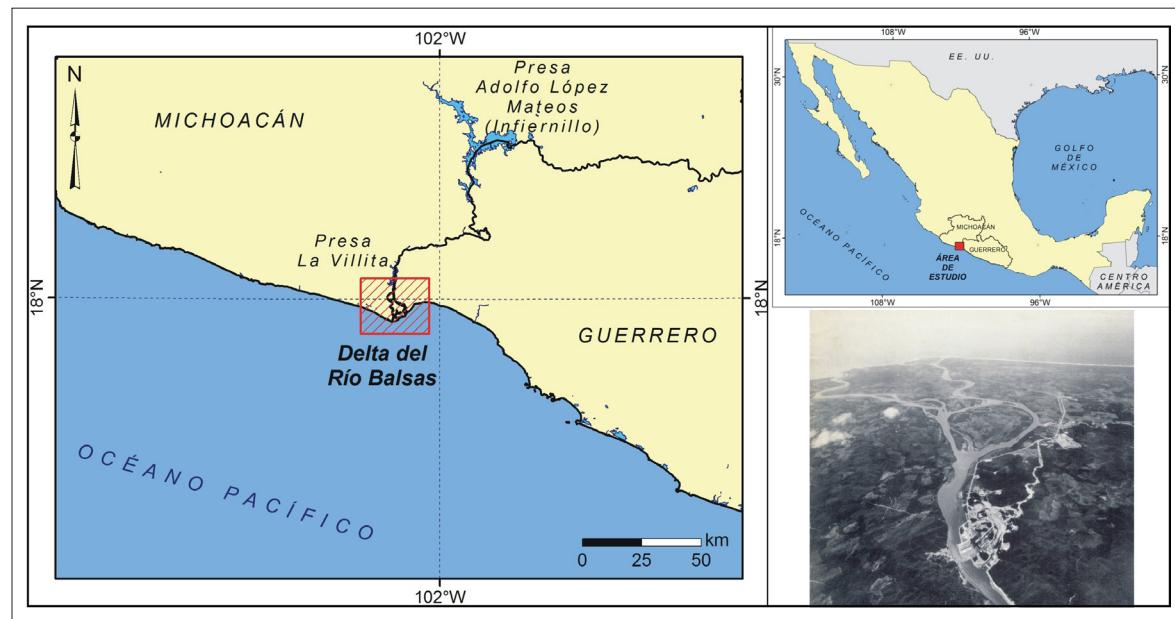


Figura 1. Área de estudio y vista aérea de la llanura deltaica del río Balsas (Foto: Aerográfica y Constructora, S.A., octubre de 1965).

Esta cuenca ocupa grandes extensiones de las provincias fisiográficas Sierra Madre del Sur y Faja Volcánica Transmexicana, por lo que presenta una fuente de origen distante, determinada por características geográficas y geológicas muy diferenciadas. Dicha heterogeneidad es consecuencia de la amplia geodiversidad de las regiones naturales que drena, fundamentalmente sobre topografía montañosa con laderas fuertemente inclinadas.

Este relieve es propicio para aprovechamientos hidroeléctricos, donde sobresalen las presas “Infiernillo” y “José María Morelos” (“La Villita”); la primera localizada a 91.7 km aproximadamente, río arriba de la desembocadura, y con una altura de 176 m sobre el nivel del mar (cota denominada “nivel de aguas máximas extraordinarias”). Esta presa posee un área de 364 km² (Juárez, 1995). La presa “La Villita” dista solo 18.9 km de la costa, con una altitud mínima de 60 m. Cabe mencionar que el tercio inferior del río Balsas está embalsado en todo su recorrido, al encajonarse entre las montañas de la Sierra Madre del Sur, desde la cortina de la presa “El Infiernillo” hasta la de “La Villita” (Figura 1). Estas hidroeléctricas comenzaron a funcionar en los años 1964 y 1973, respectivamente.

Factores formadores y rasgos morfológicos del delta del Río Balsas

El delta, como expresión de la sedimentación fluvial en el curso bajo del río Balsas, está formado por una extensa llanura, al abandonar la orografía montañosa de la Sierra Madre del Sur. Este curso bajo del río está orientado de norte a sur y se divide en dos brazos distributarios, por los que logra su salida al océano Pacífico (Espinosa y Fuentes, 1990; Ortiz, 1985) (Figuras 1 y 2). A su vez, mar adentro, más lejos de esta zona, donde las pendientes son más suaves, hay una amplia zona en la que existen claras evidencias de estratificación cruzada, rellenos de valle, y otros signos de pendientes progradantes (Shepard y Reimnitz, 1981).

La estructura frontal del delta del río Balsas está conformada por dos sectores, el occidental y el oriental (Figura 2). Las diferencias morfológicas del desarrollo de estos sectores deltaicos descansan fundamentalmente en su localización con respecto a la variabilidad estacional del ángulo de incidencia del oleaje predominante, a la morfología irregular y accidentada del fondo marino circundante, a los cambios estacionales en la corriente de deriva costera y a los patrones de des-

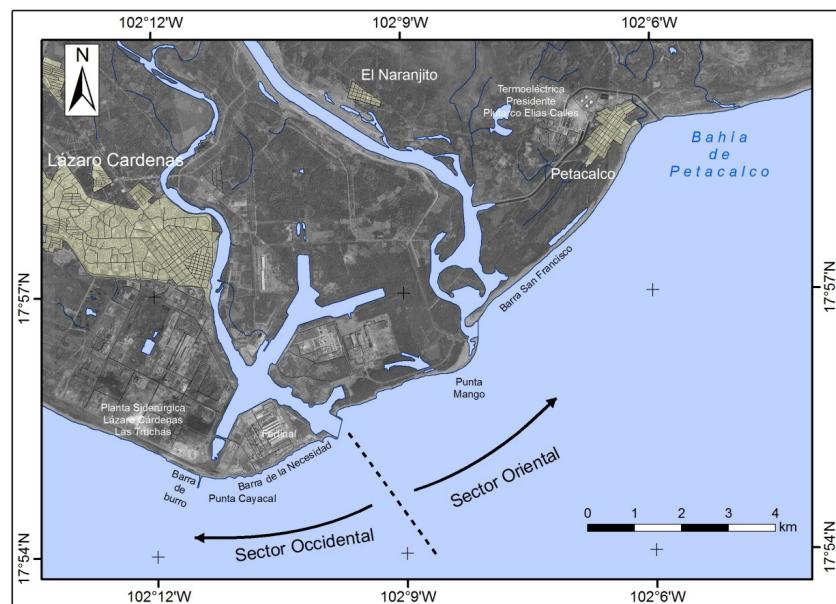


Figura 2. Sectores del frente deltaico del río Balsas.

carga fluvial del río Balsas (Reimnitz y Gutiérrez, 1970).

El sector deltaico occidental presenta un litoral orientado con rumbo generalizado NW-SE, quedando comprendido entre el Estero Erendida, en el extremo poniente, y hasta la boca cegada Las Burras, incluyendo la porción frontal “Isla de En medio”, alcanzando la primera escollera de la entrada al puerto, con una longitud de 6.6 km. El sector deltaico oriental comprende desde la escollera izquierda de la entrada al puerto hasta el estero Barra Vieja, formando el flanco poniente de la bahía abierta de Petacalco. Este último sector posee una longitud de 7.8 km y ambos alcanzan una longitud total de 14.3 km (Figura 2).

La vulnerabilidad de la costa está en función de su exposición y nivel de susceptibilidad a los procesos hidrodinámicos del oleaje. Según Puertos Mexicanos (1991), en el Puerto Lázaro Cárdenas los vientos dominantes provienen principalmente del norte, noreste y noroeste, con velocidades máximas de 4 a 9 m/seg (Figura 3). Este flujo se origina sobre el continente y fluye, de manera confinada, por el abra de El Infiernillo, que corta la barrera orográfica de la Sierra Madre del Sur. Este régimen imposibilita correlacionar los vientos con la dirección del oleaje, aunque los flujos provenientes del noroeste influyen en la dinámica litoral del sector deltaico occidental, orientado en esa misma dirección.

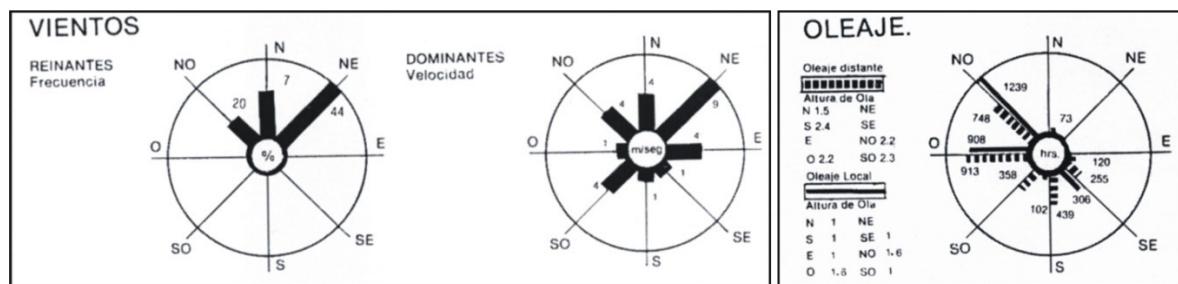


Figura 3. Frecuencia de los vientos dominantes. Dirección y altura del oleaje distante y local (Puertos Mexicanos, 1991).

De acuerdo con los registros estacionales del oleaje (Puertos Mexicanos, 1991), en primavera el oleaje reinante proviene del oeste; en verano, del sur y oeste; y en otoño e invierno, del oeste-suroeste, sur y sureste. Desde luego, la localización abierta del delta frente al océano Pacífico está expuesta a la influencia dominante del oleaje distante, aquel que se genera a 5 000 km o más de distancia, con un régimen anual de procedencia oeste (Figuras 4 y 5). La amplitud media de la marea máxima es de 0.54 m, que equivale a la más baja de la costa del Pacífico mexicano (Puertos Mexicanos, 1991).

Los tramos de litoral sujetos a una erosión constante son los correspondientes a la Isla de

En Medio (Toledo y Bozada, 2002) y la costa de Cayacal, entre los dos distributarios del delta. Incluso, considerando otros rumbos de procedencia del oleaje, los canales de energía se concentran en los mismos sitios, al estar controlados por la configuración batimétrica de la cabecera del Cañón La Necesidad (Figura 6). La cabecera de este cañón forma parte del canal de acceso al puerto, con 18 m de profundidad y un ancho de 200 m (Toledo, 2003a). Esta condición propicia el avance, por erosión remontante, de la incisión del cañón submarino hacia el puerto, la que se favorece, a su vez, por la ocurrencia de deslizamientos en el talud continental del delta submarino (Oliva y García, 1987; Sandoval y Aguayo, 2006).

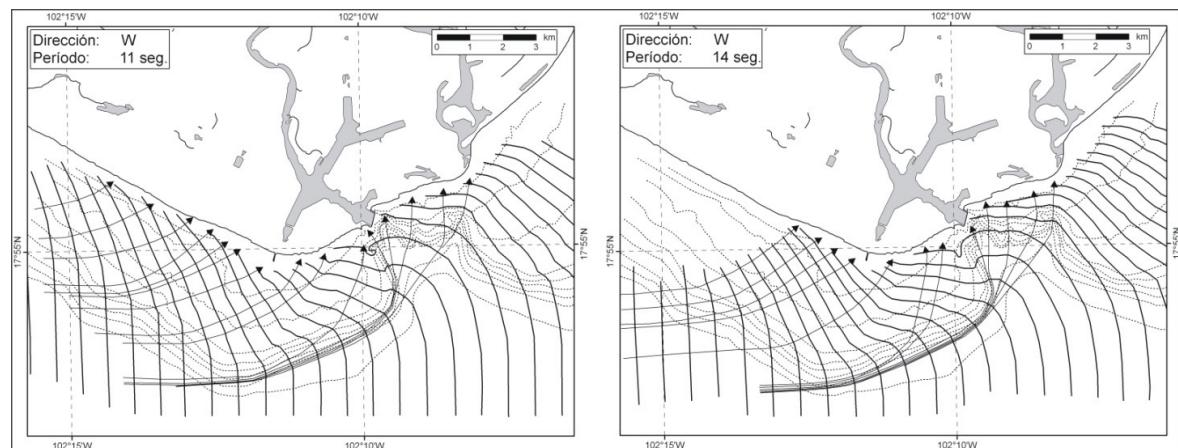


Figura 4. Plano de oleaje distante del oeste, para 11 y 14 segundos. Fuente: Puertos Mexicanos (1991).

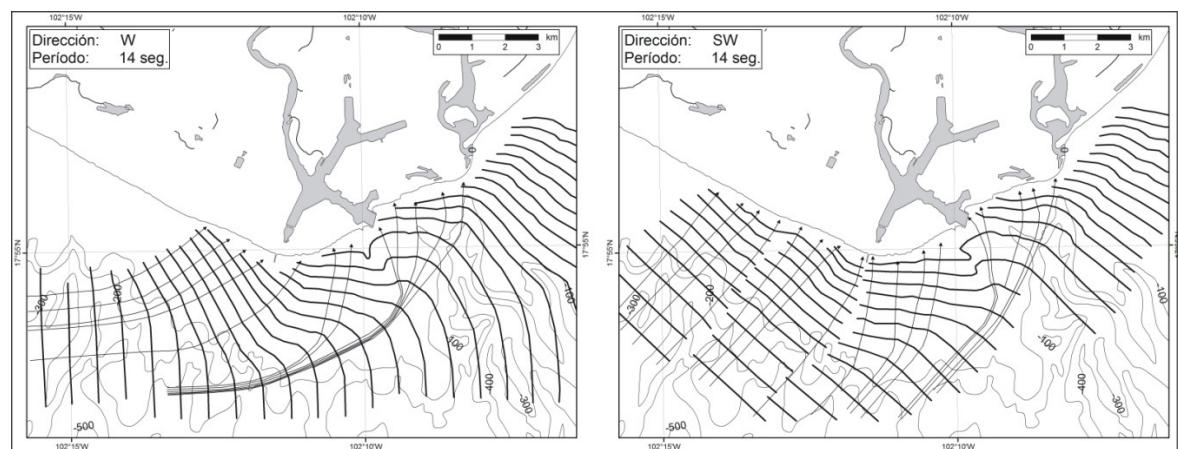


Figura 5. Oleaje distante del oeste y suroeste, en períodos de 14 segundos. Fuente: Puertos Mexicanos (1991).

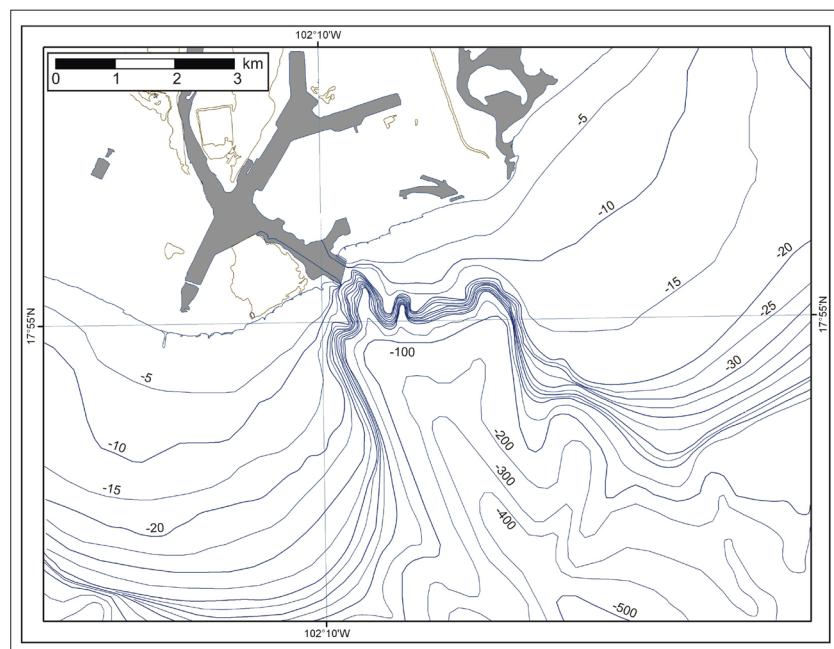


Figura 6. Batimetría de la cabecera del cañón “La Necesidad”. Fuente: CIFSA (1984), tomado de Espinosa y Fuentes (1990).

Por otra parte, el flujo de sedimentos fluviales, que proveía de carga sedimentaria a las partes altas del cañón, a través de las corrientes de turbidez, fue nulificado (Gutiérrez, 1971; Morales, Márquez y Carranza, 1987). En el presente, la cabecera del cañón sólo recoge los sedimentos de la deriva litoral, de rumbo este, según se interpreta por los ángulos de incidencia del oleaje. Sin embargo, tal situación no se presenta en la orilla de la Boca de San Francisco, donde se ha observado una acumulación significativa de sedimentos, debido al cambio estacional de la corriente de deriva, evidenciado por el crecimiento de las barras y los ganchos de las flechas arenosas, producto del oleaje que proviene del sureste. Otro comportamiento sedimentario totalmente diferente se desarrolla a lo largo de las obras ingenieras de protección, en los tramos de costa abiertos al mar, como es el caso la de Isla Ca-yacal y de la Isla de En Medio, donde visiblemente se ha reducido el transporte de sedimentos de la deriva litoral.

Indiscutiblemente la reducción del flujo sedimentario por la captura en los embalses de “El Infiernillo” y “La Villita”, el alto grado de antropización de la llanura deltaica y la energía del oleaje distante, con alturas de olas entre 1.5 y 2.4 m,

y mayores durante eventos hidrometeorológicos extremos, atentan contra la integralidad del delta del río Balsas y de las construcciones portuarias e industriales, las cuales deben garantizar protecciones seguras que impidan la regresión de esta importante geoforma costera.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material básico de análisis consistió en series de fotografías aéreas que cubrieron la llanura deltaica en diferentes fechas de vuelo. Se contó con las fotografías aéreas más antiguas, de tipo trimetrogón, de 1943, consultadas en el Instituto de Geografía de la UNAM, hasta las imágenes obtenidas de Google Earth del 2009 (Tabla 1). De cualquier forma, antes de extraer datos de estas fuentes es necesario subrayar la importancia de definir la línea de costa a utilizar y evaluar la precisión geométrica de dichas fuentes de información para establecer la escala espacial del análisis (Ojeda, 2000).

Para evaluar las modificaciones de la línea de costa y los cambios en los brazos distributarios del delta se restituyeron todas las fotografías aéreas usando de referencia las ortofotos de INEGI del

Tabla 1. Fotografías aéreas utilizadas en el análisis multitemporal del delta (* Inicio de la construcción de la presa “La Villita”). Fuente: elaboración propia.

No.	Fecha	Escala	Línea de vuelo	No. de fotos	Fuente o institución
1	1943	1:35 000	Línea 122	147-148-149	EE.UU. Dpto. de Defensa
2 *	1958-2/7/1959	1:50 000	Línea 1414	32-33-34	Compañía Mexicana Aerofoto
			?	43-45-46-49-50-51	
3	1963	1:50 000	Línea 19	361-362	Aerofoto
			Línea 20	379-380-381	
			Línea 22	402-403-404-405-406-407	
4	1974 (enero)	1:50 000	Línea 21-A	8 y 9	CETENAL
5	1976 (enero)	1:10 000	Línea 1	1 a 10	CETENAL
			Línea 2	1 a 11	
			Línea 3	1 a 11	
6	1977 (febrero)	1:35 000	?	90-91	CETENAL
7	1981	1:20 000	E13-D19-A E13-D19-B	Fotomapas	DETENAL
8	1982	1:35 000	Línea 405		
9	1985	1:35 000	Línea 3	108-109-110 7, 9, 11, 13, 15	DETENAL SEDUE
10	1996	1:20 000	E13-D19-A E13-D19-B E13-D19-C	Ortofotos	INEGI
			Línea 272	56-57-58-59-60	
			Línea 273	62-63-64-65-66	
11	2006 (18-mayo)	1:40 000	Línea 274	80-81-82-83-84-85	INEGI
12	2009	1:10 000		10	Google Earth

año 1996, en formato digital, como plano base de comparación con el resto de las imágenes. Este material fue elegido por la utilidad que presenta en términos de escala, de georreferenciación, de resolución del pixel y por tratarse de un formato digital.

A excepción de las ortofotos, el resto del material aerofotográfico, en formato impreso, fue escaneado a una resolución de 600 ppp, contabilizando un total de 77 fotografías. Posteriormente, algunas de ellas fueron mejoradas en brillo y contraste, con el software Adobe Photoshop 7.0, con la única finalidad de obtener un producto legible y facilitar la fotointerpretación. El tamaño del pixel fue siempre menor o igual a 2 m, que corresponde al valor de

pixel de las ortofotos; se procuró nunca rebasar este valor para evitar cálculos erróneos en las fotografías. Una vez realizados estos procedimientos, se armaron los respectivos mosaicos con las fechas correspondientes y se digitalizó la línea de costa para cada una de ellas, así como todos los rasgos de la morfología fluvial de los brazos deltaicos.

Entre los indicadores considerados está el *datum* de marea, siempre confiando en la posición de la línea de costa de la cartografía realizada por las autoridades oficiales y de la cartografía náutica de la Secretaría de Marina de México. En la manipulación de las imágenes se utilizaron algunos indicadores como apoyo, entre los que se pueden

mencionar: los escombros de tormenta, el escalón o berma de erosión, la marca instantánea de agua y la estructura del rompeolas, formada por el muro de protección. Tanto la disposición y la longitud de las escolleras y espigones como los rasgos de la infraestructura portuaria y de los accidentes fisiográficos, cercanos a la costa e inalterados, fueron una referencia básica en el control de las mediciones (Koopmans, 1971).

Posteriormente, se trazaron y etiquetaron, mediante el SIG ArcGis v. 9.2 (Modulo Arc Map) (ESRI, 2003), los polígonos de cada una de las áreas de progradación y regresión sedimentaria costera. De acuerdo con la variabilidad de los cambios de la línea de costa, se realizaron todos los cálculos morfométricos correspondientes a la relación entre la regresión y la progradación de la costa, según los diversos levantamientos aéreos y la cartografía existente en el período de referencia (Tabla 2).

La georreferenciación de todos los juegos de fotografías aéreas se emprendió con el mismo SIG, mediante la colocación de una serie de puntos de control, buscando en todo momento que estuviesen repartidos de forma homogénea en la superficie de las imágenes, logrando establecer un promedio de 20 a 30 puntos por foto y, con esto, lograr reducir al máximo posibles errores de distorsión al momento de la rectificación efectuada con el SIG. El rango de error calculado para las mediciones realizadas en las fotografías fue de ± 1 metro.

La restitución se realizó dentro de los límites de precisión del propio SIG, corrigiendo la inclinación

de las fotografías, pero no el desplazamiento debido al relieve. Sin embargo, al tratarse de una zona llana dicho error no aplica, y ofrece mayor precisión a las mediciones morfométricas de la línea de costa y de algunos rasgos morfológicos de la llanura deltaica.

Todos los procedimientos de rectificación digital utilizando SIG se encuentran ampliamente documentados en Moore (2000), Ojeda (2000), Fallas (2004), Domínguez, García y Anfuso (2004), Alesheikh y Ghorbanali (2007) y Alonso et al. (2007).

De esta manera, y con los procedimientos anteriormente citados, se muestra la georreferencia digital de la secuencia de las diversas fechas de vuelo, teniendo con ello un producto cartográfico de buena precisión, que constituye una herramienta y, a la vez, una base documental para evaluar los cambios morfodinámicos de la costa en los últimos 66 años.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cambios morfodinámicos de la línea costera

El análisis del material aerofotográfico multitemporal y el control de la cartografía oficial permitió el registro de nueve etapas comparativas para el estudio morfodinámico de la línea costera. Los resultados se destacan por los sectores occidental y oriental del frente deltaico, resaltando los períodos de influencia antrópica por la construcción y cierre de las hidroeléctricas “El Infiernillo” y “La Villita”.

Tabla 2. Material cartográfico utilizado (* Mapa empleado para la cuantificación de la costa). Fuente: elaboración propia.

No.	Fecha	Escala	Tipo de mapa	Fuente o institución	Características de elaboración
1	1964	1:100,000	Topográfico	Secretaría de la Defensa	Con fotografías aéreas de 1958-1959
2	1980	1:50,000	Topográfico	INEGI	Con fotografías aéreas de 1974
3	2001	1:50,000	Topográfico	INEGI	Con fotografías aéreas de 1996
4	1998	1:20,000	Portulano	Secretaría de Marina	No se especifican los datos
5	2001	1:20,000			
6 *	2003	1:20,000			
7	2003	1:10,000			
8	1990	1:7,500	Mapa	?	Folleto informativo

Sector Occidental

- Fase progradante del delta

En el sector occidental, entre los años 1943 y 1958, se observó una tendencia notable en la progradación de la porción frontal del delta, del orden de +1 103 m (Tabla 3). En el ápice del delta, la línea de costa avanzó hacia el mar a un ritmo anual de +73.53 m/año.

Antes de iniciada la construcción de las hidroeléctricas “El Infiernillo” y “La Villita”, este sector deltaico reportó los procesos más intensos en la acumulación sedimentaria y en los cambios morfológicos de la costa. En ese período existió una significativa progradación del delta, incrementando su superficie a 270 ha (Tabla 3). La distribución de dicha extensión entre la longitud de la costa del sector occidental (6 558.31 m), arrojó una estimación del avance en unos +412.05 m. El cálculo de la tasa anual alcanzó un ritmo promedio de +27.47 m/año.

- Período de transición entre las fases progradante y regresiva: construcción y cierre de embalses

Durante las obras iniciales de construcción de la hidroeléctrica “El Infiernillo”, en 1958, el proceso dominante fue la sedimentación, pero en proporciones inferiores a los años anteriores, debido a la reducción del aporte de sedimentos por influencia de las modificaciones constructivas. La progra-

ción alcanzó una superficie de 35.68 ha, con una tasa promedio anual de +10.88 m en el frente deltaico. A partir del inicio de operaciones de la hidroeléctrica cambiaron los procesos progradantes a erosivos en la porción frontal del delta, por la energía del oleaje oceánico de génesis distante.

- Fase regresiva del delta

En el sector occidental, entre 1963 y 1974, existió un claro predominio de la erosión, registrando valores de 1 48.01 ha de superficie perdida, que, como promedio anual durante esos once años, reporta una tasa regresiva de -20.52 m/año. En los años posteriores (1979-2003) existe una disminución en la tasa de este proceso regresivo (Tabla 4). Posteriormente, con el desmantelamiento de las obras de protección costera, entre 1985 y 1996, nuevamente se incrementan los procesos erosivos en el frente deltaico.

Durante el período 1996-2003 la progradación supera a la regresión en el delta debido, hipotéticamente, al “blindaje” de la costa por la rehabilitación y mantenimiento de las obras de protección costera. Posterior al año 2003 y hasta 2009 se presentan períodos regresivos sucesivos de la costa y pérdidas de la superficie deltaica del orden de 20.51 ha.

Sector Oriental

- Fase regresiva del delta

Tabla 3. Progradación y regresión máximas del frente deltaico en el sector occidental.

Sector Occidental		Máximos (en m)		Superficie (en ha)	
No.	Períodos	Progradación	Regresión	Progradación	Regresión
1	1943 a 1958	+1 103.00	---	+2 70.23 ha	---
2	1958 a 1963	---	-413.60	---	-17.28
3	1963 a 1974	---	-398.77	---	-148.06
4	1974 a 1979	---	-152.13	---	-60.05
5	1979 a 1985	---	-88.58	---	-16.02
6	1985 a 1996	---	-56.18	---	-22.30
7	1996 a 2003	+87.59	---	+18.60	---
8	2003 a 2006	---	-50.85	---	-18.14
9	2006 a 2009	---	-18.00	---	-23.71
				+288.84	-284.24

En el sector oriental del frente deltaico predominó el proceso de regresión en todos los períodos analizados, sobre todo entre los años 1963 y 1974, cuando aún el litoral del delta carecía de una protección eficaz. En esos años la regresión máxima de la costa alcanzó -391.83 m (Tabla 5). Posteriormente, en 1979, se iniciaron las obras de espigones y escolleras, lo que redujo el impacto erosivo del oleaje. Estas protecciones costeras marcaron una tendencia

sostenida a la reducción de la erosión hasta el año 2009, con una tasa promedio de -1.45 m/año.

La fase regresiva en el sector oriental del delta es notoria, si la comparamos con los cambios en el sector occidental. El valor extremo más significativo ocurre en el período comprendido entre 1963 y 1974, con una pérdida superficial de playa de 86.68 ha, lo que indica una tasa promedio de retroceso costero de -10.12 m/año (Tabla 6).

Tabla 4. Tasas medias anuales de progradación y regresión de la costa en el sector occidental.

Sector Occidental		Tasas m/año	
No.	Períodos	Progradación	Regresión
1	1943 a 1958	+27.47	---
2	1958 a 1963	---	-5.27
3	1963 a 1974	---	-20.52
4	1974 a 1979	---	-18.31
5	1979 a 1985	---	-4.07
6	1985 a 1996	---	-3.09
7	1996 a 2003	+4.05	---
8	2003 a 2006	---	-9.22
9	2006 a 2009	---	-1.21

Tabla 5. Progradación y regresión máximas del frente deltaico en el sector oriental.

Sector Oriental		Máximos (en m)		Superficie (en ha)	
No.	Períodos	Progradación	Regresión	Progradación	Regresión
1	1943 a 1958	---	-334.47	---	-63.53
2	1958 a 1963	+158.00	---	+12.79	---
3	1963 a 1974	---	-391.83	---	'-86.67
4	1974 a 1979	---	-211.71	---	-59.47
5	1979 a 1985	---	-153.46	---	-34.80
6	1985 a 1996	+210.00	---	+9.07	---
7	1996 a 2003	---	-192.87	---	-13.06
8	2003 a 2006	---	-134.18	---	-33.74
9	2006 a 2009	+34.21	---	+6.07	---
				+27.94	-291.30

En realidad, ese es el efecto producido por las diferencias en las inversiones constructivas para las defensas anti-erosivas entre ambos sectores. En el litoral occidental, la porción frontal del delta está cubierta con escolleras rocosas y los espigones están emplazados con equidistancia más cerrada, mientras en el sector oriental se estableció sólo un rompeolas, con una hilera incompleta de bloques rocosos y espigones, con una distribución dispersa que facilita más la erosión.

La tendencia al proceso regresivo de la costa se mantuvo entre los años 1974 al 1979, y 2003 al 2006, con tasas de regresión costera de -15.28 m/año y -14.45 m/año, respectivamente. En la Figura 7 se observan los cambios del frente deltaico en tres momentos: a) año 1943, configuración original del delta; b) año 1958, inicio de las construcciones para la hidroeléctrica “El Infernillo”, y c) año 1974, impacto de las hidroeléctricas y de los cambios de uso de suelo.

En la actualidad, casi todo el frente costero del delta está protegido con escolleras y otras obras civiles interiores en la llanura deltaica. No obstante, deben monitorearse los extremos sureste, hacia el poblado de Petacalco, y suroeste, en el extremo occidental del complejo portuario-industrial, donde existen costas acumulativas sin evidentes medidas protectoras. En este sentido, deberán aplicarse medidas no estructurales, como la estabilización de las playas y sus morfoelementos constitutivos, como la berma y las cadenas de dunas de distintas dimensiones, desde las embrionarias más dinámicas hasta las consolidadas más interiores, con especies vegetales propias de ecosistemas arenosos, para propiciar los procesos de revegetalización o también para la estabilización de las formas acumulativas de la costa, tal como menciona Sierra (2015) en la Isla de Providencia, y Bahamón, Fernández y González (s/f) en el litoral de Cartagena de Indias, ambas en Colombia.

En el sector occidental protegido con las escolleras, se vela por la estabilidad de las mismas con mantenimientos periódicos, según los cambios futuros que se registren. En el caso del sector oriental, donde la distribución de los espigones y escolleras resulta dispersa y con baja densidad, se deben corregir sus diseños ingenieriles para establecer

alternativas anti-erosivas más eficientes y duraderas.

Cambios morfológicos de los patrones fluviales en la llanura deltaica

La alteración del sistema deltaico afecta tanto a la playa como a la planicie deltaica y, en forma particular, a sus brazos distributarios. En primer lugar, se alteró el tipo predominante de patrón fluvial meándrico, donde cada meandro compartía un desarrollo erosivo-acumulativo, según fuera la disposición de las riberas en la alternancia de sus curvaturas. Actualmente, el patrón es abandonado al disminuir la sinuosidad generada por la erosión de las riberas en ambas márgenes, lo que se traduce en un acortamiento en la longitud de los cursos fluviales y en un decremento de la sinuosidad del cauce (Figuras 8 y 9). Además, se profundizó el lecho del cauce, por el aumento de la energía erosiva de la corriente y el descenso de la transportación de sedimentos, salvo los sedimentos muy finos en suspensión.

El significado geomorfológico de estos cambios se tradujo en la modificación de los patrones de descarga, lo que provocó fluctuaciones en la distribución sedimentaria e interrumpió el ritmo de la secuencia regular de los depósitos en el frente deltaico y, además, nulificó el flujo de sedimentos en las bocas abandonadas. De esta manera, se inicia la erosión de la costa, se detiene localmente la progradación del frente deltaico, se rectifica la trayectoria sinuosa y acorta la longitud del curso fluvial. En esta llanura deltaica, el distributario izquierdo se acortó en más de 3.0 km y el derecho, conocido como río Zacatula, en 1.5 km (Figuras 8 y 9).

Estas modificaciones determinaron que el distributario derecho (río Zacatula) alcanzara mayor estabilidad al recibir menores aportes sedimentarios, y quedará dragado y rectificado, a fin de construir la dársena del Puerto Lázaro Cárdenas. Para el distributario izquierdo, los cambios del sinuoso curso fluvial se revelan claramente en la inestabilidad de su trayectoria (Figuras 9 y 10). Sin embargo, ha sido sometido a obras de rectificación en el curso bajo a fin de evitar la erosión de las márgenes, y la construcción de bordos para permitir un mayor escurrimiento de forma controlada y evitar las inundaciones (Oliva y García, 1987).

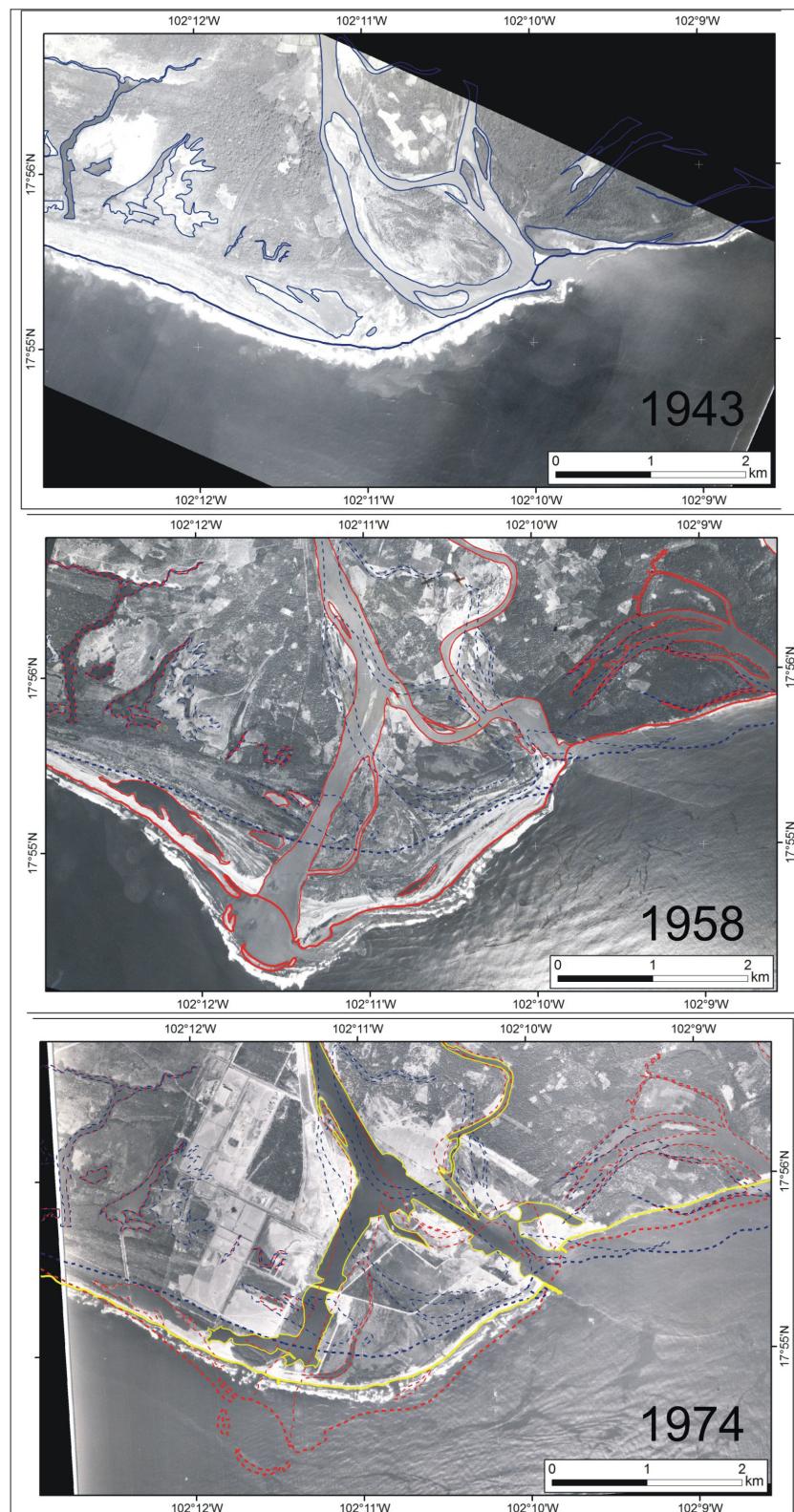


Figura 7. Cambios morfológicos de la línea de costa y de la trayectoria de los brazos distributarios en los años 1943 (color azul), 1958 (color rojo) y 1974 (color amarillo).

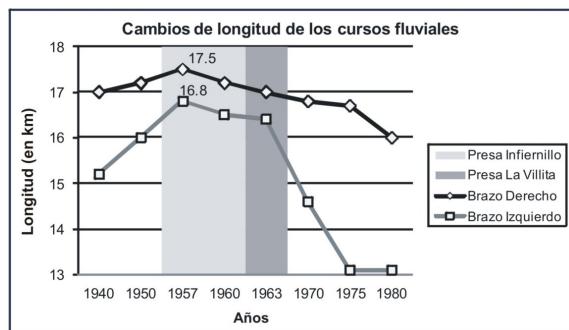


Figura 8. Cambios de longitud de los brazos distributarios, antes y después de la construcción y operación de las presas.

Realmente son muy notables los cambios en las tendencias de los procesos fluviales a partir del impacto provocado por las obras hidráulicas en el tercio inferior del río. Poco antes del inicio de las obras, los brazos de los ríos distributarios registraban un alto valor de longitud de 17.5 y 16.8 km, respectivamente (Figura 8), para disminuir brus-

camente, una vez que la carga del escurrimiento sólido es controlada por los embalses, particularmente en el distributario izquierdo, que es el de mayor caudal.

CONCLUSIONES

La interpretación y comparación de los materiales aerofotográficos e imágenes rectificadas permitió identificar las fases de progradación y regresión de la línea costera del delta en los últimos 66 años, así como la tasa promedio anual de su progradación y regresión. A su vez, los resultados validan la precisión del método empleado y lo avalan para futuras investigaciones morfodinámicas en otros sectores frágiles de la geografía nacional.

Los cambios más significativos en la regresión del delta, con tasas regresivas máximas de -20.5 m/año, ocurren en la etapa del escurrimiento hidrológico controlado del río Balsas, entre los años

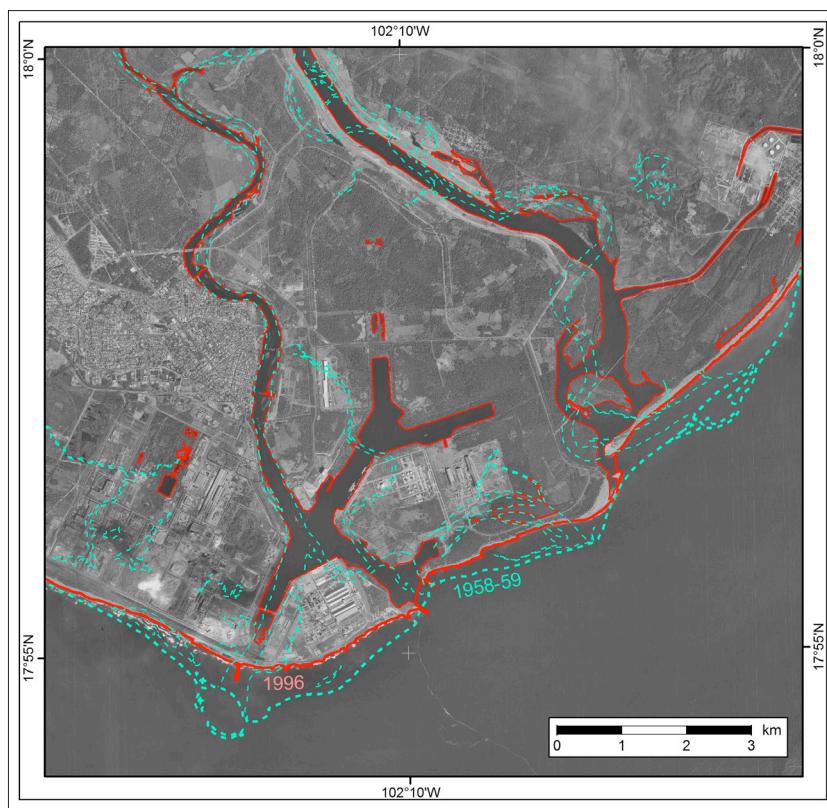


Figura 9. Cambios de los cursos distributarios del delta. Período 1958-59 (color verde) y el año 1996 (color rojo).

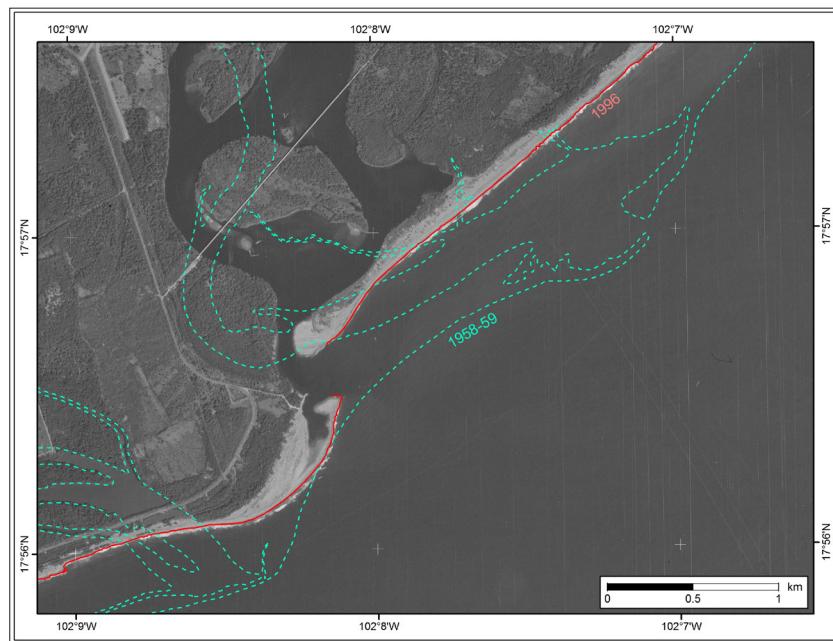


Figura 10. Cambio de trayectoria del distributario izquierdo en la desembocadura (Boca de San Francisco) entre 1958-1959 (color verde) y 1996 (color rojo).

1963 y 1974, debido al cierre de los embalses de las hidroeléctricas, luego de una larga fase de progradación desde 1943 hasta 1958. El “secuestro sedimentario” por obras hidroenergéticas e hidráulicas constituye uno de los principales problemas, no solo para el desarrollo deltaico si no para la morfodinámica costeras en general.

El desarrollo de la llanura deltaica se puede dividir en tres momentos significativos: el primero, cuando el delta mantenía condiciones naturales de progradación; el segundo, cuando el delta alcanza el umbral máximo de su progradación y comienzan las obras de control, y el tercero, cuando el delta es inactivo por impactos antrópicos y deja de cumplir con las funciones de un sistema deltaico, después de perder los mecanismos de autorregulación y autorregeneración.

La transformación antrópica del régimen hidrológico del tercio inferior del río Balsas, como resultado de la construcción de las hidroeléctricas “El Infiernillo” y “La Villita”, determinó el desequilibrio fluviomarino en la llanura deltaica, con cambios en el escurrimiento superficial y con la disminución del flujo sedimentario, lo que limitó el proceso de progradación del delta. En estas condiciones, la componente energética del

oleaje controló el desarrollo regresivo de su frente costero.

La magnitud del cambio morfodinámico en el sector occidental del delta, entre los años 1958 (inicio regresivo del delta) y 2009, alcanza una tasa regresiva promedio de -8,8 m/año, contrastando con la tasa progradativa de +27.47 m, previa a las construcciones ingenieriles. El proceso regresivo se acentuó entre la década de 1960 y el año 1979, en las desembocaduras del distributario derecho y, de manera notable, en la costa de la Isla Cayacal, comprendida entre los dos distributarios del delta.

A futuro, el proceso regresivo de la línea costera del delta mantendrá un ritmo reducido, dependiendo de la eficiencia del mantenimiento a las obras de protección de las instalaciones y a las obras de infraestructura del puerto industrial “Lázaro Cárdenas”.

Las presas benefician generalmente las condiciones ambientales y socioeconómicas en sectores aguas arriba del sistema fluvial, pero hacia la desembocadura ocasionan múltiples desequilibrios e impactos ambientales, tales como la pérdida del territorio emergido, afectaciones a la flora y a la fauna, abatimiento del manto freático, subsidencia en las llanuras aluviales y deltaicas por compac-

tación sedimentaria diferenciada, penetración de la intrusión salina en zonas adyacentes al litoral, fundamentalmente durante la marea alta, con la consiguiente salinización de los suelos y la pérdida de su productividad. Estos impactos se experimentan en la llanura deltaica del río Balsas.

REFERENCIAS

- Alesheikh, A. y Ghorbanali, N. (2007). Coastline change detection using remote sensing. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 4(1), 61-66.
- Alonso, I., Cabrera L. L., Jiménez, J. A. Valdemoro, H. I. y Sánchez I. (2007). *Aplicación de la fotogrametría a estudios de erosión costera* (pp. 1-6.). Mar del Plata: XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección.
- Bahamón Restrepo, A., Fernández Naar, L. y González Sánchez, E. (s/f). Lineamientos a 2030 para la adaptación y mitigación al riesgo del aumento del nivel del mar (ANM) en el sector turístico del borde litoral de Catagena de Indias - Colombia. Recuperado el 17 de mayo de 2017, de: http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0070_PU-SA-VIII-2012-B_RESTREPO.pdf.
- Barnard, P. L., Hansen, J. E. y Erikson, Li H. (2012). Synthesis study of an erosion hot spot, Ocean Beach, California. *Journal of Coastal Research*, 28(4), 903-922.
- Blum, M. D. y Roberts, H. H. (2009). Drowning of the Mississippi Delta due to insufficient sediment supply and global sea-level rise. *Nature Geoscience*, 2, 488-491.
- Boak, E. H. y Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, 4(21), 688-703.
- Coleman, J. W., Huh O. K. y DeWitt, B. (2008). Wetland Loss in World Deltas. *Journal of Coastal Research*, 24(1A), 1-14.
- Domínguez, L., Gracia, F. J. y Anfuso, G. (2004). Tasas de avance/retroceso de la línea de costa mediante morfometría fotogramétrica en el sector Sanlúcar de Barrameda-Rota (Provincia de Cádiz). *Revista Sociedad Geológica de España*, 17(1-2), 71-86.
- Espinosa Rodríguez, L. M. y Fuentes, J. A. (1990). *Cambios geomorfológicos en el Delta del Río Balsas*. Tesis de Licenciatura. UNAM, México, D. F.
- ESRI. (2003). ArcGis (v. 9.3). Environmental Systems Research Institute, Inc.
- Fallas, J. (2004). *Ortorectificación de fotos aéreas con ILWIS*. Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica, PRMVS-EDECA, Universidad Nacional de Costa Rica. Recuperado el 8 de marzo de 2015, de http://www.icomvis.una.ac.cr/telesig/pdf/ortorectificación_p1.PDF.
- Frenegal Martínez, M. A. (2009). El delta del Ebro: aula viva la educación medioambiental y el análisis de los riesgos costeros. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 325-337.
- García de Miranda, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*, México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Ghoneim, E., Mashaly, J. Gamble, D. Halls, J. AbuBark, M. (2015). Nile Delta exhibited a spatial reversal in the rates of shoreline retreat on the Rosetta promontory comparing pre- and post-beach protection. *Geomorphology*, 228, 1-14.
- Gutiérrez, E. M. (1971). Fisiografía y sedimentación del delta del Río Balsas, Michoacán, México. *Boletín del Instituto de Geología*, 93, 7-57.
- Juárez Palacio, J. R. (1995). Presa del Infiernillo (Adolfo López Mateos). En G. de la Lanza Espino, y J. L. García Calderón (comps.), *Lagos y presas de México* (pp. 211-223). México: Centro de Ecología y Desarrollo, A. C.
- Koopmans, B. N. (1971). *Interpretación de fotografías aéreas en la morfología costera, relacionada con proyectos de ingeniería*. Bogotá: Centro Interamericano de Fotointerpretación.
- Maderey, L. E. y Carrillo, J. (2005). *El recurso agua en México*. Serie Temas Selectos de Geografía de México. México: UNAM.
- Majed Barakat, P. y Arrojo Agudo, P. (2016). Impacto ambiental de las grandes presas en cursos bajos, deltas y plataformas litorales: el caso de Aswán. Recuperado el 1 de julio de 2016, de <https://goo.gl/PM1mFc>.
- Morales de la Garza, E. A., Márquez-García, A. Z. Carranza-Edwards, A. (1987). Distribución y evolución de los sedimentos superficiales del delta del Río Balsas, Michoacán, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*. México: UNAM. Recuperado el 24 de abril de 2015, de <http://www.biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1988-2/articulo307.html>.
- Moore, L. J. (2000). Shoreline mapping techniques. *Journal Coastal Research*, 16(1), 111-124.
- Ojeda Zújar, J. (2000). Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuestas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 30, 103-118.
- Oliva Anaya, C. y García Gómez, J. A. (1987). Encauzamiento del delta del Río Balsas. *Ingeniería Hidráulica en México*, II(II), 52-58.
- Ortiz Pérez, M. A. (1985). Fotointerpretación geomorfológica del delta del Río Balsas (pp. 205-215). *VIII Congreso Nacional de Fotogrametría y Fotointerpretación*, t. 1.

- Ortiz-Pérez, M. A. (2010). Clasificación ecogeográfica de cuencas hidrológicas: el caso de México. En H. Cotler (coord.). *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización*. México: Instituto Nacional de Ecología, Fundación Gonzalo Rio Arronte I.A.P.
- Ozturk, D., Beyazit, I. y Kilic, F. (2015). Spatiotemporal Analysis of Shoreline Changes of the Kizilirmak Delta. *Journal of Coastal Research*, 31(6), 1389-1402.
- Puertos Mexicanos, SCT. (1991). *Puerto Industrial Lázaro Cárdenas*. Oficinas Centrales, Lázaro Cárdenas, Michoacán: SCT.
- Reimnitz, E. y Gutiérrez-Estrada, M. (1970). Rapid changes in the head of the Rio Balsas submarine canyon system, Mexico. *Marine Geology*, 8, 245-258.
- Sandoval Ochoa, J. H. y Aguayo Camargo, J. E (2006). *Desprendimientos masivos de rocas en el talud continental del delta submarino del Río Balsas que ocurren por la inestabilidad de sedimentos y son causantes de corrientes de turbidez y de tsunamis*. III Simposio de la Investigación y Desarrollo. México: Facultad de Ingeniería.
- Shepard, F. P. y. Reimnitz, E. (1981). Sedimentation bordering the Rio Balsas delta and canyons, Western Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 92, 395-403.
- Sierra Howard, G. W. (2015). *Estrategias para el control y prevención de la erosión en la playa de South West en la Isla de Providencia*. Tesis de Ingeniería Civil. Universidad Católica de Colombia, Bogotá.
- Stanley, D. J. y Wame, A. G. (1998). Nile Delta in its Destruction Phase. *Journal of Coastal Research*, 14(3), 794-825.
- Toledo, A. (2003a). *Ríos, costas, mares*, México: Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Colegio de Michoacán.
- Toledo, A. (2003b). Hacia un diagnóstico socioeconómico y ambiental del delta del Río Balsas. En G. Alcalá (coord.), *Espacios y Actividades costeras en Michoacán: Aproximaciones varias* (pp. 71-99). México: Colegio de México, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y el Colegio de Michoacán.
- Toledo, A. y Bozada, L. (2002). *El delta del Río Balsas, Medio Ambiente, pesquerías y sociedad*. México: INE-Colegio de Michoacán.
- Wright, L. D. y Coleman, J. M. (1973). Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 57(2), 370-398.
- Yang, S. L., Zhang, J., Zhu, J., Smith, J. P., Dai, S. B. Gao, A. y Li, P. (2005). Impact of dams on Yangtze River sediment supply to the sea and delta intertidal wetland response. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110, 1-12.
- Zhang, X., Zhang, Y., Ji, Y., Zhang, Y. y Yang, Z. (2016). Shoreline Change of the Northern Yellow River (Huanghe) Delta after the Latest Deltaic Course Shift in 1976 and Its Influence Factors. *Journal of Coastal Research*, 74, 48-58.