

Morfodinámica de las costas septentrionales del estado de Veracruz, México: tendencias en las últimas cuatro décadas (1973-2017)

Morphodynamics of the Northern Coasts of the Veracruz State, Mexico: Trends over the Past Four Decades (1973-2017)

Andrea Mancera Flores,* Daniel Morales Méndez,** Emilio Saavedra Gallardo,*** José Ramón Hernández Santana**** y Ana Patricia Méndez Linares⁺

Recibido: 04/06/2020. Aprobado: 14/07/2020. Publicado (en línea): 06/10/2020.

Resumen. El objetivo cardinal del presente trabajo es calcular y evaluar el comportamiento de la morfodinámica costera en el litoral septentrional del estado de Veracruz durante los últimos 45 años (1973-2017), en un contexto regional y local, por lo que se incluyen tres sitios idóneos para el enclave de prototipos ingenieriles para el aprovechamiento de la energía undimotriz y su conversión en micro-generación eléctrica para asentamientos costeros: Barra de Cazones, Palma Sola y Villa Rica. Para ello, se emplearon datos geoespaciales de fotografías aéreas, ortofotos e imágenes satelitales de distintas temporalidades (1973, 1986, 1995, 2000, 2011 y 2017), con el fin de identificar y delimitar la línea de costa, a partir de los criterios propuestos por Boak y Turner (2005); posteriormente, se clasificó dicho atributo de acuerdo con su componente abrasivo o acumulativo en el módulo DSAS (USGS, 2012) para determinar las tasas de cambio de la línea costera. Además, se estableció una línea base para determinar a futuro los posibles impactos derivados de la instalación de los prototipos ingenieriles. Según la disponibilidad de los insumos, la zona norte se abordó de

manera regional conforme al periodo 2000-2017, mientras Barra de Cazones y Palma Sola abarcaron la temporalidad 1995-2017 y Villa Rica incluyó el periodo 1973-2017. Los resultados para el movimiento neto de la línea de costa (NSM), muestran que en la tendencia regional de la costa septentrional existe un predominio a la progradación. Los valores progradativos alcanzan cifras de hasta +27 m, ubicados cerca de las desembocaduras fluviales, de campos de dunas e inclusive en áreas antropizadas, aunque en algunas localidades alcanzan valores mayores a +90 m. El proceso regresivo costero refleja valores de hasta -97 m y de -27 m en sitios de ambientes fluvio-marinos, eólico-marinos y zonas con modificación antrópica significativa. Para la localidad de Barra de Cazones, resaltan tres sectores. En el primero, se observa una regresión neta de la línea de costa de -16 m, justo donde se localiza Playa Chaparrales; el segundo sector, más extendido, comprende aproximadamente un 60% de la costa local, donde resaltan valores progradativos de hasta +26 m; y finalmente, el tercero, en su parte norte, y en el entorno de la barra fluvio-marina, cercana a la desembocadura

* Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C. P. 04510, Coyoacán, CDMX, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9462-5591>. Email: andi.mancera@gmail.com

** Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C. P. 04510, Coyoacán, CDMX, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3614-3284>. Email: danielmmgeos@gmail.com

*** Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C. P. 04510, Coyoacán, CDMX, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8056-8218>. Email: emilosgg21@gmail.com

**** Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C. P. 04510, Coyoacán, CDMX, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7853-7938>. Email: patym@igg.unam.mx

+ Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C. P. 04510, Coyoacán, CDMX, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1375-2776>. Email: santana@igg.unam.mx

del río Cazones, donde el proceso regresivo alcanza valores entre -16 y -27 m. En Palma Sola las tendencias generales muestran una progradación de la línea de costa, que alcanza su valor máximo en la playa Palma Sola, con +51.59 m para un periodo de 22 años. La regresión más significativa se localiza en los acantilados La Loma, con un valor de -28.29 m. A diferencia de los valores de las zonas progradativas, los valores regresivos corresponden con las costas abrasivas (La Loma y Miradores), a excepción de la desembocadura de la boca de la Barra Palma Sola y con menor intensidad en la aledaña Playa Andrea. Finalmente, en Villa Rica toda la costa abrasiva del tóbolo mantiene tasas de procesos regresivos. La mayor regresión se registró en el acantilado frontal del tóbolo de Villa Rica, con -17.03 m. Hacia el sur del tóbolo, se presentan los valores progradativos máximos de +90.27 m. El sector meridional muestra mayor dinamismo dado que los valores oscilan entre -12 m y +90 m, lo que se corresponde con las características de una costa acumulativa. Por otro lado, el resultado estadístico de la tasa de cambio de punto final (EPR), en el contexto regional, muestra que en el periodo de 2000 a 2011, la mayoría de los datos se encuentran en un intervalo de -1 a +2 m/año, con preferencia a valores progradativos. En el periodo de 2011 a 2017, el 50% de los datos se encuentran de -3 a +1 m/año. En sitios específicos el contexto estructuro-geológico, ya sean derrames lávicos frontales, como en Miradores-La Loma y el tóbolo de Villa Rica, o ascensos tectónicos de bloques costeros, como Barra de Cazones, en gran medida determina el desarrollo morfogenético del relieve costero y de su morfodinámica más reciente. Sus variaciones, según la tasa de punto final (EPR), indican que para las localidades de Palma Sola y Villa Rica el proceso más representativo es la progradación, mientras que para Barra de Cazones la regresión es más significativa. En general, la costa septentrional veracruzana evidencia un predominio de la tendencia al proceso progradativo, con aisladas localidades con presencia del proceso regresivo, que responden a condiciones físico-geográficas locales, determinadas por el contexto geólogo-geomorfológico y por la presencia de asentamientos humanos con actividades turístico-recreativas.

Palabras clave: morfodinámica costera, progradación y regresión, movimiento neto de línea de costa, tasa de punto final.

Abstract. The main objective of this paper is to calculate and evaluate the behavior of coastal morphodynamics in the northern coast of the state of Veracruz over the past 45 years (1973-2017) from regional and local perspectives. This study included three sites suitable for establishing engineering prototypes for the use of wave power and its conversion into electricity micro-generation in the coastal towns Barra de Cazones, Palma Sola, and Villa Rica. To this end, we used geospatial data of aerial photographs, orthophotos and satellite images for different years (1973, 1986, 1995, 2000, 2011, and 2017) to identify and demarcate the shoreline based on Boak and Turner (2005). Subsequently, this attribute was classified according to its prevailing process

(progradation or regression) in the DSAS module (USGS, 2012) to determine the shoreline change rates. Besides, a baseline was set to determine the potential future impacts of installing the engineering prototypes. According to the availability of inputs, the northern zone was approached regionally for the period 2000-2017, while Barra de Cazones and Palma Sola covered the years 1995-2017, and Villa Rica encompassed the years 1973-2017. The results in terms of the net shoreline movement (NSM) show an overall regional trend toward the prevalence of progradation in the northern coast. Progradation values reach up to +27 m near river mouths, dune fields, and anthropized areas, with figures higher than +90 m in some localities. Coastal regression shows values as high as -97 m and -27 m in fluvial-marine and wind-marine environments, as well as in highly anthropized areas. Barra de Cazones shows three distinctive sectors. The first shows a net shoreline regression of -16 m at Playa Chaparrales. The second sector, more widespread, comprises approximately 60% of the local coast, with progradation values of up to +26 m. Finally, the third sector, in its northern part around the fluvial-marine bar near the Cazones river mouth, shows a regressive process reaching values between -16 and -27 m. Palma Sola displays an overall trend towards shoreline progradation, reaching its peak value in Palma Sola beach, with +51.59 m over 22 years. The most significant regression is located in the La Loma cliffs, with -28.29 m. Unlike the figures found for the progradation zones, regressive processes correspond to abrasive coasts (La Loma and Miradores), except for the Barra Palma Sola mouth and, with less intensity, the adjacent Playa Andrea. Finally, in Villa Rica, the entire abrasive mound coastline maintains regressive process rates. The greatest regression was recorded in the front cliff of the Villa Rica mound, with -17.03 m. Maximum progradation values of +90.27 m occur to the south of the mound. The southern sector shows greater dynamism, with values from -12 m to +90 m, corresponding to the characteristics of a cumulative coastline. At a regional scale, the statistical result of the endpoint rate (EPR) shows that most data range from -1 to +2 m/year, dominated by progradation, in the period 2000-2011. In the period 2011-2017, 50% of the data varied from -3 to +1 m/year. At specific sites, the structural-geological context, whether frontal lavic spills (Miradores-La Loma and the Villa Rica mound) or tectonic ascents of coastal blocks (Barra de Cazones), largely determines the morphogenetic development of the coastal relief and its most recent morphodynamics. Its variations according to the end point rate (EPR) indicate that progradation is the dominant process in Palma Sola and Villa Rica, whereas regression is prevalent in Barra de Cazones. In general, the northern coast of Veracruz shows a predominance of progradation processes. Isolated localities show prevalent regressive processes in response to the local physical-geographic conditions, which are in turn determined by the geological-geomorphological context and the presence of human settlements related to tourist-recreational activities.

Palabras clave: coastal morphodynamics, progradation and regression, net shoreline movement, end point rate..

INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de los trabajos sobre la morfodinámica costera en México han sido elaborados en el siglo XXI, con la excepción de los estudios en el sector Punta Camarones-Cerritos, en las costas mazatlecas de Sinaloa (Montaño-Ley y Peraza-Vizcarra, 1986; Montaño-Ley y Gutiérrez-Estrada, 1987), en las costas campechanas (Ortiz-Pérez, 1988, 1992, 1994), en las planicies deltaicas tabasqueñas (Ortiz-Pérez y Benítez, 1996) y con una visión regional, en el Golfo de México y el Mar Caribe (Ortiz-Pérez y Méndez-Linares, 1999). Posteriormente, Ortiz-Pérez (2005), y Ortiz-Pérez y De La Lanza-Espino (2006) definen la delimitación y la clasificación de las regiones costeras mexicanas bajo criterios fisiográficos y geomorfológicos, y Carbajal-Domínguez (2010) y Botello *et al.* (2010) aportan nuevos datos sobre la vulnerabilidad costera nacional.

El panorama regional y local ha sido incursiado parcialmente por investigaciones en las dos últimas décadas: Hernández-Santana *et al.* (2008) y Barrios-Rodríguez (2012) en las costas tabasqueñas, Ruíz-Martínez *et al.* (2013) entre Cancún y Tulum, Jiménez-Orocio (2010) en algunas localidades de la costa veracruzana, González-Conchas (2011) en las playas de Mazatlán, Cruz-González (2012) en las costas de las Marismas Nacionales y Bustamante-Fernández *et al.* (2016) en la costa de Punta Diamante hasta la desembocadura del río Papagayo, Guerrero. A su vez, los estudios sobre los cambios morfológicos de la línea costera requieren de clasificaciones morfogenéticas del relieve para identificar y caracterizar los principales procesos geomórficos que la modelan. En el caso veracruzano existen algunas caracterizaciones y clasificaciones del relieve costero en los trabajos de Geissert y Dubbroeucq (1995), de Ortiz-Pérez (2005) y de Hernández-Santana *et al.* (2007, 2016), así como sobre los ambientes costeros (Moreno-Casasola, 2010; Martínez *et al.*, 2012), también delineados por los procesos de progradación y regresión. Estos trabajos complementaron las interpretaciones de los materiales aero-fotográficos y satelitales.

De acuerdo con Boak y Turner (2005), el establecimiento de la línea de costa y la evaluación de su morfodinámica resultan un campo de gran

significado científico y de planeación territorial, con un espectro que incluye, desde la generación de programas de manejo de recursos costeros hasta investigaciones de conservación, de estimación de vulnerabilidad y evaluación de peligros, de cálculo del impacto derivado de las actividades antrópicas y de modelación prospectiva de la evolución costera, según modelos de cambio climático e incremento en el nivel medio del mar.

La elevada tasa de cambio de la zona costera demanda análisis multifactoriales reiterados, a escalas de tiempo muy cortas (Davidson-Arnott, 2010; Aiello *et al.*, 2013; Rivera-Guzmán *et al.*, 2014), con la línea de costa como uno de los elementos morfológicos más dinámicos (Maiti y Bhattacharya, 2009) y cambiantes. A su vez, cada tipo de costa responde de forma directa a la acción modeladora de los procesos geomorfológicos, tanto terrestres como marinos; sobresalen en el estado veracruzano, los eólico-marinos, los fluviales, lacuno-palustres acumulativos y los abrasivos derivados del oleaje. En este trabajo se clasifican según su componente acumulativo o abrasivo, de acuerdo con Boak y Turner (2005), Stanica *et al.* (2010) y Gómez *et al.* (2014).

La determinación de los cambios en la línea de costa en diferentes temporalidades es uno de los principales elementos para identificar modificaciones en la dinámica litoral (Dolan *et al.*, 1991). Uno de los métodos con mayor aplicación en la actualidad es el módulo DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*), herramienta automatizada que permite conocer estadísticas de cambio espacial de la línea costera, a partir de diversos períodos temporales obtenidos de manera digital o automatizada, con el apoyo de técnicas de percepción remota y métodos indirectos, cuya ventaja es que el procedimiento se puede adaptar a diferentes tipos de costa (Thieler y Danforth, 1994; Fletcher *et al.*, 2003; Ojeda-Zújar *et al.*, 2009; Jiménez-Orocio, 2010; Ford, 2013; Bustamante-Fernández *et al.*, 2016; Martín-Prieto *et al.*, 2016).

El objetivo cardinal del presente trabajo es calcular y evaluar el comportamiento de la morfodinámica costera en el litoral septentrional del estado de Veracruz, al sur de la ciudad homónima y hasta el sur de la laguna de Tamiahua, durante los

últimos 45 años (1973-2017). Además, persigue el propósito científico aplicado de establecer una línea base costera, que permita determinar a futuro los posibles impactos directos o indirectos, derivados de la instalación de prototipos ingenieriles para el aprovechamiento de la energía undimotriz para su conversión en micro-generación eléctrica en asentamientos costeros. Las localidades acantiladas abrasivas, conocidas como Barra de Cazones (donde destacan los bloques neotectónicos cercanos a la barra y Punta Pulpo), Miradores (Palma Sola) y el tómbolo de Villa Rica, fueron evaluadas por su alto nivel de idoneidad geólogo-geomorfológica y geotécnica para los enclaves ingenieriles en la costa.

ÁREA DE ESTUDIO

La zona costera del litoral septentrional del estado de Veracruz, analizada en este trabajo, abarca desde la desembocadura del río Tuxpan ($20^{\circ}50'28.54''N$ - $97^{\circ}14'32.81''W$) hasta la desembocadura del río Jamapa, en la ciudad portuaria de Veracruz ($19^{\circ}6'9.45''N$ - $96^{\circ}5'53.92''W$), con una longitud aproximada de 246 km (Figura 1.A). Pertenece a la costa centro-oriental del Golfo de México, donde predominan las costas acumulativas de inclinación suave y amplía que favorece la formación de campos de dunas y extensas playas (Ortiz-Pérez, 2005).

Por otra parte, el análisis morfodinámico incluye tres localidades idóneas para el aprovechamiento de la energía del oleaje. La localidad de Barra de Cazones, entre los $20^{\circ}43'12''$ y los $20^{\circ}43'33''$, de latitud norte, y los $97^{\circ}12'36''$ y $97^{\circ}12'44''$, de longitud oeste (Figura 1.B), en el municipio de Cazones de Herrera. Este sitio se ubica en la subprovincia Llanura Costera del Golfo Norte, caracterizada por un régimen intenso de sedimentación con el predominio de costas acumulativas, aunque el caso de Barra de Cazones es una excepción para toda la región veracruzana por estar enclavado en la estructura de un bloque neotectónico ascendente, con estructura monoclinal, única morfoestructura de este tipo en todo el sector costero.

El segundo sitio se corresponde con los acantilados denominados Miradores, cercanos al poblado

de Palma Sola, en el municipio de Alto Lucero de Gutiérrez Bravo, entre los $19^{\circ}45.7'90''$ y los $19^{\circ}47'29.98''$, de latitud norte y los $96^{\circ}24'44.47''$ y los $96^{\circ}25'35.43''$, de longitud oeste (Figura 1.C), y la tercera localidad, más al sur, se corresponde con el tómbolo de Villa Rica, en el litoral norte del municipio de Actopan, que se sitúa entre los $19^{\circ}41'17.36''$ y los $19^{\circ}40'7.25''$, de latitud norte, y los $96^{\circ}24'2.53''$ y los $96^{\circ}23'54.60''$, de longitud oeste (Figura 1.D). En estos últimos sitios se encuentra la Sierra de Chiconquiaco, cuyo litoral conforma una costa mixta de acantilados y playas abiertas al mar, con algunos campos de dunas (Ortiz-Pérez y De La Lanza-Espino, 2006).

Desde el punto de vista geólogo-tectónico, la región representa el extremo oriental del Cinturón Volcánico Mexicano, de gran variabilidad de estilos eruptivos y composición química de sus productos, con dirección preferencial E-W, en su porción centro-oriental (Ferrari, 2000; Ferrari *et al.*, 2005; Gómez-Tuena *et al.*, 2003). En esta zona predominan rocas basálticas alcalinas, litologías andesíticas de 19 a 10 Ma (Gómez-Tuena *et al.*, 2005), además de rocas sedimentarias como areniscas carbonatadas terciarias y depósitos poligenéticos cuaternarios, de origen fluvial, eólico-marino, y lacuno-palustre.

El clima predominante es cálido subhúmedo, con una temperatura media anual de $22^{\circ}C$ a $26^{\circ}C$ y con precipitaciones que oscilan entre los 1000 y 1500 mm (García-Amaro, 2004). La localización geográfica del litoral lo expone al impacto recurrente de fenómenos hidrometeorológicos, como ondas del este, tormentas ciclónicas y huracanes en verano y otoño, mientras que en los meses de invierno es afectada por intensos frentes fríos "nortes" (Ortiz-Pérez y De La Lanza-Espino, 2006). Este régimen diferenciado de vientos determina la dinámica del oleaje, con tres direcciones predominantes (NE-SW, E-W, SE-NW), con alturas promedio de 0.5 a 1.5 m, en primavera y otoño, y de 1.5 a 4 m, en verano e invierno (Ortiz-Pérez, 2005).

El régimen de mareas es diurno, con una oscilación promedio de 0.06975 m; la pleamar en promedio es de 0.85025 m y la bajamar es de -0.7805 aproximadamente (SMN, 2017). En general, la amplitud de la marea es pequeña a lo largo de todo el Golfo de México.

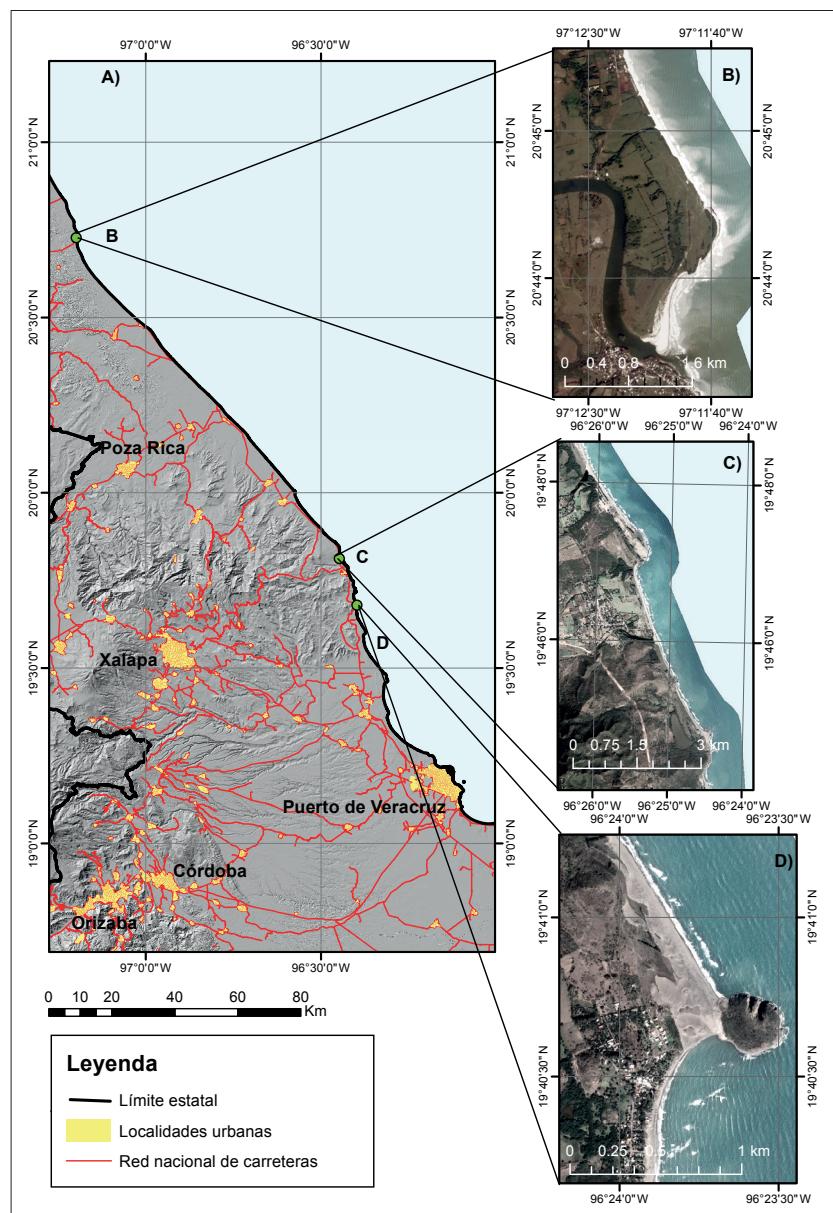


Figura 1. Localización de la zona de estudio. A. Costa septentrional de Veracruz; B. Barra de Cazones; C. Palma Sola; D. Villa Rica. Fuente: elaboración propia, usando como referencia imagen Spot (2017).

MATERIALES Y MÉTODOS

El diagnóstico y la evaluación morfodinámica costera se basó en la comparación entre las líneas de costa en un período máximo de 45 años, a partir de datos históricos y materiales aero-fotográficos y satelitales recientes, como demuestran su aplicación en otros estudios (Dolan *et al.*, 1991; Moore *et al.*, 2006). Según la disponibilidad de los insumos, la

zona norte se abordó de manera regional conforme al período 2000-2017, las localidades Barra de Cazones y Palma Sola abarcan la misma temporalidad (1995-2017), y Villa Rica incluye el período 1973-2017. Para el análisis morfodinámico de los sitios idóneos se tomaron más de dos km al norte y al sur de su localización. Este criterio pretende, además de evaluar los cambios, establecer una línea base para el futuro monitoreo de las playas, después del enclave

de los prototipos ingenieriles o redes (granjas) para el aprovechamiento de la energía undimotriz y valorar sus potenciales impactos en la dinámica sedimentaria costera y en los ecosistemas marinos.

Se emplearon fotografías aéreas, a escala 1:70 000 (INEGI, 1973) y 1:75,000 (INEGI, 1986, 1995), georreferenciadas mediante puntos de control en el sistema de información geográfica ArcGIS 10.2 (ESRI, 2013). Se agregaron un mínimo de 10 puntos de control hasta obtener un error cuadrático medio de ($ECM < 1$); el tamaño de pixel de la rasterización se ubicó en 1.8 m, debido al tamaño de la fotografía y su relación con la escala respectiva (en ambos casos quedó en 1.8 con diferencias centesimales). Además, se interpretaron las ortofotos digitales a escala 1:20 000 (INEGI, 2000) con una resolución espacial de 1.5 m por pixel, e imágenes de satélite *RapidEye* (RAPIDEYEAG, 2011) y SPOT 7 (Spot Image, 2017), con una resolución de 5 y 1.5 m respectivamente.

Previo a la delimitación y digitalización de la línea de costa, se clasificó la misma bajo un enfoque tipológico, de acuerdo con los criterios de Shepard (1963), Bird (2008), Davidson-Arnott (2010) y Masselink *et al.* (2011), que incluyen costas abrasivas, acumulativas y biogénicas. La tipología se elaboró con base en la visualización remota de la línea costera, los datos estimados de marea y el reconocimiento descriptivo en campo de sus componentes. Para la digitalización de la línea costera se conjugó la tipología con algunos de los 16 parámetros establecidos por Boak y Turner (2005) (Figura 2), los cuales fueron seleccionados según la calidad, la escala y la resolución de los insumos (Maiti y Bhattacharya, 2009; Ojeda-Zújar *et al.*, 2013; Oyedotun, 2014). La digitalización se elaboró a una escala 1:7000 con una línea de 1 punto de grosor, en el software ArcGis 10.2 (ESRI, 2013).

Obtenidas las líneas de costa para las diferentes temporalidades, se analizaron las tasas de cambio,

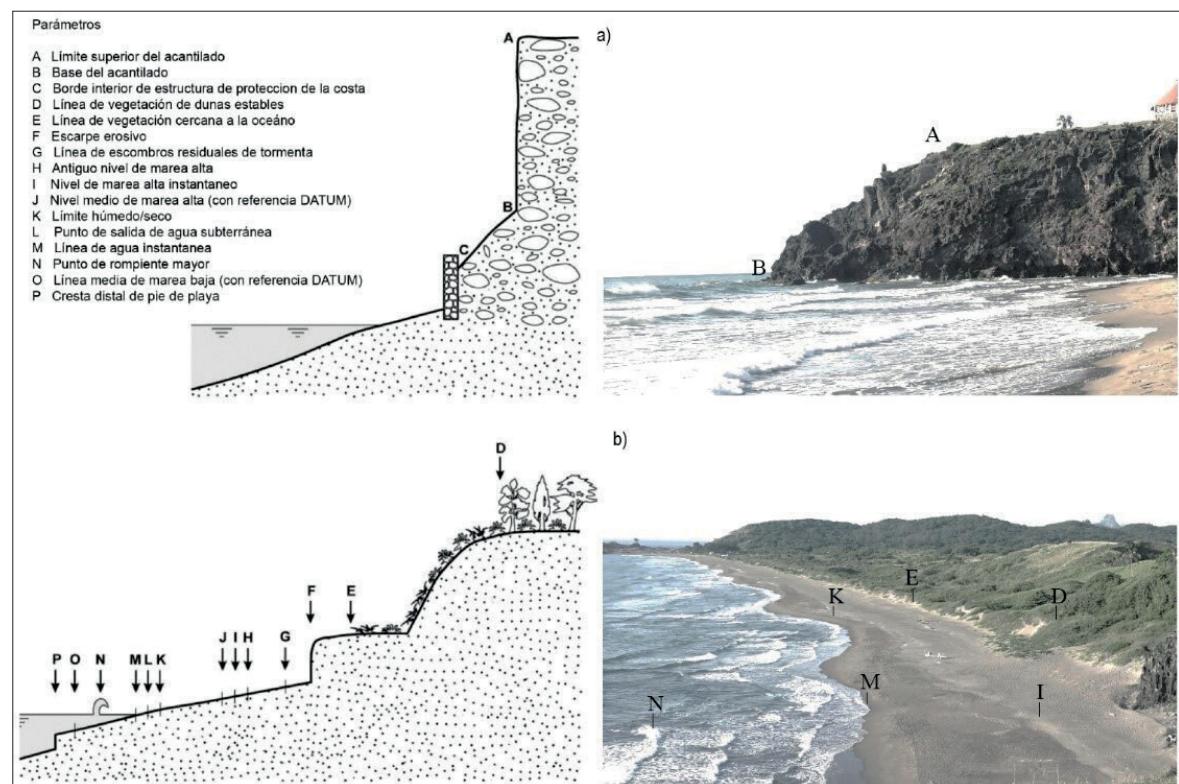


Figura 2. Parámetros de digitalización de la línea de costa. a) Costa abrasiva; b) Costa acumulativa. Fuente: modificada de Boak y Turner (2005).

con la herramienta DSAS (USGS, 2012) implementada para ArcGIS 10.2 (ESRI, 2013), la que se ha “utilizado por muchos investigadores para medir, cuantificar, calcular y monitorear las estadísticas de la tasa de cambio de la costa desde múltiples posiciones y fuentes históricas de la costa” (Sheeja *et al.*, 2016). Los transectos que genera el cálculo parten de una línea base creada con un *buffer* de distancia específica para cada zona de estudio, desde la línea de costa proximal al continente: 200 m en el análisis regional, 30 m para Cazones y Palma Sola, 30 m para la parte acumulativa y 10 m para la abrasiva de Villa Rica; la longitud de los transectos desde la línea base es de 400 m, separados entre sí cada 200 m para el cálculo regional, 50 m para Cazones y Palma Sola con espaciado de 5 m, y para Villa Rica 150 m cada 5 m.

De este análisis se desprenden las estadísticas conocidas por sus siglas en inglés como NSM (movimiento neto de la línea de costa), que representa la diferencia entre la primera y la última línea de costa, según el parámetro de temporalidad (Thieler *et al.*, 2009), y el EPR (Tasa de punto final), que calcula el movimiento de la línea de costa anual (Ford, 2013; Martín-Prieto *et al.*, 2016). Ambas estadísticas se calcularon con un intervalo de confianza del 95%, y los procesos de progradación y regresión, se representaron en valores positivos y negativos respectivamente. Estos valores expresan las variaciones del cambio general de la línea de costa conforme a los transectos perpendiculares, creados a partir de la línea base y del cálculo de la incertidumbre. Cabe mencionar que aquellos transectos perpendiculares a la línea de costa que resultaron con valores nulos no se consideraron en el análisis final de las tasas de cambio. El NSM es representado cartográficamente, mientras que el EPR se muestra en los resultados como diagramas de caja (*boxplots*) con el fin de poder interpretar los diferentes períodos calculados, según los insumos (1975-1995, 1995-2000, 2000-2011 y 2011-2017).

En este caso, el cálculo de la incertidumbre se realizó a partir de la referencia de Fletcher *et al.* (2003) y Martín-Prieto *et al.* (2016), como se muestra en (A) y, por otro lado, el cálculo de la incertidumbre total estandarizada de Miranda (2001) en (B), que se representa por línea y

por periodo, según se muestra en las ecuaciones siguientes:

- A) Incertidumbre de cada línea digitalizada (modificada de Fletcher *et al.*, 2003; Martín-Prieto *et al.*, 2016):

$$U_n = \pm \sqrt{RMS^2 + O^2 + t^2 + TP^2 + S^2}$$

- B) Incertidumbre total estandarizada (adaptada de Miranda, 2001):

$$U_c = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2}$$

Donde:

U_n = Es el cálculo de la incertidumbre de cada uno de los insumos, según parámetros propios de la fuente de información, georreferencia y digitalización.

RMS= Corresponde al error cuadrático medio de la digitalización (aplica para fotografías aéreas no referenciadas espacialmente con anterioridad).

O= Es la desviación estándar de la suma de los cocientes de la multiplicación del tamaño del pixel por 1 cm, entre la escala original. En el caso de las imágenes de satélite, el tamaño de pixel únicamente se multiplicó por 1.

t = Variación de la marea, es decir, la diferencia entre la pleamar y la bajamar pronosticada en un día (datos obtenidos del Servicio Mareográfico Nacional, SMN (2017), para cada uno de los años).

TP= Tamaño del pixel.

U_c = Corresponde a la raíz cuadrada de la sumatoria de las incertidumbres obtenidas, elevadas al cuadrado. Se elabora por períodos particulares y para el total.

S= Variación estacional de la marea (m), entendida como la diferencia entre la pleamar media y la bajamar media (datos obtenidos del Servicio Mareográfico Nacional (2017) para cada uno de los años).

U_c =Corresponde a la raíz cuadrada de la sumatoria de las incertidumbres obtenidas, elevadas al cuadrado. Se elabora por períodos particulares y para el total.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cambios morfodinámicos de la línea costera Tendencias a nivel regional, en el periodo 2000-2017

La tendencia regional para las costas septentrionales de Veracruz indica que existe un predominio a la progradación durante esta temporalidad. El análisis automatizado arrojó el trazado de 1190 transectos perpendiculares a la línea de costa, de los cuales 654 poseen valores progradativos de hasta +27 m ubicados cerca de las desembocaduras fluviales, de campos de dunas, e inclusive en áreas antropizadas,

aunque en algunas localidades alcanzan valores mayores a +90 m. El proceso regresivo costero refleja valores de hasta -97 m, y de -27 m en sitios de ambientes fluvio-marinos, eólico-marinos y zonas con modificación antrópica significativa. El valor de incertidumbre calculado para esta comparación fue de ± 7.26 m (Figura 3).

El resultado estadístico de la tasa de cambio de punto final (EPR) muestra que en el periodo de 2000 a 2011 la mayoría de los datos se encuentran en un intervalo de -1 a +2 m/año con preferencia hacia valores progradativos; como valores extremos se localiza un intervalo entre -5 y +6 m/año, y va-

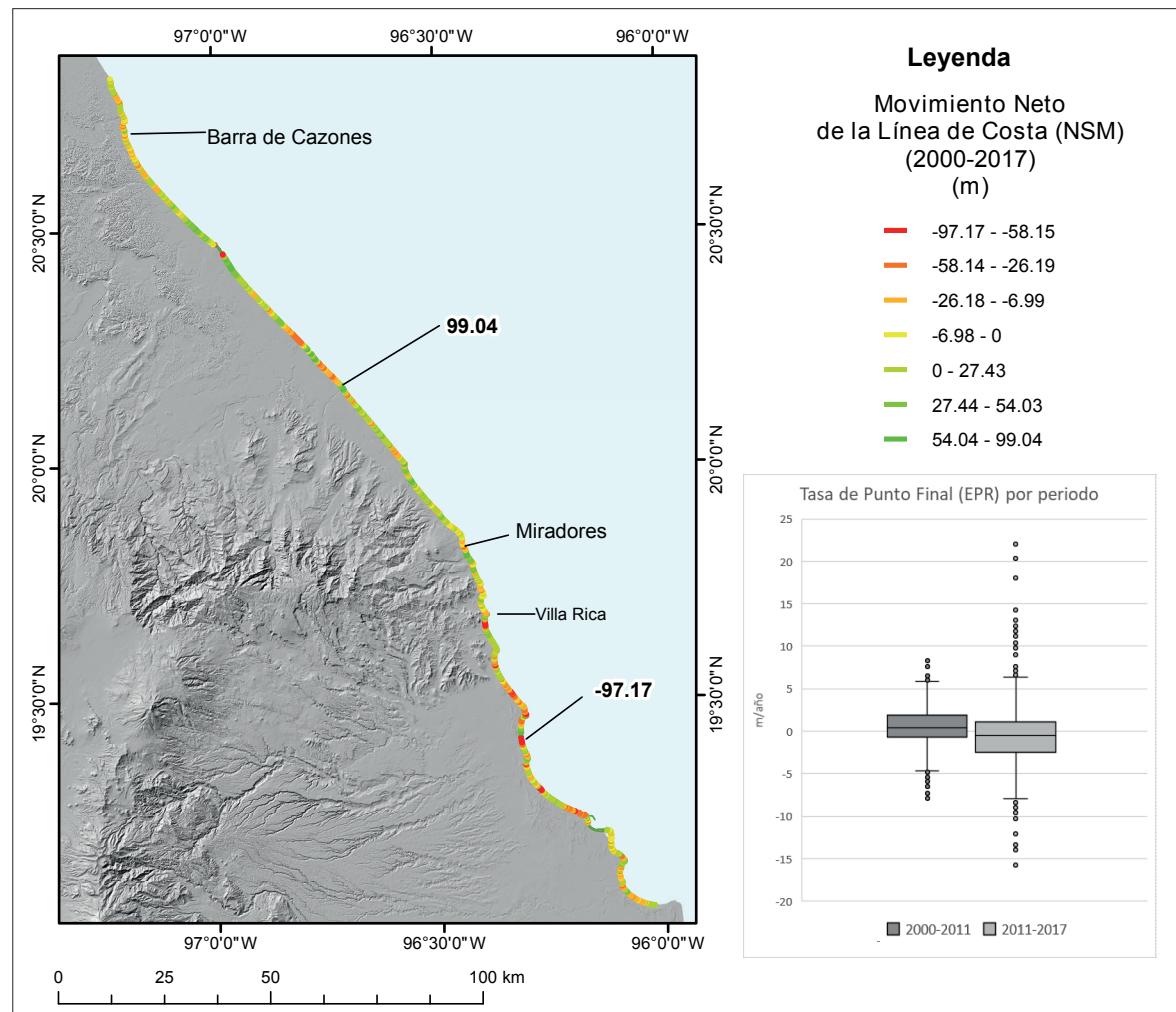


Figura 3. Variación de la línea costera septentrional de Veracruz (2000-2017) y tasa de cambio anual por períodos (2000-2011 y 2011-2017). Fuente: elaboración propia, usando como referencia imagen Spot (2017).

lores atípicos que no rebasan el intervalo de -10 a +10 m/año. Por otra parte, en el periodo de 2011 a 2017, el 50% de los datos se encuentran de -3 a +1 m/año, con valores extremos de -8 a +5.5 m/año, además de presentar una mayor cantidad de valores anómalos de hasta -16 y +22 m/año (Figura 3).

Como se puede observar en los resultados de las tasas de cambio (Figura 3), el sesgo interpretativo aumenta, debido a la longitud de la costa analizada y a la distancia entre los transectos. Por esta razón, se realizó la evaluación a una escala local de los tres sitios seleccionados: Barra de Cazones, Miradores (Palma Sola) y tómbolo de Villa Rica.

Tendencias en Barra de Cazones en el periodo 1995-2017

El diagnóstico morfodinámico en Barra de Cazones, durante un periodo de 22 años, denota tres sectores. En el primero se observa una regresión neta de la línea de costa de -16 m, justo donde se localiza Playa Chaparrales; el segundo sector, más extendido, comprende aproximadamente un 60% de la costa local, donde resaltan valores progradativos de hasta +26 m, y, finalmente, el tercero, en su parte sur y en el entorno de la barra fluvio-marina, cercano a la desembocadura del río Cazones, donde el proceso regresivo alcanza valores entre -16 y -27 m. Al sur de esta desembocadura se levanta el escarpe abrasivo marino, donde se asienta el poblado de Barra de Cazones (Figura 4). Esta localidad es prácticamente la única evidencia de ascensos neotectónicos costeros durante el Cuaternario (Hernández-Santana *et al.*, 2007); otros frentes acantilados en otras regiones costeras veracruzanas están esculpidos en derrames lávicos, con edades aproximadas entre 15 y 10 Ma, según Gómez-Tuena *et al.* (2003) y Ferrari *et al.* (2005).

En este sitio se generaron 972 transectos. La incertidumbre estandarizada total utilizada es de ±7.52 m (Figura 4). Los resultados por periodo de 1995 a 2000 muestran una tendencia general entre -1 y +1 m/año, con valores extremos de -5 a +5 m/año; el periodo de 2000 a 2011 favorece en mayor medida a la regresión con una mayor cantidad de transectos en el intervalo -1.5 a +0.5 m/año, con valores extremos de hasta -4.2 y 2 m/año. Por último, el intervalo de valores obtenidos

en los transectos para el periodo 2011 a 2017 se extiende, con una mayor densidad de datos entre -1.75 y +1.75 m/año, con una tendencia a la progradación en esta última temporalidad (Figura 4).

Tendencias en Palma Sola durante el periodo 1995-2017

Cercano al poblado de Palma Sola existe un acantilado denominado Miradores, seleccionado como sitio idóneo para los enclaves ingenieriles. Se generaron de forma automatizada 1036 transectos perpendiculares a la costa con una incertidumbre total estandarizada de ±7.42 m.

Las tendencias generales para el NSM (Figura 5) muestran una progradación de la línea de costa, que alcanza su valor máximo en la playa Palma Sola, entre los paralelos 19°46'30"N y 19°47'00"N, con +51.59 m para un periodo de 22 años. Los valores de máxima acreción, que van de +27.59 a +51.59 m, se distribuyen aproximadamente a un km hacia el norte y sur del centro de la playa.

La regresión más significativa se localiza en los acantilados La Loma, al norte, con valor de -28.29 m. Valores similares, se encuentran en los acantilados Miradores, situados al sur. A diferencia de los valores de las zonas progradativas, los valores regresivos corresponden con las costas abrasivas (La Loma y Miradores), a excepción de la desembocadura de la Barra Palma Sola y con menor intensidad en Playa Andrea, al sur.

Los resultados de la tasa de punto final (EPR) muestran que en los tres periodos analizados la mayoría de los datos no rebasan los valores de ±2 m/año. Para la temporalidad 1995-2000, los datos se agrupan en el intervalo de ±1.2 m/año, con una ligera preferencia de valores regresivos; los valores extremos alcanzan los ±4.5 m/año, y los datos atípicos llegan hasta -7.4 y +5.5 m/año. En el periodo 2000-2011 la mayoría de los datos se encuentran en el intervalo de +0.4 a -1.5 m/año, con una tendencia principalmente regresiva, y con valores extremos de +1.9 m/año y -4.2 m/año; esta temporalidad presenta solo un dato atípico, que corresponde a -4.6 m/año. Finalmente, en el periodo 2011-2017, los datos se agrupan en el rango de ±1.6 m/año, con una ligera tendencia hacia la progradación y valores extremos que llegan

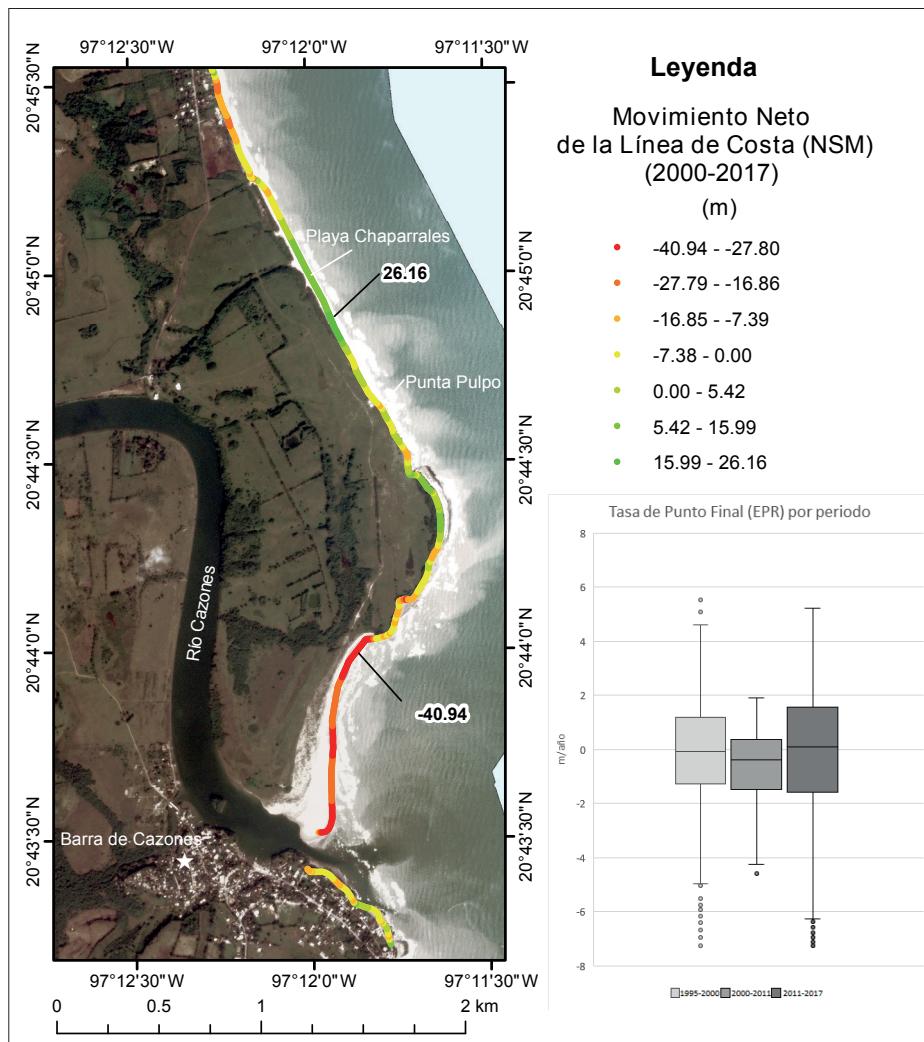


Figura 4. Variación de la línea costa en Barra de Cazones (1995-2017) y tasa de cambio anual por periodo. Fuente: elaboración propia, usando como referencia imagen Spot (2017).

a -6.2 y +5.2 m; los valores anómalos alcanzan -7.4 m/año (Figura 5).

Tendencias en Villa Rica en el periodo 1973-2017
 La evaluación morfodinámica circundante al tóbolo de Villa Rica (Figura 6), se sustentó en el análisis estadístico de cinco líneas de costa, en un periodo de 45 años. Para el cálculo se generaron 678 transectos, con una incertidumbre estandarizada de $\pm 7.82\text{m}$.

La mayor regresión se registró en el acantilado frontal del tóbolo de Villa Rica, con -17.03 m,

con una velocidad promedio de -0.38 m/año. Toda la costa abrasiva del tóbolo mantiene tasas de procesos regresivos. Hacia el sur del tóbolo se presentan los valores progradativos máximos de +90.27 m, con una velocidad promedio de +2.05 m/año, mientras que al norte los valores oscilan entre -15 y +38 m/año, con velocidades de -0.34 y +0.86 m/año respectivamente.

El sector meridional muestra mayor dinamismo, dado que los valores oscilan entre -12 m y +90 m, lo que se corresponde con las características de una costa acumulativa y muestra de una tendencia

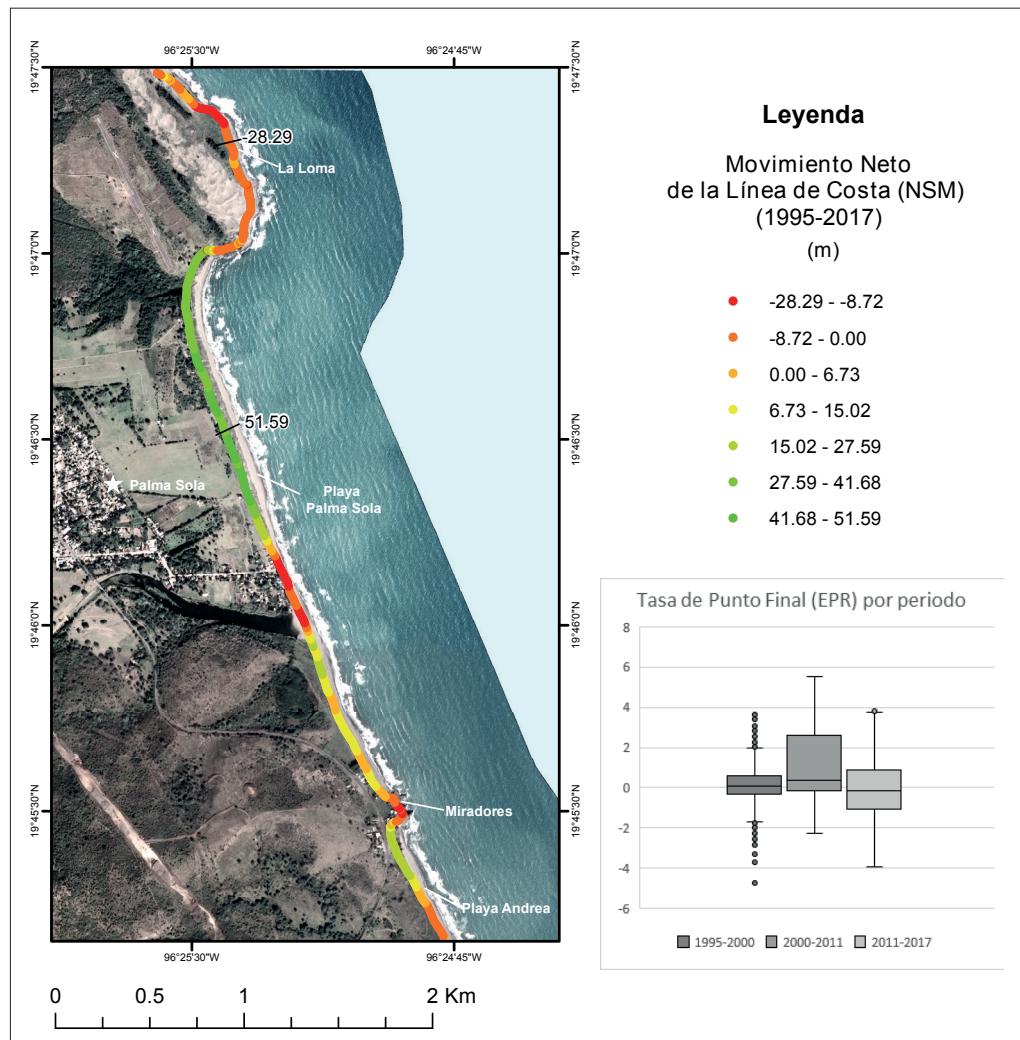


Figura 5. Variación de la línea costa en Palma Sola (1995-2017) y tasa de cambio anual por periodo. Elaboración propia, usando como referencia imagen Spot (2017).

a la acreción, dinámica que se corresponde con las características geomórficas e hidrodinámicas de la costa (Figura 6).

Los *boxplots* por períodos reflejan que en los 44 años se mantiene una tendencia progradativa, con valores promedio entre -1 y +1.5 m/año, sin embargo, el periodo 2000-2011 presenta la mayor tasa promedio de regresión (-4.55 m/año en su valor extremo) en las playas al norte del tómbolo. El periodo entre los años 1986 y 2000 resultó el más estable en la morfodinámica, mientras la modificación máxima de la línea costera se observó durante

el periodo 2011-2017, con un predominio a la progradación, respondiendo a la dinámica natural o a la calidad de los insumos, aunque manifiesta la tendencia progradativa de la costa septentrional veracruzana (Figura 6).

DISCUSIÓN

De acuerdo con la tipología morfogenética de la costa septentrional de Veracruz, los procesos progradativos regionales están asociados a amplias

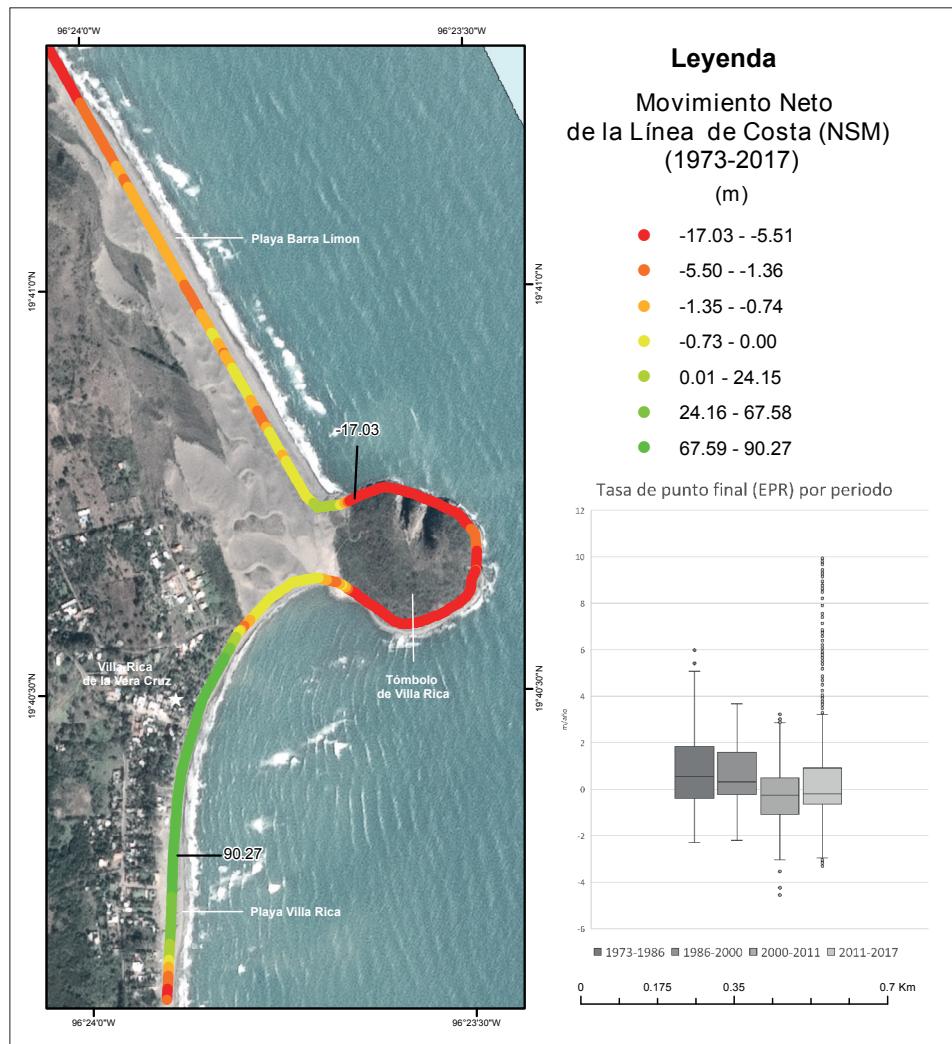


Figura 6. Variación de la línea costa en Villa Rica (1973-2017) y tasas de cambio anual por periodo. Elaboración propia, usando como referencia imagen Spot (2017).

franjas acumulativas de origen eólico-marino, eólico y fluvio-lacustre, y los regresivos a sectores abrasivos y con notable influencia antrópica, así como en localidades con diferenciación litológica de arenas calcáreas miocénicas y conglomerados y sedimentos fluviales cuaternarios, más favorables a la abrasión selectiva del oleaje (Figura 3). De manera general, se observan valores progradativos extremos de hasta +20 m/año y regresivos de hasta -16 m/año.

A diferencia de la tendencia en el litoral tabasqueño, correspondiente al periodo de 1943-

1995, donde predomina el retroceso de la línea de costa con valores de hasta de -9 a -11 m/año (Hernández-Santana *et al.*, 2008), la tendencia progradativa del litoral veracruzano se cimienta en los procesos eólico-marinos que modelan los rasgos morfogenéticos de las llanuras acumulativas costeras, a la configuración prácticamente rectilínea y continua de la línea de costa centro-septentrional del estado, y a los grandes volúmenes de sedimentos fluviales de ríos continentales, como el Pánuco, Tuxpan, Cazones, Tecolutla, Actopan, La Antigua y Jamapa, distribuidos por las corrientes litorales

para finalmente favorecer el desarrollo de extensos campos de dunas.

En esta región del Golfo de México el oleaje es constante e intenso y se incrementa por el frecuente embate de fenómenos hidrometeorológicos como los “Nortes” y las tormentas tropicales, por lo que la tasa de cambio no es homogénea en toda la costa, por ello el 45% de los transectos presenta valores negativos, con una tasa de retroceso promedio de -1.15 m/año, similar a lo observado en la costa de Texas, donde en el periodo comprendido entre 1930 y 2007, la tasa de cambio promedio fue de -1.24 m/año de regresión, con valores que superan los -5.5 m/año (Paine *et al.*, 2011). En los estados de Mississippi y Florida las tasas fueron de ± 1.8 m/año y de ± 0.9 m/año respectivamente. Para Louisiana en periodos temporales (fines de 1800 hasta el 2002), el retroceso promedio fue de -2.78 m/año, con la tasa de cambio más alta entre -8.2 y ±4.4 m/año (Morton *et al.*, 2004).

Los valores máximos de regresión en la línea costera están asociados principalmente a la erosión de playas arenosas con alta presencia de actividades antrópicas, como ocurre en la zona del puerto de Veracruz, y a los ambientes de dominancia fluvio-marina donde se presentan valores superiores a -27 m y hasta -40.94 m, como ocurre en Barra de Cazones. Construcciones portuarias, basadas en el dragado de grandes volúmenes de sedimentos, podrían determinar regresiones costeras de centenares de metros, como ocurrió en el puerto y la zona industrial de Yanbu Al Sinaiyah, en Arabia Saudita, con valores entre -37.9 y -203 m/año (Jelil, 2020), aspectos que deben considerarse en la estrategia de desarrollo portuario estatal, sobre todo en la zona del actual puerto de Veracruz.

La influencia antrópica en la dinámica de la costa es un proceso común en las costas del Golfo de México, tal como se aprecia en los frentes deltaicos de los estados de Tabasco y Campeche, con una tasa media de -8 m/año durante el periodo de 1943 a 1984, tendencia que se mantiene hasta inicios del siglo XXI (Hernández-Santana *et al.*, 2008), también inducido por la destrucción del bosque de manglares en la costa. De igual manera, Kilar y Çiçek (2018) reportan erosión máxima de -38 m/año (1984-2017) en la costa del delta

Göksu, Turquía, en la desembocadura del río y en los cordones costeros de cuerpos lagunares, debido a esta influencia antrópica; al igual que en el delta Medjerda, en Túnez, con regresión de -42.6 m/año (Louati *et al.*, 2015) y el delta del río Kizilirmak, en Turquía, con regresión de -27.4 m/año (Ozturk *et al.*, 2015). Esto constituye una evidencia clara del papel que juega el manglar en la protección costera.

En la costa oriental de Ghana y en sus estuarios, Appeaning *et al.* (2011, 2020) también reportan regresiones de -2 a -2.19 m/año, debido al desarrollo de rompeolas y espigones, al aumento de la presión sobre la escasez de tierra, la extracción de arena, la retención sedimentaria en embalses y la destrucción de manglares, esto último también ha sido un factor común en las playas de Watamuarea, Kenia, donde Alemayehu *et al.*, (2014) registraron una regresión de -0.7 m/año a -30.3 m/año entre 1969 y 2010 (41 años), debido a la destrucción de la vegetación autóctona y la construcción de diques; de igual manera, De Gouveia (2001) encontró valores regresivos de -1 m/año en las costas de San Pablo, Brasil, por urbanizaciones aledañas al mar y extracción de arena, aspectos que aún no son extremadamente graves en las costas septentrionales de Veracruz, pero deben ser consideradas en las estrategias de planeación actuales y futuras.

Por otra parte, algunos de los valores progradativos máximos que superan los +90 m, como son los casos de Playa Villa Rica y Palma Sola, se deben a condiciones de relieve con muy bajo gradiente, con procesos acumulativos fluviales y de inundación lagunar. Esta dinámica lacuno-palustre y deltaica es similar en la boca del Río Grijalva (Ramos-Reyes *et al.*, 2016a, 2016b).

El contexto estructuro-geológico, ya sean derrames lávicos frontales, como en Miradores-La Loma y el tóbolo de Villa Rica, o ascenso de bloques costeros, como Barra de Cazones, en gran medida determina el desarrollo morfogenético del relieve costero y de su morfodinámica más reciente. Sus variaciones, según la tasa de punto final (*EPR*), indican que para las localidades de Palma Sola y Villa Rica el proceso más representativo es la progradación, mientras que para Barra de Cazones la regresión es más significativa, lo que indica un

cambio en la tendencia de la dinámica general. A su vez, la presencia de extensos sectores progradativos en la costa septentrional veracruzana, presenta implicaciones ambientales para los humedales costeros, al dificultar el intercambio hídrico entre los cuerpos lagunares y el ambiente marino, lo que requiere un monitoreo frecuente.

En Barra de Cazones, el proceso regresivo predomina en la barra fluvio-marina de la desembocadura del río Cazones, así como en las costas abrasivas del bloque tectónico homónimo, con procesos abrasivo-gravitacionales, que amenazan a las construcciones civiles aledañas a futuro. La costa progradativa resalta hacia el norte de Punta Pulpo, con la excepción de playa Chaparrales, donde la regresión alcanzó entre -27.80 a -40.94 m, en los últimos 17 años.

La localidad de Palma Sola reporta una tendencia general a la progradación, a lo largo de 22 años, con valores entre +41.68 y +51.59 m, pero con sitios de regresión que alcanzan entre -8.72 y -28.29 m, controlados por la configuración de la costa, comprendida entre zonas abrasivas acantiladas, como La Loma, al norte, y Miradores, al sur. Estudios realizados por Pérez-Alberti *et al.* (2013) en las costas abrasivas acantiladas de Galicia, España, reportaron valores de regresión de -22 m en 50 años, muy similares a Miradores, aunque la energía del oleaje en aquel escenario es superior. En Miradores el oleaje es menos intenso, pero la litología quizás favorece tales retrocesos. Otros sectores rocosos en Galicia experimentaron regresiones de -1.18 a -0.8 m/año.

Los valores progradativos, al sur del tóbolo de Villa Rica entre +67.59 y +90.27 m, exponen una correspondencia directa con la morfogénesis acumulativa eólico-marina del relieve costero, obedeciendo a la dinámica general de la formación de los tómbolos; sin embargo, idéntico relieve al norte del tóbolo, con notable desarrollo dunar, refleja una regresión significativa entre -1.35 y -17.03 m. Esta realidad obedece al permanente e intenso transporte de sedimentos desde el litoral hacia las cadenas de dunas por los vientos alisios, los que poseen un intenso *fetch*, debido a la frecuencia, longitud de incidencia, velocidad y dirección constantes de sus flujos en el Golfo de México durante

gran parte del año. En sentido opuesto, el frente acantilado del tóbolo registra valores regresivos del movimiento neto de la costa de alrededor de -5.51 m, con sitios aislados de hasta -17 m durante estos 45 años, debido a la concentración energética del oleaje en el promontorio.

CONCLUSIONES

Las zonas costeras constituyen ambientes altamente dinámicos por su posición interactiva entre múltiples condiciones, procesos y fenómenos terrestres, marinos, atmosféricos extremos y antrópicos, que determinan cambios de su configuración y morfología en períodos cortos de tiempo. Por ello, su evaluación es clave para comprender las tendencias de su morfodinámica y establecer criterios para la planeación y el manejo integrado costero, bajo la óptica del aprovechamiento sustentable, la preservación, la protección y la restauración, en casos extremos.

La costa septentrional veracruzana evidencia un predominio de la tendencia al proceso progradativo con aisladas localidades con presencia del proceso regresivo, que responden a condiciones físico-geográficas locales, determinadas por el contexto geólogo-geomorfológico y por la presencia de asentamientos humanos y actividades turístico-recreativas. No obstante, el análisis por períodos refleja un discreto aumento de los procesos regresivos costeros, fundamentalmente en los entornos del tóbolo de Villa Rica y de Miradores, en Palma Sola. Las modificaciones extremas de la línea de costa se localizan en las cercanías de desembocaduras fluviales y en sectores costeros antropizados.

Los resultados locales y regional obtenidos constituyen líneas base para integrar sus datos a estudios multidisciplinarios aplicados a las costas septentrionales veracruzanas y los indicadores funcionan como elementos de la morfodinámica costera en un contexto evolutivo del relieve.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, y a la Secretaría de Energía, el

apoyo presupuestario al proyecto 249795 “Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano (CEMIE_O)”, así como al Instituto de Geografía de la UNAM, por el apoyo en infraestructura y automotor para las investigaciones. A los árbitros anónimos, el reconocimiento por sus valiosos comentarios y acertadas sugerencias durante el proceso de dictaminación.

REFERENCIAS

- Aiello, A., Canora, F., Pasquariello, G. y Spilotro, G. (2013). Shoreline Variations and coastal dynamics: A space-time data analysis of the Jonian litoral, Italy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 129, 124-135. DOI: 10.1016/j.ecss.2013.06.012
- Appeaning Addo, K., Jayson-Quashigah, P. N. y Kufogbe, K. S. (2011). Quantitative Analysis of Shoreline Change Using Medium Resolution Satellite Imagery in Keta, Ghana. *Marine Science*, 1(1), 1-19. DOI: 10.5923/j.ms.20110101.01
- Appeaning, K., Brempong, E. K. y Jayson-Quashigah P. N. (2020). Assessment of the dynamics of the Volta river estuary shorelines in Ghana. *Geoenvironmental Disasters*, 7, 1-11. DOI:10.1186/s40677-020-00151-1
- Barrios-Rodríguez, M. L. (2012). *Variaciones morfodinámicas de la costa deltaica de Tabasco*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Bird, E. (2008). *Coastal Geomorphology: An Introduction* (). Australia: Ed. Wiley.
- Boak, E. y Turner, I. (2005). Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 688-703. DOI: 10.2112/03-0071.1
- Botello, A., Villanueva, S., Gutiérrez, J. y Rojas, J. L. (2010). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. México, D. F.: SEMARNAT-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Bustamante-Fernández, J. E., Méndez-Linares, A. P., Hernández-Santana, J. R. (2016). Variaciones morfodinámicas hiperanuales (1951-2007) de la línea costera entre Punta Diamante y Río Papagayo, Acapulco, México. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 71, 301-322. DOI: 10.21138/bage.2284
- Carballo-Domínguez, J. A. (2010). Zonas costeras bajas en el Golfo de México ante el incremento del nivel del mar. En: A. Vázquez, S. Villanueva, J. Gutiérrez y J. L. Rojas (eds.) *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (pp. 359-380).
- Méjico, D. F.: SEMARNAT-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Cruz-González, M. (2012). *Variaciones estacionales en la línea de costa entre el Canal de Cuautla y el estero San Cristóbal, Nayarit*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Davidson-Arnott, R. (2010). *Introduction to coastal processes and Geomorphology*. Nueva York: Cambridge University.
- De Gouveia Souza, C. R. (2001). Coastal Erosion Risk Assessment, Shoreline Retreat Rates and Causes of Coastal Erosion Along the State of São Paulo Coast, Brazil. *Pesquisas em Geociências*, 28(2), 459-474.
- Dolan, R., Fenster, M.S. y Holme, S. J. 1991. Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 723-744ESRI. (2013). ArcGis version 10.2. Environmental System Research Institute, Inc.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 84-92. DOI:10.18268/BSGM2000v53n1a5
- Ferrari, L., Tagami, T., Eguchi, M., Orozco-Esquível, M. T., Petrone, C., Jacobo-Albarrán, J., y López-Martínez, M. (2005). Geology, geochronology and tectonic setting of late Cenozoic volcanism along the southwestern Gulf of Mexico: The Eastern Alkaline Province revisited. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 146, 284-306. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2005.02.004Fletcher, C., Rooney, J., Berbee, M., Lim, S. y Richmond, B. (2003). Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, 38, 106-124. <https://www.jstor.org/stable/25736602>
- Ford, M. (2013). Shoreline changes interpreted from multi-temporal aerial photographs and high resolution satellite images: Wotje Atoll, Marshall Islands. *Remote Sensing of Environment*, 135, 130-140. DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.027
- García-Amaro, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México, D. F: Instituto de Geografía, UNAM.
- Geissert, D. y Dubroeucq, D. (1995). Influencia de la geomorfología en la evolución de los suelos de dunas costeras en Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas*, 3, 37-51.
- Gómez-Tuena, A., LaGatta, A., Langmuir, C., Goldstein, S., Ortega-Gutiérrez, F. y Carrasco-Núñez, G. (2003). Temporal control of subduction magmatism in the Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: mantle sources, slab contributions and crustal contamination. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4(8):1-33. DOI: 10.1029/2003GC000524

- Gómez-Tuena, A., Orozco Esquivel, M. T., y Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72, 227-285.
- Gómez, C., Alberto, J. y Arce, G. (2014). Morfología litoral: Agentes, procesos y formas resultantes. Recuperado de <https://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo21/archivos/gomezalbe14.pdf>
- González-Conchas, M. A. (2011). *Morfodinámica de la línea costera comprendida entre la desembocadura del Río Presidio y Punta Cerritos, Mazatlán, Sinaloa, México, durante la segunda mitad del siglo XX y el presente*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Hernández-Santana, J. R., Méndez-Linares, A. P. y Figueroa-Mah-Eng, J. M. (2007). Caracterización del relieve plio-cuaternario del entorno costero del Estado de Veracruz, México. *Cuaternario y Geomorfología*, 21(3-4), 113-131.
- Hernández-Santana, J. R., Ortiz-Pérez, M. A., Méndez-Linares, A. P. y Gama-Campillo, L. (2008). Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: Tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. *Investigaciones Geográficas*, 65, 7-21.
- Hernández-Santana, J. R., Méndez-Linares, A. P., López-Portillo, J. y Preciado-López, J. C. (2016). Coastal geomorphological cartography of Veracruz State, México. *Journal of Maps*, 12(2), 316-323. DOI: 10.1080/17445647.2015.1016128 INEGI (1973). Fotografías aéreas, a escala 1:70000. México, D. F. INEGI (1986). Fotografías aéreas, a escala 1:75000. México, D. F.
- INEGI (1995). Fotografías aéreas, a escala 1:75000. Aguascalientes, México.
- INEGI (2000). Ortofotos digitales, a escala 1:20 000. Aguascalientes, México.
- Jelil Niang, A. (2020). Monitoring long-term shoreline changes along Yanbu, Kingdom of Saudi Arabia using remote sensing and GIS techniques. *Journal of Taibah University for Science*, 14(1), 762-776. DOI:10.1080/016583655.2020.1773623
- Jiménez-Orocio, O. A. (2010). *Análisis espacio-temporal de la erosión y acreción de las costas del Estado de Veracruz*. Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto de Ecología, Xalapa, México.
- Kilar, H. y Çicek, I. (2018). Shoreline Change Analysis in Göksu Delta by Using DSAS. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 16(1), 89-104. DOI: 10.5923/j.ms.20110101.01
- Louati, M., Saïdi, H. y Zargouni, F. (2015). Shoreline change assessment using remote sensing and GIS techniques: a case study of the Medjerda delta coast, Tunisia. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 4239-4255. DOI:10.1007/s12517-014-1472-1
- Maiti, S. y Bhattacharya, A. K. (2009). Shoreline change analysis and its application to prediction: A remote sensing and statistics based approach. *Marine Geology*, 257, 11-23. DOI: 10.1016/j.margeo.2008.10.006
- Martín-Prieto, J. A., Roig-Munar, F. X., Rodríguez-Perea, A., Mir-Gual, M., Pons-Buades, G. X. y Gelabert-Ferrer, B. (2016). La erosión histórica de la playa de Sa Rápita (S. Mallorca). *Investigaciones Geográficas*, 66, 135-154. DOI: 10.14198/INGEO2016.66.08
- Martínez, M. L., Vázquez, G., López-Portillo, J., Psuty, N. P., García-Franzo, J. G., Silveria, T. M. y Rodríguez-Revelo, N. A. (2012). Dinámica de un paisaje complejo de la costa de Veracruz. *Investigación Integral*, 4(1), 151-160.
- Masselink, G., Hughes, M. G. y Knight, J. (2011). *Coastal processes and geomorphology* () Londres: Hodder Education.
- Miranda, J. (2001). *Evaluación de la incertidumbre en datos experimentales*. Ciudad de México: Instituto de Física, UNAM.
- Montaño-Ley, Y. y Peraza-Vizcarra, R. (1986). Aplicación de un modelo de tipo predictivo para cuantificar el transporte litoral de arenas en dos playas de la costa Sur de Sinaloa. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM*, 13(1), 305-313. Recuperado de <http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1986-1/articulo206.html>
- Montaño-Ley, Y. y Gutiérrez-Estrada, M. (1987). Control de perfiles de playa en el área de Mazatlán, Sinaloa, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM*, 14(1), 1-11. Recuperado de <http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1987-1/articulo258.html>
- Moore, L. J., Ruggiero, P. y List, J. H. (2006). Comparing Mean High Water and High-Water Line Shorelines: Should Proxy-Datum Offsets be Incorporated into Shoreline Change Analysis? *Journal of Coastal Research*, 22(4), 894-905. DOI: 10.2112/04-0401.1
- Moreno-Casasola P. (2010). *Veracruz. Mar de arena. VII Construcción y destrucción de un paisaje costero*. Veracruz: Universidad Veracruzana.
- Morton, R. A., Miller, T. L., y Moore, L. J. (2004). *National assessment of shoreline change: Part 1: Historical shoreline changes and associated coastal land loss along the U.S. Gulf of Mexico*. U.S. Geological Survey Open-file Report 2004-1043.
- Øjeda-Zújar, J., Álvarez-Francoso, J. I., Martín- Cajaraville, D. y Fraile-Jurado, P. (2009). El uso de las TIG para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (cví) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España). *Geofocus*, 9, 83-100.
- Øjeda-Zújar, J., Díaz-Cuevas, M. D. P., Prieto Campos, A. y Álvarez Francoso, J. I. 2013. Línea de costa y Sistemas de Información Geográfica: modelos de

- datos para la caracterización y cálculo de indicadores de la costa andaluza. *Investigaciones Geográficas*, 60, 37-52. DOI: 10.14198/INGEO2013.60.02
- Ortiz-Pérez, M.A. (1988). Evidencias de cambios geomorfológicos del sistema litoral mediante el análisis de imágenes aéreas. En *Memorias, Ecología y Conservación del delta de los ríos Usumacinta y Grijalva* (pp. 43-54). Villahermosa: Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos, Gobierno del estado de Tabasco.
- Ortiz-Pérez, M. A. (1992). Retroceso reciente de la línea de costa del frente deltaico del río San Pedro, Campeche, Tabasco. *Investigaciones Geográficas*, 25, 7-23.
- Ortiz-Pérez, M. A. (1994). Repercusiones del ascenso del nivel del mar en costas bajas de planicies deltaicas. *Geografía y Desarrollo*, 2(11), 69-72.
- Ortiz-Pérez, M. A. y Benítez, J. (1996). Elementos teóricos para el entendimiento de los problemas de impacto ambiental en las planicies deléticas: la región de Tabasco y Campeche. En A. Botello, J. L. Rojas, J. Benítez y D. Zárate (eds.) *Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias* (pp. 483-503). Campeche: EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche.
- Ortiz-Pérez, M. A. y Méndez-Linares, A. P. (1999). Escenarios de vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe. *Investigaciones Geográficas*, 39, 68-81.
- Ortiz-Pérez, M. A. (2005). Características físicas de las costas: base para su regionalización. El caso de la costa veracruzana. En P. Moreno-Casasola, E. Peresbarbosa y A. C. Travieso (eds.) *Manejo Costero Integral: el enfoque municipal* (pp. 81-95). Xalapa: Instituto de Ecología, A. C.
- Ortiz-Pérez M. A. y De La Lanza-Espino, G. (2006). *Diferenciación del espacio costero de México: Un inventario regional*. México, D. F.: Instituto de Geografía, UNAM.
- Oyedotun, T. D. (2014). Shoreline Geometry: DSAS as a tool for historical trend analysis. In British Society for Geomorphology (ed.) *Geomorphological techniques* (pp. 2-12).
- Paine, J. G., Sojan, M. y Caudle, T. (2011). *Texas gulf shoreline change rates through 2007*. Bureau of economic geology. A Report of the Coastal Coordination Council Pursuant to National Oceanic and Atmospheric Administration Award No. NA-09NOS4190165.
- Pérez-Alberti, A., Freitas, L., Pires, A. y Chaminé, H. (2013). Shoreline change mapping along the coast of Galicia, Spain. *Maritime Engineering*, 166(3), 125-144. DOI:10.1680/maen.2012.23.
- Ramos-Reyes., Gama, L., Núñez, J., Sánchez, R., Hernández, H., y Ruiz, O. (2016a). Adaptación del modelo de vulnerabilidad costera en el litoral tabasqueño ante el cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13, 2551-2563.
- Ramos-Reyes, R., Zavala-Cruz, J., Gama-Campillo, L.M., Daniel Pech-Pool, D., y Ortiz-Pérez, M.A. (2016b). Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), 581-598.
- RAPIDEYEAG (2011). *Imágenes satelitales Rapideye*. Alemania: Brandenburg an der Havel.
- Rivera-Guzmán, N. E., Moreno-Casasola, P., Ibarra-Obando, S. E., Sosa, V. J. y Herrera-Silveria, J. (2014). Long term state of coastal lagoons in Veracruz, Mexico: Effects of land use changes in watersheds on seagrasses habitats. *Ocean & Coastal Management*, 87:30-39. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2013.10.007
- Ruiz-Martínez, G., Silva-Casarín, R., Posada-Venegas, G. (2013). Comparación morfodinámica de la costa noroeste del estado de Quintana Roo, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(3):47-65.
- Sheeja P. S. y Ajay Gokul, A. J. (2016). Application of Digital Shoreline Analysis System in Coastal Erosion Assessment. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 6(6), 7876-7883. DOI 10.4010/2016.1848Shepard, F. P. (1963). *Submarine geology*. Nueva York: Harper & Row.
- SMN (2017). Datos de las estaciones mareográficas de Veracruz. UNAM, Instituto de Geofísica. Recuperado de <http://www.mareografico.unam.mx/portal/index.php?page=Estaciones>.
- Spot Image (2017). Imágenes satelitales Spot 6/7. Ciudad de México: Sistema de Información Geográfica, S. A. de C. V.
- Stanica, A., Dan, S. y Ungureanu, V. G. (2010). Coastal changes at the Sulina mouth of the Danube River as a result of human activities. *Marine Pollution Bulletin*, 55(10-12), 555-563. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2007.09.015Thieler, E. R. y Danforth, W. W. (1994). Historical Shoreline mapping (II): Application of the Digital Shoreline mapping an Analysis System (DSMS/DSAS) to Shoreline change mapping in Puerto Rico. *Journal of Coastal Research*, 10(3), 600-620.
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., Ergul, A. (2009). The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 - An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change. Open-File Report. U. S. Geological Survey Report No. 2008-1278.
- USGS (2012). DSAS 4.3 for ArcGIS 10-10.3. Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J. L., Ergul, A. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 -An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U. S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.