Evolución morfológica de la espiga de Galerazamba, Caribe colombiano

Galerazamba Spit morphological evolution, Colombian Caribbean

Fecha de recepción: 2015-05-15 / **Fecha de aceptación:** 2015-08-21

Andrés Fernando Orejarena Rondón[1], Fernando Afanador Franco[2], Isabel Ramos de la Hoz[3], Mario Conde Frías[4], Juan Camilo Restrepo López[5]

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Área Manejo Integrado de Zona Costera. Barrio El Bosque, sector Manzanillo, Cartagena de Indias, Bolívar. Tel: +57 (5) 669 44 65. Correos electrónicos: aorejarenarondon@dimar.mil.co[1], fernando.afanador@dimar.mil.co[2], iramos@dimar.mil.co[3].

Universidad del Norte. Grupo de Física Aplicada–Oceanografía Física, Departamento de Física. Kilómetro 5 Vía Puerto Colombia, Barranquilla, Atlántico. Tel: +57 (5) 350 95 09. Correos electrónicos: mconde24@gmail.com[4], restrepocj@uninorte.edu.co[5].

Orejarena Rondón, A.F., Afanador Franco, F., Ramos de la Hoz, I., Conde Frías, M., Restrepo López, J.C. (2015). Evolución morfológica de la espiga de Galerazamba, Caribe colombiano. Bol. Cient. CIOH; 33: 123-144.

Resumen

Con el fin de analizar la evolución morfológica de la espiga de Galerazamba y su actual clasificación dentro de los sistemas de barreras, se determinaron mediante registros históricos de la línea de costa y patrones de corrientes, según la incidencia del oleaje para el área de interés, los cambios que ha sufrido esta espiga desde 1948 hasta 2014. Se estableció que la primera geoforma presente en el área de estudio, antes del encañonamiento del río Magdalena (1936) y de la erupción del volcán de lodo sobre la espiga (1938), correspondía a una *Fly Spit.* Posterior a la erupción, la falta de sedimento en el sistema por el encañomaniento del río y según los patrones de corrientes en la zona, se evidenció la distribución del sedimento paralelo a la línea de costa de Galerazamba, generando varios tipos de barras con el paso del tiempo debido a la deriva litoral y el suministro de sedimento local, hasta llegar a su forma actual la cual corresponde a una barra cerrada con el continente denominada *Bay-Mouth Barrier.*

PALABRAS CLAVES: Galerazamba, barra, espiga, corrientes, oleaje, análisis multitemporal, Morfología, Caribe colombiano.

Abstract

In order to analyze the Galerazamba spit morphological evolution as well as its barrier systems classification; we analyzed us historical shoreline records and currents patterns according historical changes from 1948 until 2014. It was established that the first morphological shape corresponding the Magdalena river channeling in 1936 and the mud volcano eruption over the spit in 1938 is a Fly Spit. After the eruption, the lack of sediment in the system due to the river channeling was evident the sediment readjustment parallel to Galerazamba´s shoreline, generating several sand barriers types over time due to littoral drift and local sediment supplies, moring towards its present morfology which corresponds to a closed sand bar called Bay-mouth Barrier.

KEYWORDS: Galerazamba, Sand bar, Spit, Currents, Ocean wave, Multitemporal analysis, Morphology, Colombian Caribbean.

Introducción

Los sistemas costeros sedimentarios, particularmente los sistemas de barrera, están constituidos por sedimento depositado, separados del continente por lagunas, bahías o pantanos en algunos casos [1]. Estos sistemas suelen ser biológicamente productivos debido a la existencia de praderas y pastos marinos que sirven de base para una red trófica, que incluye una alta variedad de crustáceos e invertebrados, asimismo hábitats para peces, aves y mamíferos [2].

Según [3], las espigas son bancos de arena que se desarrollan en costas ininterrumpidas y son típicamente encontradas donde la costa tiene cambios drásticos en su orientación, como en Punta Garita, Galerazamba (Figura 1B). Esta acumulación de arena, unida de un extremo al continente terminando en aguas abiertas en el otro, siendo más joven que la masa de tierra de donde se encuentra unida puede ser clasificada como espiga litoral [3] y [4]. Las espigas pueden variar considerablemente en forma y complejidad de acuerdo a la dirección de incidencia del oleaje, el rango relativo de marea [4], el suministro de sedimento, como también debido a factores geológicos [5].

Los cambios morfológicos de la espiga de Galerazamba han sido descritos por diferentes autores [6-8]. El estudio de análisis histórico de la línea de costa del Caribe colombiano desarrollado por [7], quien tomó como base algunas de las cartas del Brigadier Francisco J. Fidalgo, elaboradas durante los años 1794-1810, muestra claramente que la espiga de Galerazamba ha tenido cambios morfológicos significativos (Figura 1).

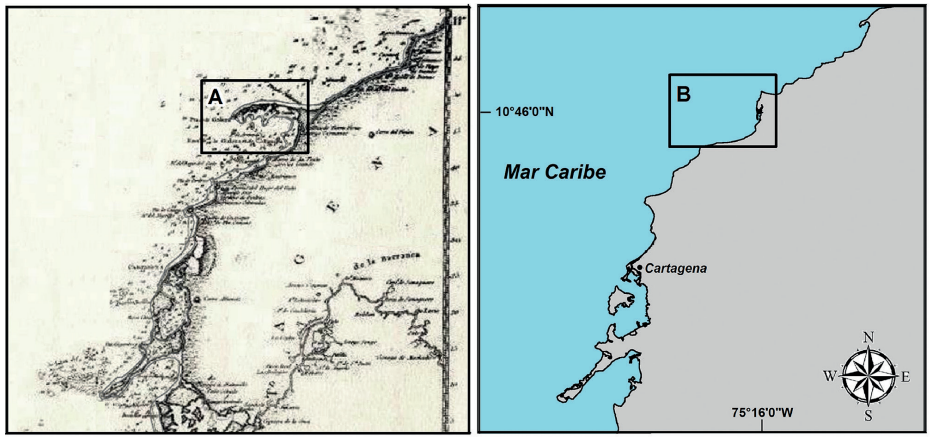

Figura 1. Cambio en la morfología de la espiga de Galerazamba (Bolívar) entre los siglos XIX y XX. **(A)** Espiga de Galerezamba, de acuerdo con carta elaborada por Francisco J. Fidalgo en 1805. **(B)** Línea de costa generada con datos de Dimar-CIOH obtenidos en 2005.

Existen registros históricos que indican que la destrucción de la espiga de Galerazamba en 1938 ocurrió luego de la erupción de un volcán de lodo ubicado en mar abierto [7]. Esta explosión formó un canal de 30 pies de profundidad cerca del extremo oeste de la espiga, desprendiéndola casi por completo de su formación inicial y generando un suministro sustancial de sedimento, el cual fue transportado en forma paralela a la línea de costa por la dinámica del oleaje.

Probablemente, uno de los factores que influyó en la alta variabilidad morfológica de la espiga de Galerazamba fue la disminución en el aporte de sedimentos al sistema costero ocasionada por la construcción de los tajamares en la desembocadura del río Magdalena en 1936, dos años antes de la erupción que ocasionó el desprendimiento de la espiga del continente. Estos tajamares facilitan el transporte de sedimentos hasta el cañón submarino frente a Bocas de Cenizas, su depositación en el talud y la plataforma continental. Se ha considerado que esta intervención modificó el balance morfodinámico de la zona litoral comprendida entre Bocas de Ceniza y la bahía de Cartagena, al promover la

salida de más de 30-40 x10^6 ton a^{-1} de sedimento del sistema circulatorio litoral [7, 9].

Debido al desequilibrio morfodinámico generado por la gran cantidad de sedimento depositado en el cañón submarino frente a Bocas de Ceniza, es necesario reevaluar los esquemas de evolución morfológica de la costa entre la desembocadura del río Magdalena y la bahía de Cartagena; particularmente en sistemas depositacionales como barras, espigas y flechas litorales, ya que estos sistemas han sido usados como indicadores de cambios regionales y globales debido a su sensibilidad frente a fenómenos como el aumento del nivel del mar, la subsidencia, el cambio climático, los cambios en el aporte de sedimentos continentales y la intervención antrópica [10].

En la presente investigación se describieron los cambios geomorfológicos de la espiga de Galerazamba, usando imágenes satelitales y fotografías aéreas verticales antiguas, haciendo énfasis en la relación que existe entre estos cambios y los patrones de circulación costera, contribuyendo así al entendimiento de los procesos de transporte de sedimento de medio y largo plazo, y los patrones de evolución morfológica que ocurren en este sector.

Área de estudio

La zona de Galerazamba está ubicada en la parte norte de departamento de Bolívar entre las latitudes 10°43’1.2’’N, 10°49’22.6’’N y entre las longitudes -75°19’32.62’’W, 75°10’22’’W (Figura 2). Se caracteriza por poseer un clima tropical semiárido, con un promedio de humedad del 90 % [11] y dos épocas climáticas bien definidas. Una época seca, de diciembre a abril, y una época húmeda, de abril a mayo; los demás meses del año son de transición, los cuales son modulados por la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) [12]. Durante la estación seca o de vientos, la ZCI se ubica alrededor de los 0°-5° Sur, en donde dominan los vientos Alisios (vientos del N y NE). En los meses de abril a junio los vientos Alisios se debilitan, dando paso a algunas lluvias (época de transición); posteriormente, entre agosto y octubre se presenta la época de lluvias como resultado del movimiento de la ZCI hacia los 10°-12° N, permitiendo que los vientos Alisios del Sur alcancen la cuenca colombiana [12].

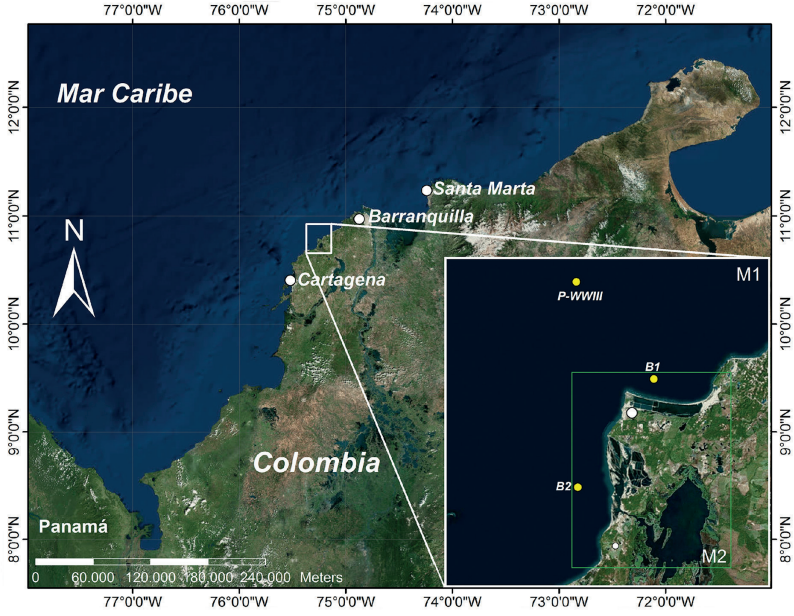

Figura 2. Localización general de la zona de Galerazamba en el litoral Caribe colombiano. El recuadro M1 corresponde a la malla para la propagación del oleaje desde aguas profundas hacia aguas intermedias (boyas virtuales B1 y B2) y el recuadro M2 es un ejemplo de malla de detalle para la propagación de los casos de oleaje desde aguas someras hasta la playa, con el fin de la determinar los patrones de corrientes longitudinales.

En la zona de estudio la marea es mixta, principalmente diurna, con rangos de marea que varían entre 0.2 m y 0.3 m [13]. El oleaje presente en esta zona corresponde a la dinámica de los vientos Alisios del NE, mostrando un comportamiento bimodal que coincide con los periodos de viento fuerte (época seca) y de vientos más débiles (época húmeda) [14]; con valores típicos de alturas de ola significativa (Hs) entre 1.0 a 1.25 m y periodos pico alrededor de los 7.6 s en época seca y alrededor de 0.5 m de altura significativa y periodo pico (Tp) de 6.6 s durante la época húmeda. La dirección predominante del oleaje durante el año es NNE, con un 69 % de incidencia, seguida del NE, con 15.9 %, según los resultados del clima de olas realizado para la zona.

Según el Atlas Geomorfológico del Litoral Caribe Colombiano [15], la zona de estudio está compuesta por una plataforma de abrasión elevada de donde se desprende la flecha litoral que corresponde a la espiga de Galerazamba. Sobre la espiga y sus alrededores se identifican algunas zonas de manglar. Hacia el continente, en la parte este de la espiga, se encuentra una planicie de inundación y una llanura costera, seguidas de lomas y colinas (Figura 3). En la parte sur de la espiga también se observan formaciones de lomas y colinas, como lo reafirma un mapa de altura del terreno generado a partir de datos LiDAR (Figura 4).

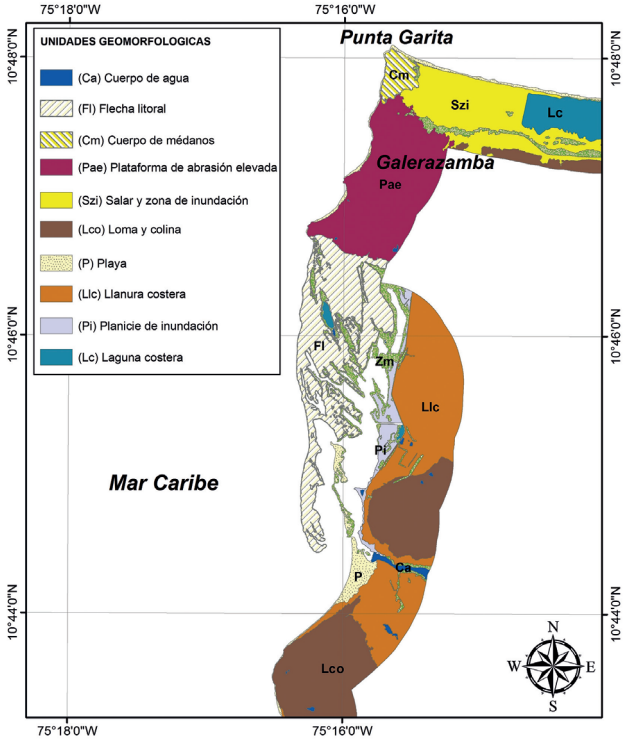

Figura 3. Distribución espacial de las unidades geomorfológicas del área de estudio. Modificado de [15].

Metodología

Para determinar los procesos morfodinámicos que se presentan en la zona de Galerazamba se propagaron condiciones de oleaje de altura de ola, periodo pico y dirección (Hs, Tp, Dp) desde aguas profundas hasta el área de estudio, por medio de dos modelos numéricos que simulan el comportamiento del oleaje en aguas profundas y aguas someras. Posteriormente se realizó un análisis geomorfológico de la espiga de Galerazamba, donde se observó la influencia de las corrientes por rotura que transportan el sedimento y que por consiguiente actúan en la evolución morfológica.

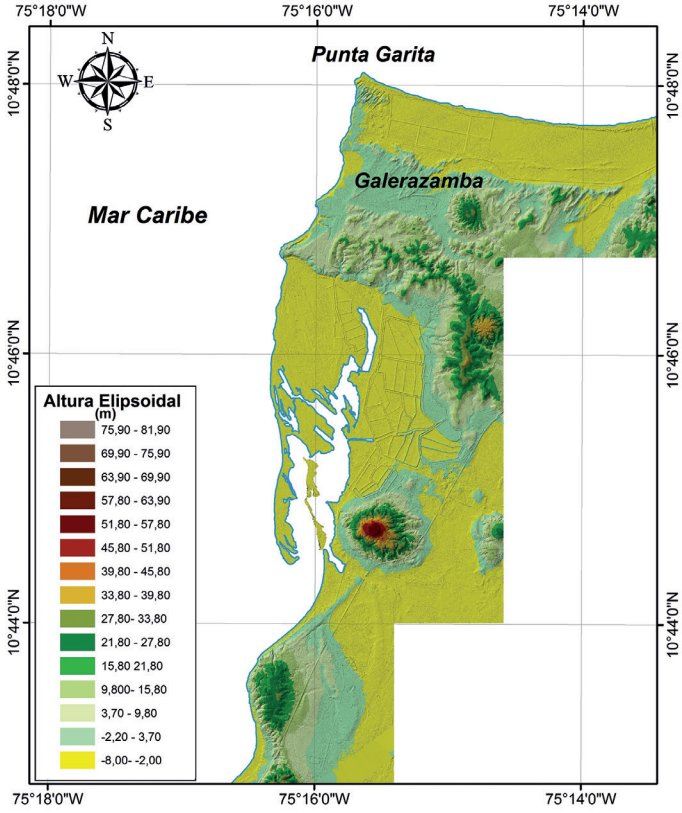

Figura 4. Modelo digital de terreno con base en datos LiDAR del sector de Galerazamba. Las alturas elipsoidales del terreno se encuentran referidas al elipsoide WGS-84. Fuente: Datos LiDAR Dimar 2005.

Modelación en aguas profundas

Inicialmente se propagaron datos de Hs, Tp y Dp desde aguas profundas hasta aguas someras con el modelo Simulating WAves Nearshore (SWAN, por sus siglas en inglés) sobre la malla computacional M1 (Figura 2). La base de datos de oleaje utilizada como condición de entrada al modelo SWAN fue generada utilizando datos de reanálisis, pertenecientes a la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, por sus siglas en inglés), (http://polar.ncep.noaa.gov/waves/index2.shtml) y el modelo de tercera generación WWIII [16, 17], validado a nivel global con datos de altimetría satelital (ERS1) y datos de boyas de oleaje escalar [18].

Esta base de datos también fue validada a escala regional mediante la comparación de datos de oleaje de una boya perteneciente a la Dirección General Marítima (Dimar), ubicada en el extremo norte del golfo de Urabá y una serie de datos de oleaje extraída de WWIII para la misma zona [19]. En este caso se encontró una correlación entre modelo y observación del 0.89, por lo que el modelo reproduce correctamente el oleaje a escala regional [19].

El modelo SWAN está basado en la ecuación de acción de onda que promedia la fase y no reconstruye la superficie del mar en el espacio y el tiempo (Ecuación 1) [20]. Esta base teórica permite propagar oleaje en todas las direcciones. Además, su aplicación es posible en extensas superficies, ya que no requiere un número mínimo de puntos de cálculo por longitud de onda. La ecuación que resuelve el modelo es la siguiente:

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial c_x N}{\partial x}+\frac{\partial c_y N}{\partial y}+\frac{\partial c_\Omega N}{\partial \Omega}+\frac{\partial c_\varnothing N}{\partial \varnothing}=\frac{s}{\sigma} \qquad \textbf{(1)}$$

Se trata de una ecuación de transporte de energía, en la que las variaciones locales de la energía espectral en el tiempo y las variaciones del flujo de energía en el espacio se compensan con las salidas y entradas de energía al sistema [21].

Donde,

$\frac{\partial N}{\partial t}=$ variación local de la densidad de acción en el tiempo.

$\frac{\partial c_x N}{\partial x}=$ propagación de la acción en el espacio geográfico, siendo *Cx* la velocidad de propagación de la energía del oleaje en la dirección *x*.

$\frac{\partial c_y N}{\partial y}=$ propagación de la acción en el espacio geográfico, siendo *Cy* la velocidad de propagación de la energía del oleaje en la dirección *y*.

$\frac{\partial c_\Omega N}{\partial \Omega}=$ cambio en la frecuencia relativa debido a variaciones en la profundidad y en las corrientes.

$\frac{\partial c_\varnothing N}{\partial \varnothing}=$ refracción inducida por la profundidad o las corrientes, siendo *C* la velocidad de propagación en el espacio direccional.

$\frac{s}{\sigma}=$ fuentes y sumideros de la energía espectral, incluyendo la generación de oleaje por viento, disipación de energía por *whitecapping,* por fricción en el fondo y por rotura del oleaje, y las interacciones no lineales del oleaje.

Tabla I. Características de la malla M1 utilizada por SWAN para la propagación del oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras.

Características	Eje	Galerazamba
Origen	X	-75.4
	Y	10.7
Rumbo	(°)	0
Divisiones	Δ X Δ Y	100 100
Divisiones	N° Filas N° Columnas	200 186

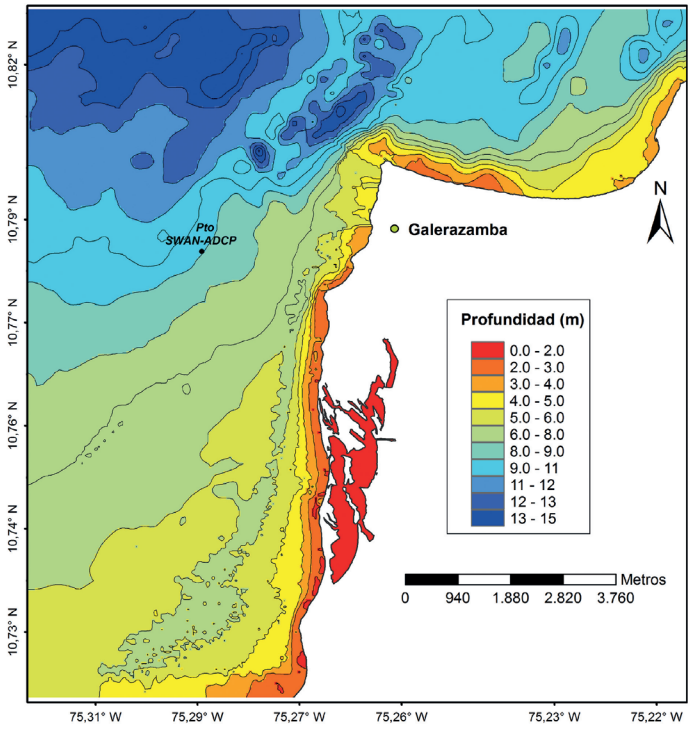

Figura 5. Batimetría del sector de Galerazamba en donde se muestra la ubicación del instrumento de medición ADCP y el punto de oleaje simulado con el modelo SWAN para su respectiva comparación.

Modelación de las corrientes

La propagación del oleaje desde aguas someras hasta la playa para determinar las corrientes por rotura del oleaje se desarrolló mediante la aplicación del modelo COPLA-SP sobre las mallas M2 (Tabla II). Este modelo resuelve las ecuaciones de flujo dentro de la zona de rompientes, tomando como entrada los valores del oleaje en aguas someras determinados con SWAN. COPLA-SP hace parte del Modelo Integral de Propagación de Oleaje, Corrientes y Morfodinámica en Playas (MOPLA), que integrado con una serie de modelos numéricos permiten llevar a cabo un análisis a corto plazo en playas [22].

Este modelo bidimensional de corrientes en playa se deduce de las ecuaciones de Navier-Stokes. Integrando estas ecuaciones en la profundidad y promediando un periodo de tiempo en un sistema de coordenadas localizado en el nivel medio del mar (x = dirección transversal a la playa; y = dirección longitudinal a la playa; z =dirección vertical), bajo la hipótesis de que: 1) la variación del fondo del mar con respecto a la horizontal es muy pequeña; 2) los movimientos asociados a las corrientes de playa son permanentes; 3) los efectos de viscosidad molecular son débiles, excepto en los contornos (movimiento irrotacional); 4) las fluctuaciones turbulentas debidas al oleaje son despreciables; 5) se rechaza la fuerza de Coriolis, y 6) las corrientes son suficientemente débiles como para considerarse su interacción con el tren de ondas [22].

Continuidad:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (UH)}{\partial x} + \frac{\partial (VH)}{\partial y} = 0 \qquad \textbf{(2)}$$

Momentum:

Dirección *x* (transversal a la playa)

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}+g\frac{\partial \eta}{\partial x}+\frac{1}{\rho H}\frac{\partial}{\partial x}\left(S_{xx}\right)+\frac{1}{\rho \mathrm{H}}\frac{\partial}{\partial y}\left(S_{xy}\right)+ \frac{gU}{C^2H}(U^2+V^2)^{1/2}-\varepsilon\left[\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)+\left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2}\right)\right]=0 \quad \textbf{(3)}$$

Dirección *y* (longitudinal a la playa)

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}+g\frac{\partial \eta}{\partial y}+\frac{1}{\rho H}\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\left(S_{xy}\right)+\frac{1}{\rho H}\frac{\partial}{\partial y}\left(S_{yy}\right)+ \frac{gV}{C^2H}(U^2+V^2)^{1/2}-\varepsilon\left[\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}\right)+\left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}\right)\right]=0 \quad \textbf{(4)}$$

Donde,

$$\mathrm{H}=\eta+\mathrm{h} \quad \textbf{(5)}$$

$$S_{xx}=\frac{1}{T}\int_t^{t+T}\int_{-h}^{\eta}\left(\rho u^2+p\right)dz\,dt-\frac{1}{T}\int_t^{t+T}\int_{-h}^{0}P_0\,dz\,dt \quad \textbf{(6)}$$

$$S_{yy}=\frac{1}{T}\int_t^{t+T}\int_{-h}^{\eta}\left(\rho v^2+p\right)dz\,dt-\frac{1}{T}\int_t^{t+T}\int_{-h}^{0}P_0\,dz\,dt \quad \textbf{(7)}$$

$$S_{xy}=\frac{1}{T}\int_t^{t+T}\int_{-h}^{\eta}\rho uv\,dz\,dt \quad \textbf{(8)}$$

$$V=\frac{1}{T}\int_t^{t+T}\int_{-h}^{\eta}v(x,y,z,t)\,dz\,dt \quad \textbf{(9)}$$

$$\eta=\frac{1}{T}\int_t^{t+T}\eta\,(x,y,t')\,dt' \quad \textbf{(10)}$$

$$U = \frac{1}{T}\int_{t}^{t+T}\int_{-h}^{\eta} u\left(x, y, z, t\right) dz\, dt \qquad \textbf{(11)}$$

Las variables dependientes son ç, *U,V,* que representan la elevación de la superficie libre sobre el nivel de referencia y las velocidades de las corrientes promediadas en vertical en un periodo de tiempo en las direcciones *x* e *y*, respectivamente.

Las otras variables de la ecuación son:

h calado hasta el nivel de referencia.
H calado total.
n relación de velocidad del grupo C_g con respecto a la velocidad de fase C.
t tiempo.
T periodo.
S_{xx} tensor de radiación actuando en el plano *x* a lo largo del eje *x*.
S_{xy} tensor de radiación actuando sobre el plano y a lo largo del eje x (por simetría $S_{xy}=S_{yx}$).
S_{yy} tensor de radiación actuando en el plano y a lo largo del eje y.
$ç(x,y,t)$ elevación de la superficie libre a partir del nivel medio del mar.
u velocidad instantánea en dirección x.
v velocidad instantánea en dirección y.
P_0 presión estática a partir del nivel medio de referencia.
g aceleración de la gravedad.

Para cada uno de los casos de oleaje, por requerimiento del modelo, se determinaron mallas que deben coincidir o estar alineadas con la dirección de la propagación de oleaje o la dirección de propagación debe encontrarse en un ángulo no superior a 60° respecto a dicha dirección. En este caso, los oleajes provenientes de las direcciones NNE, NE y N fueron propagados sobre la malla M2; para el oleaje de la dirección NW se utilizó la malla M2_1, y para las modelaciones de la dirección del W y WSW se utilizó la malla M2_2 (Tabla II).

Tabla II. Características de las mallas M2 utilizadas por el MOPLA para la propagación del oleaje desde aguas someras hacia la playa. Las coordenadas de los puntos de batimetría en este caso fueron convertidas a coordenadas planas Gauss Kruger, datum MAGNA-SIRGAS, origen Magna-Bogotá, para la fácil interpretación de las medidas en la figura de resultados y la versatilidad de trabajo en el modelo.

Características	Eje	Galerazamba		
		M2	M2_1	M2_1
Origen	X Y	466800.89 1195456.39	462904.40 1192825.19	465600.00 1186000.00
Rumbo		-90.00	-55.00	0.00
Dimensiones	X Y	9400 10000	11200 12000	11400 9800
Divisiones	Δ X Δ Y N° Filas N° Columnas	20.00 20.00 471 501	20.00 20.00 561 601	20.00 20.00 571 491

Los parámetros utilizados en la implementación del modelo COPLA-SP fueron los siguientes: espectro frecuencial tipo TMA, el cual incluye los procesos de atenuación del oleaje por rotura en profundidades limitadas; Hs y Tp del estado de mar a propagar por dirección (Tabla V); rango de marea de 0.4 m; disipación por rotura del oleaje utilizando el criterio de Battjes y Janssen; disipación con el fondo con capa límite turbulenta. Para el módulo de corrientes se utilizó la rugosidad de Nikurade de 1.0 (Kswc) y viscosidad de remolino de 10 (m^2/s), según las características de las mallas (profundidad y resolución) diseñadas para cada uno de los casos. Los detalles de las formulaciones utilizadas se encuentran en [23-24].

Análisis multitemporal de la línea de costa

Para el análisis multi-temporal de la línea de costa se utilizaron imágenes satelitales tomadas de la base de datos de Google Earth Pro y fotografías aéreas verticales antiguas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Con esta información se evaluaron la variación de línea de costa y los cambios morfológicos del sector en el periodo de tiempo comprendido entre 1948 y 2014 (Tabla III).

Tabla III. Relación de las imágenes del IGAC y de *Google Earth Pro* utilizadas para el análisis multi-temporal de la línea de costa.

Fuente/Vuelo	Año	Tamaño (pixeles)
R-66	1948	15745 x 15794
M-1443	1976	5839 x 5766
C-2405	1989	15726 x 15791
Google Earth	2004	4800 x 2718
Google Earth	2009	4800 x 2718
Google Earth	2012	4800 x 2718
Google Earth	2013	4800 x 2718
Google Earth	2014	4800 x 2718

Las fotografías aéreas tomadas por el IGAC fueron escaneadas y georreferenciadas tomando como base puntos de control terrestre (PCT). Estos puntos fueron obtenidos de las ortofotografías digitales en sistema de coordenadas planas Gauss Kruger, datum MAGNA-SIRGAS, origen MAGNA-Bogotá. El proceso de georreferenciación se llevó a cabo empleando la transformación tipo *Affine* para cada fotografía, utilizando entre 5 y 9 PCT por fotografía. Con este procedimiento se obtuvieron valores de error medio cuadrático en posición para cada uno de ellos menores a 1.0 m.

Tomando en consideración la característica de ambiente micromareal del sector de Galerazamba, se efectuó la interpretación visual de la línea de costa como aquella en donde se observó el alcance del agua sobre el litoral o la intersección del agua con la superficie terrestre [25] y en las condiciones climáticas imperantes en la zona al momento de la toma de las fotografías del IGAC, tomando en consideración sus limitaciones y su variabilidad espacial y temporal [26-27].

Utilizando un sistema de información geográfica (SIG) se efectuó la superposición de las líneas de costa de los periodos 1948, 1976, 1989, 2004, 2012 y 2014, tomando como referencia la posición de la línea de costa en 1948 (información más antigua disponible) (Figura 11), con el fin de observar las variaciones morfológicas de la espiga de Galerazamba a

través de la cuantificación de los cambios netos en área (Tabla VII).

Resultados

Se presentan los resultados de las validaciones y de la implementación de los modelos utilizados para llevar el oleaje desde aguas profundas hasta la costa para los escenarios de oleaje de mayor relevancia en la zona de interés. Por último, se presenta el análisis de la evolución morfodinámica de la espiga de Galerazamba mediante el análisis multi-temporal de la línea de costa, contrastándolo con hipótesis y definiciones planteadas por diferentes autores con el objeto de describir y clasificar la evolución morfológica de esta geoforma costera.

Validación modelo SWAN

La comparación de los datos de altura significativa de oleaje (Figura 6A) muestra que la altura de ola proporcionada por el modelo SWAN tuvo un comportamiento similar a la registrada por el ADCP durante el periodo de medición (28 de abril del 2013 a primero mayo 2013). El coeficiente de correlación entre estos datos (medidos y simulados) y su valor de P se muestran en la Figura 6. El valor de P afirma que se debe rechazar la hipótesis de que el coeficiente de correlación es igual a 0, e indica que los datos de oleaje propagados desde aguas profundas hacia aguas someras con el modelo SWAN son bien representados por el modelo y, por consiguiente, adecuados para ser utilizados en la presente investigación.

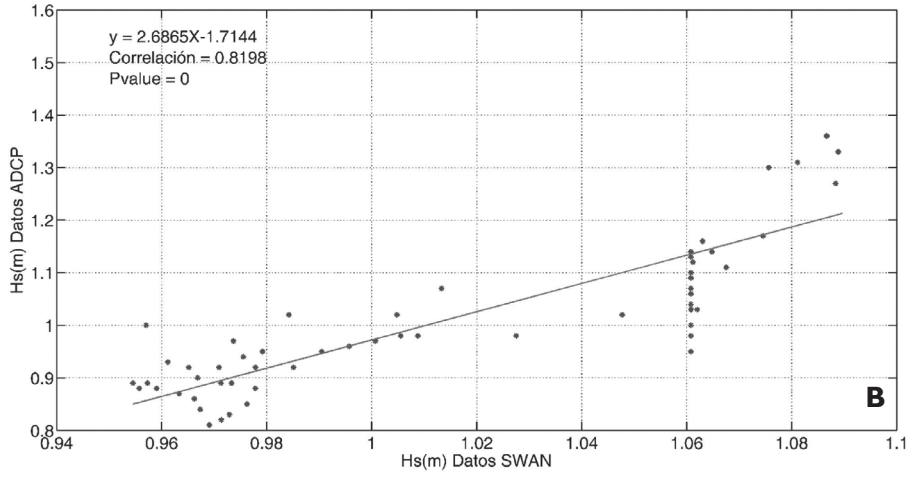

Figura 6. Correlación lineal entre la serie medida y la modelada con su respectivo coeficiente de correlación y valor de P.

Oleaje y corrientes por rotura

El análisis del clima de oleaje, realizado a las boyas sintéticas B1 y B2, mostró que (Hs) tuvo un valor promedio de 1.4 m, con valores máximos de 2.39 m, y con (Tp) entre 1.4 y 15.4 s. Las direcciones predominantes fueron NNE, N, NNW, NW, W y en menor medida WSW. La Tabla IV resume la probabilidad de ocurrencia de las direcciones para cada boya y su respectivo H_{50}.

A partir de esta información se seleccionaron doce casos de oleaje que fueron propagados desde aguas someras hacia la costa, para observar como éste afectaba la zona de interés dependiendo de su dirección. Con los datos de la boya B1 se analizaron los oleajes provenientes del Norte y con los datos de la boya B2 los oleajes provenientes del Oeste. Se evaluaron dos casos por cada dirección: uno energético, con poca probabilidad de ocurrencia, y otro con mayor probabilidad de ocurrencia, correspondiente a una condición de energía media. La Figura 7 representa los diagramas de probabilidad conjunta para altura de ola significante y periodo pico (Hs-Tp) de las direcciones con mayor incidencia sobre el área de estudio y sus valores se presentan en la Tabla V.

Tabla IV. Porcentaje de predominancia de las direcciones en las boyas B1 y B2 y el valor de H_{50} correspondiente a cada dirección.

	Dirección	Dirección en boya (%)	H_{50}(m)
Boya 1 (B1)	NNE	89.78	1.12
	N	4.95	1.33
	NE	0.5	0.61
	NW	0.06	0.94
	NNW	0.02	1.01
	W	2.34	0.66
	WSW	1.42	0.71
	WNW	0.93	0.61
Boya 2 (B2)	W	4.99	0.80
	WSW	0.32	0.71
	WNW	2.15	0.61
	N	84.25	0.89
	NNW	5.18	0.47
	NW	3.12	0.94

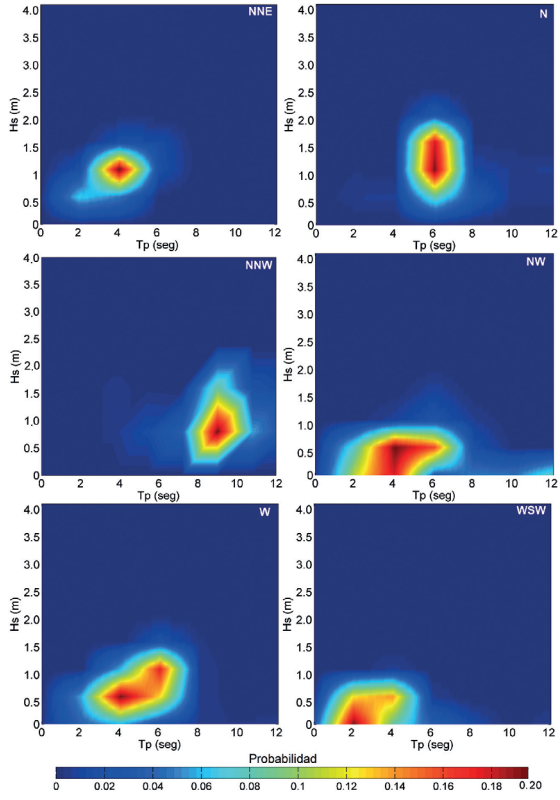

Figura 7. Gráficas de probabilidad conjunta de ocurrencia de altura de ola significante–periodo pico para las direcciones NNE, N, NNW, NW, W y WSW.

Tabla V. Escenarios de probabilidad conjunta de ocurrencia Hs-Tp para las direcciones seleccionadas.

Dirección	Caso	Escenarios energéticos		Caso	Escenarios medios	
		Hs(m)	Tp(s)		Hs(m)	Tp(s)
NNE	1	2.0	8	2	1.2	4
N	3	2.5	8	4	1.3	6
NNW	5	2.2	12	6	1.0	9
NW	7	2.0	7	8	0.9	4
W	9	2.0	8	10	0.8	4
WSW	11	1.1	6	12	0.7	3

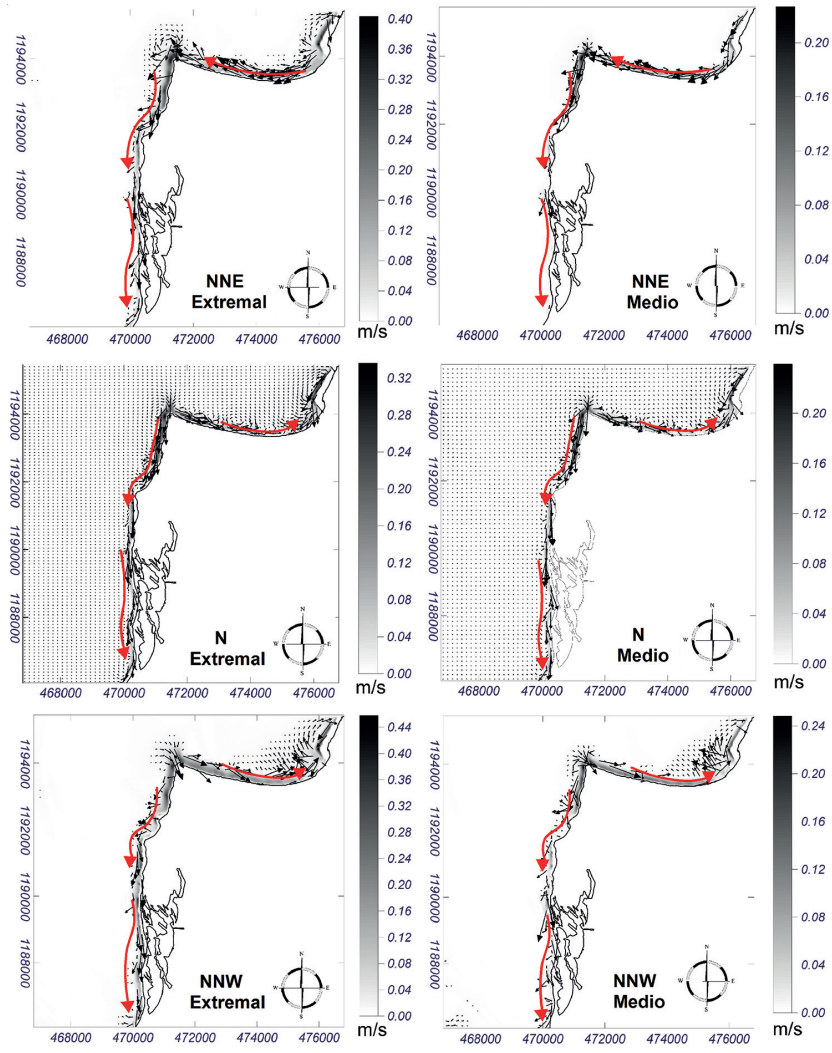

Figura 8. Corrientes por rotura del oleaje de los casos 1 al 6, direcciones NNE, N y NNW.

Una vez propagados cada uno de los escenarios escogidos, las simulaciones mostraron que los patrones del flujo de las corrientes longitudinales producidas por la rotura del oleaje en la mayoría de los casos se encuentran en sentido N-S sobre la espiga, excepto las direcciones provenientes del W y WSW (figuras 8 y 9). Las direcciones N-S de las corrientes que se presentan sobre la espiga se deben al oleaje producido por los vientos Alisios del norte y noreste, cuando la ZCI se ubica entre las latitudes 0° y 5°, correspondiendo con las épocas seca y de transición (figuras 8 y 9).

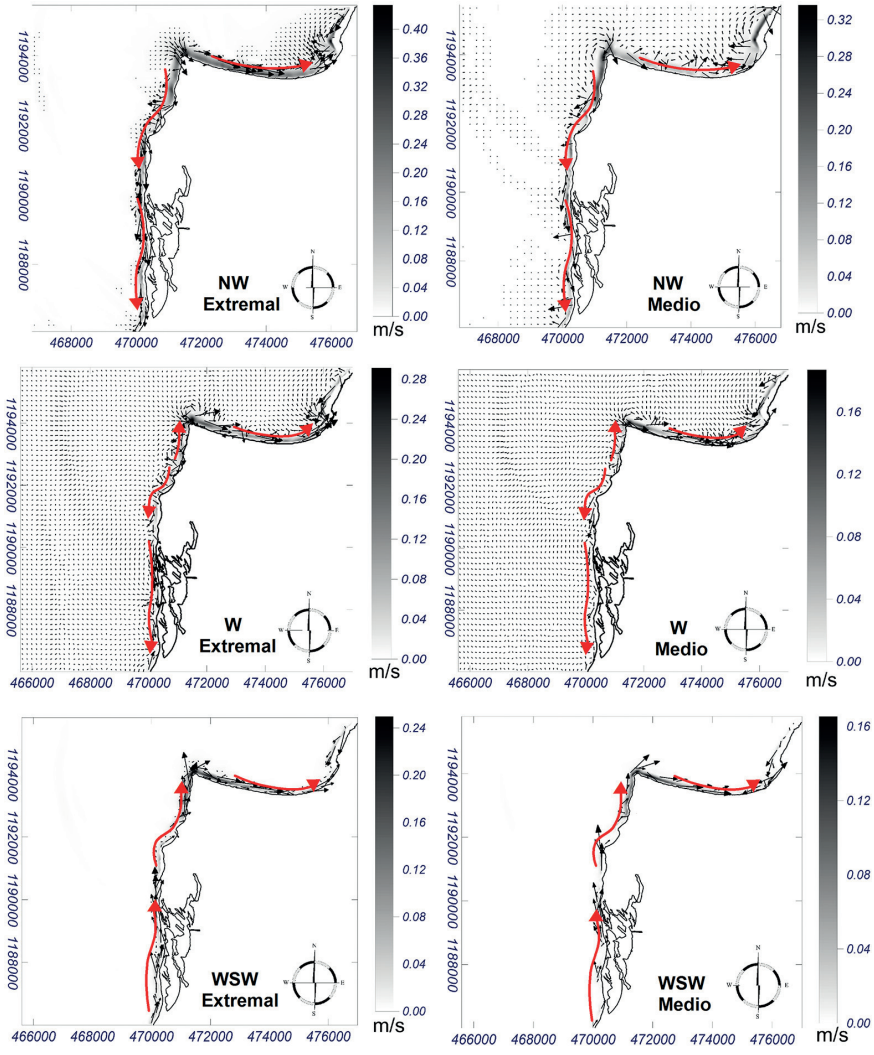

Figura 9. Corrientes por rotura del oleaje de los casos 7 al 12, direcciones NW, W y WSW.

Las direcciones del oleaje provenientes del W y WSW (Figura 9), que generan corrientes en sentido N-S y S-N sobre la espiga, se originan cuando la zona de convergencia intertropical se ubica entre los 10° y 12°, permitiendo que los vientos Alisios del sur lleguen al área de interés. En la gráfica de la dirección W se observan patrones de corrientes en dirección N-S y S-N en el extremo norte de la espiga; esto es debido a que existe una difracción del oleaje en su aproximación perpendicular a la línea de costa sobre un punto duro (Figura 4), el cual genera corrientes en los dos sentidos.

Por otro lado, en la parte superior de la zona de estudio las modelaciones muestran algunos casos de propagación con patrones de corrientes horizontales con dirección W-E debido a la rotura del olaje de las direcciones N, NNW, NW sobre un punto duro en la esquina superior izquierda de la zona de estudio. En los casos W y WSW, las corrientes horizontales en la parte superior del área de interés igualmente tienen el sentido W-E debido a que la dirección del oleaje que genera las corrientes es casi paralela a la línea de costa.

Por el contrario, las corrientes horizontales en dirección E-W en la parte norte del área de estudio son generadas por el oleaje proveniente de la dirección NNE, debido a que éstas bajan por la línea de costa del área de interés de forma paralela. Según el análisis de clima de oleaje consignado en la Tabla IV, la dirección NNE del oleaje se presenta el 89.74 % del tiempo, por lo que esta dirección predomina la mayor parte del año. De acuerdo con los resultados de la modelación se pueden apreciar valores con velocidades entre 0.04 y 40 m/s, lo que significa que el transporte longitudinal del sedimento tiene la misma dirección durante gran parte del año.

Las corrientes con mayores velocidades sobre la franja litoral en la dirección N-S son las producidas por los oleajes en las direcciones NNE, N, NW y NNW, con valores de hasta 0.33 m/s, para los casos más probables (menos energéticos), y hasta 0.44 m/s, para los casos con menor probabilidad y mayor energía. Por otro lado, las corrientes con mayores magnitudes producidas por el oleaje en la dirección S-N son W y WSW, con valores de 0.18 m/s para los casos más probables y hasta 0.29 m/s para los caso con menor probabilidad de ocurrencia y mayor energía.

Evolución morfológica general de la barra para el periodo comprendido entre 1948 y 2014

El análisis de las imágenes históricas de 66 años de la barra en Galerazamba permitió establecer tres características principales relacionadas con su evolución morfológica hasta el año 2014: (1) se presentó una progradación en sentido E-W de la parte superior de la barra, en relación con su posición inicial en 1948 (Figura 10); (2) se presentó un proceso de elongación de la barra en el sentido N-S, con presencia de bocas o aberturas en su parte media, y (3) un proceso erosivo en la parte sur de la barra.

Entre 1948 y 1976 se presentó una elongación delgada en sentido N-S, acompañada de la presencia de una boca hacia la parte media y un proceso de pérdida de sedimentos hacia la parte sur (Figura 10A). Entre 1976 y 1989 se presentó una progradación y migración en sentido S-W, acompañada de una elongación en sentido N-S con desaparición de la boca en la parte media y una ausencia de conexión de la barra con el extremo sur del continente (Figura 10B). Posteriormente, entre 1989 y 2004 se identificó una progradación en sentido E-W hasta la parte media de la barra. A partir de allí se presentó una pérdida de sedimentos con aparición de una pequeña boca, nuevamente en la parte media de la geoforma (Figura 10C). Entre 2004 y 2009 se identificó una migración en sentido E-W de la parte inferior de la barra, permaneciendo sin conexión con el extremo sur del continente (Figura 10D).

Luego, entre 2009 y 2012 es notoria una elongación en sentido N-S con una conexión débil al extremo sur del continente (Figura 10E). Finalmente, entre 2012 y 2013 la barra permaneció estable morfológicamente, con la aparición, nuevamente, hacia la parte central de una boca y una pequeña pérdida de sedimentos en la parte sur de la geoforma (Figura 10F).

Pérdida y/o ganancia de sedimentos

En las tablas VI y VII se presentan las cuantificaciones de áreas y cambios (pérdidas y/o ganancias de sedimentos) para el sector de la barra de Galerazamba.

Tabla VI. Valores de área del sector de la barra en Galerazamba (Bolívar) para el periodo comprendido entre 1948 y 2014. *Los valores estimados corresponden a las áreas sombreadas en las figuras 10A, 10B, 10C, 10D, 10E y 10F, así como también a la delimitada por la línea interrumpida en la Figura 10A.

Año	Área (km^2)*
1948	6.010
1976	5.297
1989	5.910
2004	6.434
2009	6.484
2012	6.516
2013	6.503
2014	6.515

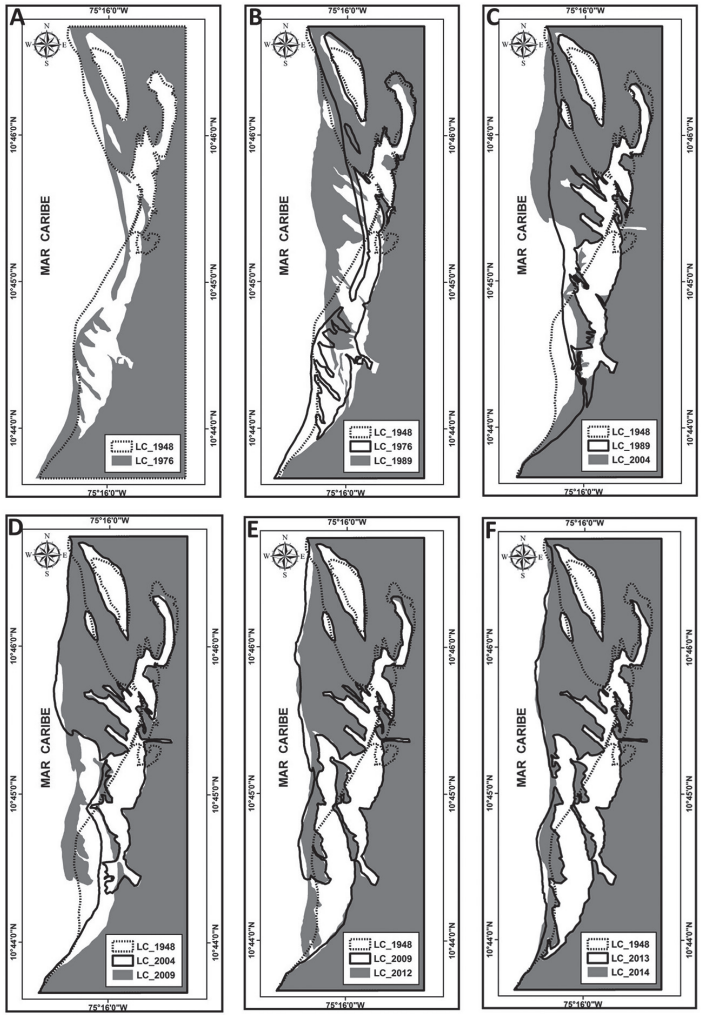

Figura 10. Morfología del sector de la espiga de Galerazamba (Bolívar) para los periodos 1948-1976 **(A)**, 1948-1989 **(B)**, 1948-2004 **(C)**, 1948-2009 **(D)**, 1948-2012 **(E)** y 1948-2014 **(F).**

Tabla VII. Valores de cambios en área por intervalos de tiempo y anuales en el sector de la barra en Galerazamba (Bolívar).

Periodo de tiempo	Cambio en área (km^2 $periodo^{-1}$)	Cambio en área (km^2 $año^{-1}$)
1948-1976	-0.713	-0.0254
1948-1989	-0.100	-0.0024
1948-2004	0.424	0.0075
1948-2009	0.474	0.0077
1948-2012	0.506	0.0079
1948-2014	0.505	0.0076

DISCUSIÓN

Según [28], los sistemas de barreras tienen diferentes formas que pueden ser agrupados en tres grandes categorías dependiendo de su conexión con el continente (islas barrera, espigas barrera y barreras unidas). A partir de este principio de conectividad, [1] estableció una simple clasificación que define ocho geoformas típicas para los sistemas de barrera (Figura 11).

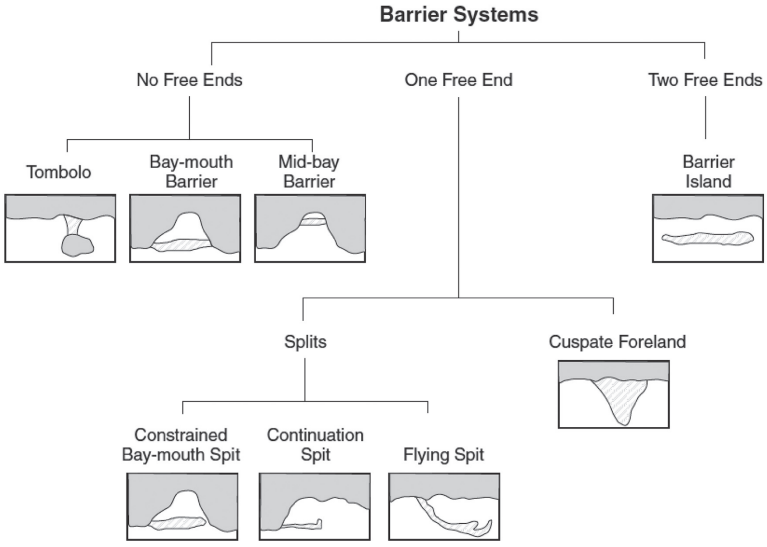

Figura 11. Clasificación de los sistemas de barreras según su conexión con el continente. (Tomado de [2]).

La clasificación propuesta por [1], en conjunto con los patrones de incidencia de oleaje y corrientes identificados previamente, así como el análisis multi-temporal de la línea de costa, sirvieron de marco conceptual para describir la evolución de la espiga de Galerazamba. Inicialmente Galerazamba presentaba una formación *Flying Spit* (Figura 12), la cual fue separada del continente por una violenta erupción volcánica en 1938 [3]. En 1948, diez años después de la erupción volcánica, no es posible identificar esta geoforma debido a la falta de un suministro continuo y sistemático de sedimento en el sistema y a la acción de la dinámica del oleaje. Por consiguiente, el oleaje reacomodó el sedimento disponible de forma paralela a la playa, generando inicialmente una *Continuation Spit* (Figura 13A).

Para 1976 (figuras 10A y 13B) se fortalece el *Continuation Spit* del sector norte y se forma un pequeño *Continuation Spit* en el sector sur, separados por una boca central. En 1989 se presentó una ampliación del ancho de la geoforma en la parte norte y central, así como su fraccionamiento parcial en la zona sur, debido a la dinámica de las corrientes inducidas por el oleaje y a una mayor depositación de sedimentos en la parte norte como resultado de la acción de la deriva litoral *Constrained Bay-mouth Spit* (figuras 10B y 13C).

Ya en 2004 (figuras 10C y 13D) se observó un ensanchamiento en la parte norte de la geoforma debido a la depositación de sedimento, como consecuencia del trasporte longitudinal que prevalece en la zona. Como resultado de esta dinámica se presentó nuevamente una unión al continente de su parte libre, configurándose una *Bay-mouth Barrier*.

En 2009 la deriva litoral y el suministro de sedimento generaron una nueva espiga por la parte externa de la *Bay-mouth Barrier* formada en el 2004. Por lo tanto, a partir de este momento se configura una geoforma completa formada por una *Baymouth Barrier* en la parte interna y una *Continuation Spit* en la parte externa, con una mayor exposición a la dinámica marina

(figuras 10D y 13E). En 2012 la deriva litoral y la dinámica del oleaje alargaron la geoforma exterior que se conformó en 2009, convirtiéndola en una *Constrained Bay-mouth Spit* (figuras 10E y 13F).

Para 2013 (figuras 10F y 13G) la geoforma vuelve a conectarse con el continente, cerrando completamente la bahía de Amansaguapos, configurándose nuevamente una *Bay-Mouth Barrier*.

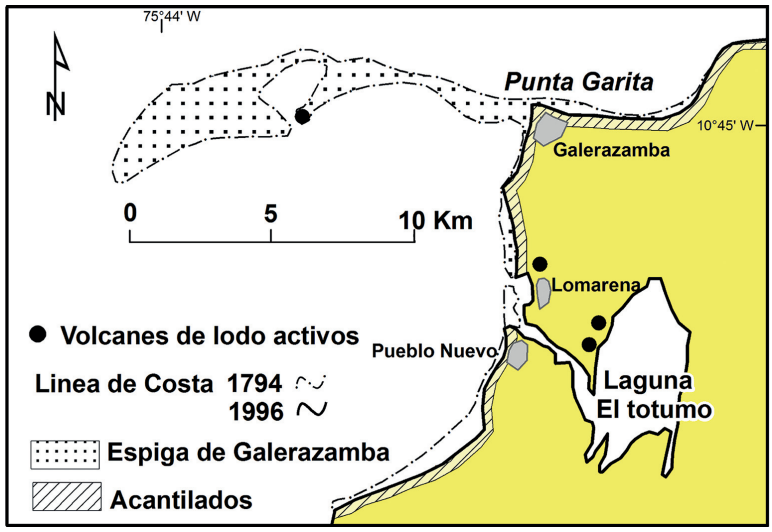

Figura 12. Morfología de la espiga de Galerazamba (Bolívar) en 1794, antes de la desaparición de la misma. (Tomado y modificado de [29]).

Como se observa en la Figura 13, la espiga ha tenido una evolución bastante irregular a lo largo del tiempo; en algunos casos, como se muestra en la Figura 13B, la espiga tiene una curvatura o gancho hacia dentro de la bahía de Amansaguapos; del mismo modo, en las figuras 13 C, D, E, F, G, H se observan formas similares e irregulares en dirección de la bahía, lo que es descrito por [31] como espigas curvas, afirmando que estas formaciones ocurren cuando la dirección del oleaje cambia y se aproxima desde una dirección diferente a la habitual, causando que el sedimento en el extremo de la espiga cambie su dirección. Este comportamiento del oleaje ocurre todos los años en el Caribe colombiano, debido a que la ZCI oscila entre los 0° y 12°N de latitud, permitiendo cuando ésta se encuentra en la latitud 12° que direcciones del W y del WSW incidan de forma directa sobre la espiga (Figura 9), generando cambios notables en su forma.

Las imágenes de 2013 y 2014, figuras 13G y 13H, respectivamente, presentan aperturas similares a *tidal inlets* que se abren y se cierran sobre la barra en distintas ubicaciones, como resultado de procesos mareales y el cambio de dirección del oleaje producido cuando la ZCI se ubica entre los 10° y 12° N de latitud, lo que interrumpe la deriva litoral habitual y debilita o disminuye el ancho de algunas zonas de la espiga por incidencia directa de oleajes del W o WSW, dando paso a que las fuerzas producidas por la marea abran estas bocas, permitiendo el intercambio entre las aguas de la bahía de Amansaguapos y el mar Caribe. Posteriormente, cuando la ZCI baja entre 0° y 5°N de latitud el oleaje vuelve a incidir de la dirección NE, reestableciendo la deriva litoral, la cual es más fuerte que las corrientes generadas por la marea en esta zona por lo que las bocas vuelven a cerrarse con sedimento. Lo que concuerda con las descripciones hechas por [31], quienes afirman que deben existir fuerzas de corrientes generadas por las mareas lo suficientemente fuertes para mantener la arena de la deriva litoral fuera de la boca, de lo contrario ésta puede cerrarse permitiendo la formación de una *Bay-Mouth Barrier*, como es este caso.

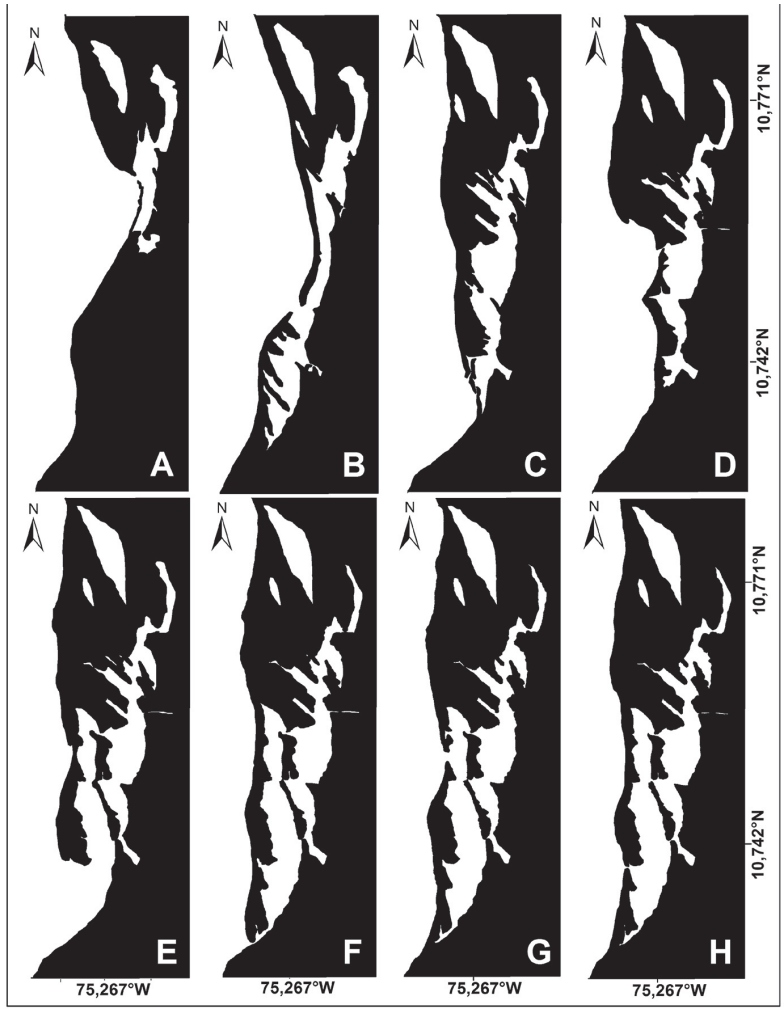

Figura 13. Morfología del sector de la espiga de Galerazamba (Bolívar) en varios años. **(A)** Registro inicial de la espiga según fotografía IGAC de 1948, diez años después de la erupción del volcán de lodo. **(B)** Evolución de la espiga según fotografía IGAC de 1976. **(C)** Evolución de la espiga según fotografía IGAC de 1989. **(D)** Primer registro del cierre de la espiga con el continente según imagen *Google Earth Pro* año 2004. **(E)** Evolución de la espiga según imagen *Google Earth Pro* año 2009. **(F)** Evolución de la espiga según imagen *Google Earth Pro* año 2012. **(G)** Evolución de la espiga según imagen *Google Earth Pro* año 2013. **(H)** Evolución de la espiga según imagen *Google Earth Pro* año 2014.

Estas geoformas hacen parte de un amplio grupo de barreras o sistemas de barrera, que se desarrollan por encima del nivel de marea [4] y [2]. Según [30], estos sistemas de barreras no se presentan en playas macromareales (rangos de marea mayores a 4 m), ya que la acción de las fuertes corrientes generadas por éstas no permite que el oleaje deposite el sedimento sobre un mismo nivel de marea. Por lo tanto, a partir de las condiciones micro-mareales y los cambios en la dinámica del oleaje experimentados en el Caribe colombiano se puede explicar la alta variabilidad de la morfología en la zona de Galerazamba. Según [32] el rango de marea marca la importancia de los procesos generados por el oleaje en la zona de swash, zonas de rompiente y bancos de arena; así como también el suministro de sedimento en las zonas donde se forman estos sistemas de barreras [5].

Conclusiones

Los rangos mareales en esta zona del Caribe colombiano y el análisis multitemporal de la espiga de Galerazamba indican que éste es un sistema dominado principalmente por la energía del oleaje, el cual está caracterizado por las épocas climáticas de la zona descritas en la sección Área de Estudio del presente artículo. Las direcciones de incidencia que más influyen en la zona de interés provienen del N, NNE, NNW, NW y, en algunas ocasiones, WSW, con alturas de oleaje entre 1.4 y 2.39 m, y con periodos pico entre 1.4 y 15.4 s. Este oleaje incidente genera patrones de circulación paralelos a la playa que transportan el sedimento de la zona en dirección norte–sur la mayor parte del tiempo, cambiando a sur-norte cuando se presentan oleajes de la dirección WSW. Estas direcciones de oleaje y patrones en las corrientes han transformado morfológicamente la espiga hasta la clasificación actual como *Bay-Mouth Barrier*.

En la evolución histórica de los cambios morfológicos de la espiga de Galerazamba se prestó especial atención a los cambios antrópicos generados en esta parte del litoral colombiano por el encañonamiento del río Magdalena, aparte de otros factores como la erupción volcánica que desprendió lo que se habría denominado inicialmente como *Fly Spit*, con lo que se concluyó que muy posiblemente la falta de sedimento en el sistema haya influido en los fuertes cambios presentados en la espiga, desde la descripción inicial hecha por Francisco J. Fidalgo en 1805.

Los resultados de estimación de áreas (Tabla VII) permitieron establecer claramente dos periodos evolutivos. El primero caracterizado por una pérdida de sedimentos entre 1948 y 1989 (figuras 10A y 10B) y un segundo, con incremento en la cantidad de sedimentos a partir del año 1989 hasta el 2012 (figuras 10C, 10D y 10E). A partir de este año se observó nuevamente una tendencia hacia la pérdida de sedimentos, que dada la disponibilidad de imágenes históricas utilizadas en la presente investigación y lo corto del periodo de tiempo (2012 a 2014) no es posible afirmar que se trate de una tendencia generalizada (Figura 10F).

La clasificación de las geoformas presentes durante la evolución de la espiga de Galerazamba a través del tiempo, cobra especial relevancia, en primer lugar porque se encuentran estrechamente ligadas con las épocas climáticas reguladas por la ZCI, y segundo porque en Colombia no existe un estudio que clasifique este tipo de formaciones de acuerdo con un criterio internacional para su aplicación por parte de la comunidad científica nacional.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación Colciencias (Colciencias) por la financiación del proyecto "Erosión costera en la región de Cartagena (Galerazamba-Bocachica), costa Caribe colombiana, módulo Oceanografía", cuya información de campo fue utilizada para el desarrollo de la presente investigación; así como también a los evaluadores, cuyos aportes permitieron mejorar de forma significativa el manuscrito.

Literatura citada

[1] Ollerhead, J. The evolution of Buctouche Spit, New Brunswick, Canada. Ph.D. Thesis, University of Guelph. 156 pp. 1993.

[2] Davidson-Arnott, R.G.D. Introduction to Coastal processes and Geomorphology. Cambridge University Press. 442 pp. 2010.

[3] Petersen, D., Deigaard, R., Fredsøe, J. Modelling the morphology of sandy spits. *Coastal Engineering* 55, 671–684. 2008.

[4] Evans, O.F. The Origin of Spits, Bars, and Related Structures. *The Journal of Geology*, Vol. 50, No. 7, pp. 846-865. 1942.

[5] Davis, R.A. A New Look at Barrier-Inlet Morphodynamics. *Journal of Coastal Research.* 69, 1–12. 2013.

[6] Martínez, J.O.; Pilkey, O.H., JR & Neal, W.J. Rapid Formation of Large Coastal Sand Bodies after Emplacement of Magdalena River Jetties, Northern Colombia. Environ Geol Water Sci Vol. 16, No. 3, 187-194. 1990.

[7] Correa, I.D., Alcántara-Carrió, J. & González R, D.A. Historical and Recent Shore Erosion along the Colombian Caribbean Coast. *Journal of Coastal Research, Special Issue* 49. 2005.

[8] Ramirez, J. El volcán submarino de Galerzamaba. *Revista de la Academia*

Colombiana de Ciencias Exactas, Físico-químicas y Naturales, 10, 301-314. 1959.

[9] Restrepo J.C., Schrottke, K., Traini, C., Ortíz, J.C., Orejarena, A., Otero, L., Higgins, A., Marriaga, L. Sediment Transport Regime and Geomorphological Change in a High Discharge Tropical Delta (Magdalena River, Colombia): Insights from a Period of Intense Change and Human Intervention (1990-2010). *Journal of Coastal Research* (DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-14-00263.1). 2015.

[10] Otvos E.G. Coastal barriers—Nomenclature, processes, and classification issues. Geomorphology, 139-140, 39-52 (Doi:10.1016/j.geomorph.2011.10.037). 2012.

[11] Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). Climatología de los principales puertos del Caribe colombiano. Turbo–Golfo de Urabá. 2010.

[12] Andrade, C.A. The Circulation and Variability of the Colombian Bassin in the Caribbean Sean. Wales, England: University of Wales, Doctoral thesis, 225 pp. 2000.

[13] Molares, R. Clasificación e identificación de los componentes de marea del Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH 22*, 105-114. 2004.

[14] Osorio A., Montoya R. Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIII™ y diferentes fuentes de datos. *Bol. Cient. CIOH 27*, 37-56. 2009.

[15] Dirección General Marítima–Dimar. Atlas Geomorfológico del Litoral Caribe Colombiano. (ISBN 987-958-57723-7-3), 227 pp. 2013.

[16] Tolman H.L. Validation of WAVEWATCH III version 1.15 for a global domain. National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Modeling Center – Ocean Modeling Branch. Technical Note. 33 pp. 2002a.

[17] Tolman H.L. Distributed-memory concepts in the wave model WAVEWATCH III. Parallel Computing. 28, 35-52 pp. 2002b.

[18] Tolman H.L. Effects on numerics on a physics of a thirdgenerationwind wave model. J. Phys. Oceanogr. 22, 1095-1111. 1992.

[19] Orejarena, A., Otero, L. Dagua, C. Rocha, L. y Herrera, E. Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el extremo norte del golfo de Urabá. *Bol. Cient. CIOH, 31*:109-124. 2013.

[20] Booij, N., Ris, R.C. Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. C4, 7649-7666 pp. 1999.

[21] Izaguirre, C. Estudio de la variabilidad climática de valores extremos de oleaje [Tesis doctoral]. Cantabria: Universidad de Cantabria. Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. 2010.

[22] GIOC, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas 2003h. Modelo de corrientes de rotura en playas (COPLA-MC/SP). Dirección General de Costas-Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria, España, 77 pp.

[23] GIOC, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas 2003h. Modelo de propagación de oleaje espectral (Oluca-SP). Dirección General de costas-Ministerio de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria, España, 170 pp.

[24] GIOC, Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas 2003j. 2DH Morphodynamic Evolution Model for Near Shore Areas (MOPLA). State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, 262 pp.

[25] Pajak, M.J. & Leatherman S. The High Water Line as Shoreline Indicator. *Journal of Coastal Research*, Vol. 18, No. 2, pp. 329-337. 2002.

[26] Smith, G.L. & Zarillo, G.A. Calculating Long-Term Shoreline Recession Rates Using Aerial Photographic and Beach Profiling Techniques. Journal of Coastal Research, Vol. 6, No. 1, pp. 111-120. 1990.

[27] Stockdon, H.F., Sallenger, A.H., List, J.H. & Holman, R. A. Estimation of Shoreline

Position and Change using Airborne Topographic Lidar Data. Journal of Coastal Research, Vol. 18, No. 3: 502-513. 2002.

[28] FitzGerald, D.M. & Buynevich, I.V. Coastal Barriers. In: Encyclopdia of Life Support System, UNESCO-EOLSS Publishers Co, Ltd. 2005.

[29] Ramírez, J. Los diapiros del mar Caribe colombiano. Memorias del I Congreso Colombiano de Geología. Bogotá, 31-39. 1969.

[30] Hayes M.O. & FitzGerald D.M. Origin, Evolution, and Classification of Tidal Inlets, *Journal Coast Research*. 69, 14–33. 2013.

[31] Dean, R.G. & Dalrymple, R.A. Coastal processes: With engineering applications. New York: Cambridge University Press. 2002.

[32] Masselink, G. & Short, A. Effect of Tide Range on Beach Morphodynamic and Morphology: A Conceptual Beach Model. *Journal of Coastal Research.* 1993.