



Morfodinámica de una playa tropical macromareal: La Bocana, costa Pacífica de Colombia

Morphodynamics of a macro-tidal tropical beach: La Bocana, Pacific coast of Colombia

Oswaldo Coca y Constanza Ricaurte-Villota*

0000-0002-3987-4376

0000-0003-1554-4994

Programa de Geociencias Marinas y Costeras, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés" (Invemar), Playa Salguero, Santa Marta, Colombia. constanza.ricaurte@invemar.org.co*

* Autor de correspondencia / Corresponding author

RESUMEN

Este estudio analiza la morfodinámica de la playa La Bocana en el Pacífico tropical colombiano, en un régimen macromareal. Los datos se tomaron con un sistema de posicionamiento global diferencial para generar modelos digitales de elevación y perfiles de playa entre 2014 y 2019. Posteriormente, se realizó una clasificación morfodinámica utilizando los parámetros de velocidad de caída adimensional y amplitud relativa de las mareas. Los resultados indican que los tipos de playa predominantes fueron dominados y modificados por la marea tipo disipativas (modificadas por mareas, dominadas por mareas y erosivas) e intermedias (modificadas por mareas y no erosivas). Se observaron perfiles reflectantes frente a la playa (época erosiva) en 2014 y 2015. A pesar de que la playa estudiada se localiza en el trópico, los resultados no difieren con los propuestos para playas de latitudes medias. Los resultados sugieren el dominio del rango mareal en la determinación de los estados morfodinámicos de la playa. Este estudio muestra que la playa La Bocana tiene diferentes estados morfodinámicos espacio-temporales, es decir que no existe un único estado de playa representativo. Seis años de datos muestran variaciones intranuales (estacionales) o bajo ciertas condiciones ambientales, las cuales cambian significativamente las playas.

PALABRAS CLAVE: morfología de playa, erosión costera, oleaje, mareas, clasificación morfológica.

ABSTRACT

This study analyzes the morphodynamics of La Bocana beach in the tropical Colombian Pacific, in a macro-tidal regime. The data were taken with a differential global positioning system to generate digital elevation models and beach profiles between 2014 and 2019. Subsequently, a morphodynamic classification was performed using the parameters of dimensionless fall speed and relative amplitude of the tides. The results indicated that the predominant beach types were dominated and modified by the tide: dissipative type (modified by tides, dominated by tides and erosive) and intermediate (modified by tides and non-erosive). Reflective profiles were observed in front of the beach (erosive season) in 2014 and 2015. Although the studied beach is located in the tropics, the results do not differ from those proposed for mid-latitude beaches. The results suggest the dominance of the tidal range in the determination of the morphodynamic states of the beach. This study shows that La Bocana beach has different spatiotemporal morphodynamic states, that is, there is no single representative beach state. Six years of data show intra-annual (seasonal) variations or under certain environmental conditions which significantly change the beaches.

KEYWORDS: beach morphology, coastal erosion, wave, tidal, morphological classification.

INTRODUCCIÓN

La morfodinámica proporciona una mejor comprensión de las relaciones entre los procesos costeros y las respuestas morfológicas en la zona litoral (Wright y Thom, 1977). Esta interacción se aplica a las playas (Wright *et al.*, 1979) y fue insertada inicialmente por autores como Sonu (1973) y Sonu *et al.* (1973). Short (2020) define el tipo de playa como la forma de una playa en función de la contribución relativa de las olas y las mareas, mientras que el estado de la playa se refiere al rango morfodinámico de cada tipo. Además del dominio del espacio-tiempo, el núcleo de la morfodinámica es la interacción constante de dos grupos de parámetros: por un lado, sedimentos y geología y, por el otro, olas, vientos y corrientes (Jackson y Short, 2020).

Las playas están moduladas por el oleaje. Esto (con la marea) les permite organizarse en una secuencia de estados y tipos morfodinámicos (Jackson y Short, 2020), los cuales han sido propuestos por Wright y Short (1984), Masselink y Short (1993) y Short (1999). Por lo tanto, la morfodinámica de las playas en ambientes naturales se puede clasificar como continuamente dominada (predominante) por el oleaje o modificada y dominada por las mareas (Gómez-Pujol y Orfila, 2020; Short, 2020). Otros estudios (Short, 1999; Masselink *et al.*, 2006; Reichmüth y Anthony, 2007, 2008; Price *et al.*, 2014) especifican que las mareas, el nivel de energía de las olas y la morfología de la playa determinan el tipo, la intensidad y la duración de los procesos que operan en el perfil transversal de la playa. Estos procesos dan forma a la playa, pero dependen del balance de sedimentos, los cuales son aportados a través de diferentes fuentes que están determinadas por la entrada o salida de la playa (células litorales) (USACE, 1984) y relacionadas con la acreción y la erosión costera (Komar, 1983). En los sistemas mareales o de mareas dominantes (TD), la energía de las olas es muy baja, y la oscilación de las mareas y las corrientes de marea cobran importancia. Esto hace que la clasificación varíe de una energía más alta donde dominan las olas a una más baja donde domina la marea (Short, 2020).

Las clasificaciones de playas más importantes a nivel mundial se han realizado en Australia (Wright *et al.*, 1979; Wright and Short, 1984; Masselink y Short, 1993; Masselink y Pattiaratchi, 2001; Masselink *et al.*, 2006; Sénéchal *et al.*, 2009; Valiente *et al.*, 2019) y el Reino Unido (Scott *et al.*, 2011; Valiente *et al.*, 2019). También se han realizado clasificaciones en Brasil (Pereira *et al.*, 2010; Andreoli *et al.*, 2019; Holanda *et al.*, 2020), Malasia (Mustapa *et al.*,

INTRODUCTION

Morphodynamics provide a better understanding of the relationship between coastal processes and morphological responses in littoral areas (Wright and Thom, 1977). This interaction applies to beaches (Wright *et al.*, 1979) and was introduced by authors such as Sonu (1973) and Sonu *et al.* (1973). Short (2020) defines the beach type as the shape of a beach according to the relative contribution of the waves and the tides, while the beach state refers to the morphodynamic range of each type. In addition to the spatial-temporal domain, the core of morphodynamics is the constant interaction between two parameter groups: on the one hand, sediments, and geology; and on the other hand, waves, winds, and currents (Jackson and Short, 2020).

Beaches are modulated by the waves. This (with the tide) allows them to be organized within a sequence of morphodynamic states and types (Jackson and Short, 2020), which have been proposed by Wright and Short (1984), Masselink and Short (1993) and Short (1999). Thereupon, beach morphodynamics in natural environments can be classified as continuously dominated (predominant) by the waves or as modified and dominated by the tide (Gómez-Pujol and Orfila, 2020; Short, 2020). Other studies (Short, 1999; Masselink *et al.*, 2006; Reichmüth and Anthony, 2007, 2008; Price *et al.*, 2014) state that the tides, the wave energy level, and beach morphology determine the type, intensity, and duration of the processes at work in the transversal profile of a beach. These processes shape the beach but depend on the balance of sediments, which are contributed through different sources determined by the beach inputs and outputs (littoral cells) (USACE, 1984) and related to accretion and coastal erosion (Komar, 1983). In tidal or tide-dominated (TD) systems wave energy is very low, and the oscillation of the tides and the tide currents becomes important. This causes the classification to vary from a high energy dominated by waves to a lower energy dominated by the tide (Short, 2020).

The most important beach classifications around the world have been carried out in Australia (Wright *et al.*, 1979; Wright and Short, 1984; Masselink and Short, 1993; Masselink and Pattiaratchi, 2001; Masselink *et al.*, 2006; Sénéchal *et al.*, 2009; Valiente *et al.*, 2019), and the United Kingdom (Scott *et al.*, 2011; Valiente *et al.*, 2019). Classifications have also been carried out in Brazil (Pereira *et al.*, 2010; Andreoli *et al.*, 2019; Holanda *et al.*, 2020), Malaysia (Mustapa *et al.*, 2015), Mexico (where

2015), México (donde se realizaron análisis comparativos entre secciones subaéreas y submareales) (Ruiz de Alegría-Arzaburu *et al.*, 2013, 2016, 2017; Torres-Freyermuth *et al.*, 2017; Ruiz de Alegría-Arzaburu y Vidal-Ruiz, 2018) y Francia (Sénéchal *et al.*, 2009; Castelle *et al.*, 2014; Sénéchal y Ruiz de Alegría-Arzaburu, 2020).

Pocos trabajos en Colombia han clasificado los estados morfodinámicos de las playas. Agámez (2013) clasificó algunas playas del Caribe. En la región del Pacífico se han realizado trabajos en playas mesomareales rocosas, como el de Gómez-García *et al.* (2014); por otro lado, se han realizado estudios en la región, pero relacionados con la morfodinámica deltaica (Restrepo *et al.*, 2002; Restrepo y López, 2008). Otros autores caracterizaron la morfodinámica de las playas colombianas como resultado de las condiciones climáticas, es decir, perfiles de época seca (perfil de invierno en latitudes medias) o época húmeda (perfil de verano en latitudes medias) dominados únicamente por el oleaje, pero omitiendo las condiciones ambientales de cada región (Correa y Restrepo, 2002; Agámez, 2013). Teniendo en cuenta que existen muchas diferencias ambientales entre el Caribe y el Pacífico colombianos y sus correspondientes playas (Ricaurte-Villota *et al.*, 2018; Coca y Ricaurte-Villota, 2019), no se puede generalizar una clasificación para las costas de Colombia.

El objetivo de esta investigación es generar una clasificación morfodinámica para la playa La Bocana en el Pacífico colombiano y determinar las causas naturales que afectan la morfología de la playa a escala intra e interanual. Se presenta una clasificación morfodinámica de una playa dentro del Pacífico tropical colombiano, la cual está dominada por un sistema macromareal. Además, las variables que influyen en la clasificación se definen a diferentes escalas espaciales y temporales. Desde puntos de vista de ciencia básica y aplicada, y en una perspectiva de gestión costera, es importante generar los estudios morfodinámicos de las playas, ya que aún no se comprende bien cómo las playas tropicales responden a los procesos ambientales que varían a lo largo de un año, como el suministro de arena (modulado por la precipitación a través de la descarga de ríos) y el forzamiento de las olas, lo cual impide el desarrollo racional de las zonas costeras colombianas. Comprender el funcionamiento, el período, la duración y las causas de la migración de los sedimentos es esencial desde la perspectiva de las intervenciones (obras de mitigación) de las playas con un historial de erosión costera (Karunaratna *et al.*, 2012; Castelle *et al.*, 2014; Sénéchal y Ruiz de Alegría-Arzaburu, 2020).

comparative analyses between subaerial and sub-tidal sections were carried out) (Ruiz de Alegría-Arzaburu *et al.*, 2013, 2016, 2017; Torres-Freyermuth *et al.*, 2017; Ruiz de Alegría-Arzaburu and Vidal-Ruiz, 2018), and France (Sénéchal *et al.*, 2009; Castelle *et al.*, 2014; Senechal and Ruiz de Alegría-Arzaburu, 2020).

In Colombia, few works have classified beach morphodynamic states. Agámez (2013) classified some beaches in the Caribbean. In the Pacific region, works have been carried out in rocky mesotidal beaches, such as the one by Gómez-García *et al.* (2014). On the other hand, studies have been conducted in the region, albeit related to delta morphodynamics (Restrepo *et al.*, 2002; Restrepo and López, 2008). Other authors have characterized the morphodynamics of Colombian beaches because of climatic conditions, that is, dry epoch profiles (winter profiles in middle latitudes) or wet epoch profiles (summer profiles in middle latitudes), only dominated by the waves, but omitting the environmental conditions of each region (Correa and Restrepo, 2002; Agámez, 2013). Considering that there are many environmental differences between the Colombian Caribbean and Pacific regions and their corresponding beaches (Ricaurte-Villota *et al.*, 2018; Coca and Ricaurte-Villota, 2019), a classification for the Colombian coasts cannot be generalized.

The objective of this research is to carry out a morphodynamic classification for La Bocana beach in the Colombian Pacific and determine the natural causes affecting beach morphology at intra- and interannual scales. The morphodynamic classification on a beach in the Colombian tropical Pacific is presented, which is dominated by a microtidal system. Moreover, the variables influencing the classification are defined on different spatial and temporal scales. From basic and applied science points of view, and from a perspective of coastal management, it is important to carry out beach morphodynamic studies, as the way in which tropical beaches respond to environmental processes such as sand supply (modulated by precipitation via river discharge) and wave forcing, which hinders the rational development of coastal areas in Colombia. Understanding the functioning, period, duration and causes of sediment migration is essential from a perspective of interventions (mitigation works) in beaches with a coastal erosion background (Karunaratna *et al.*, 2012; Castelle *et al.*, 2014; Senechal and Ruiz de Alegría-Arzaburu, 2020).

ÁREA DE ESTUDIO

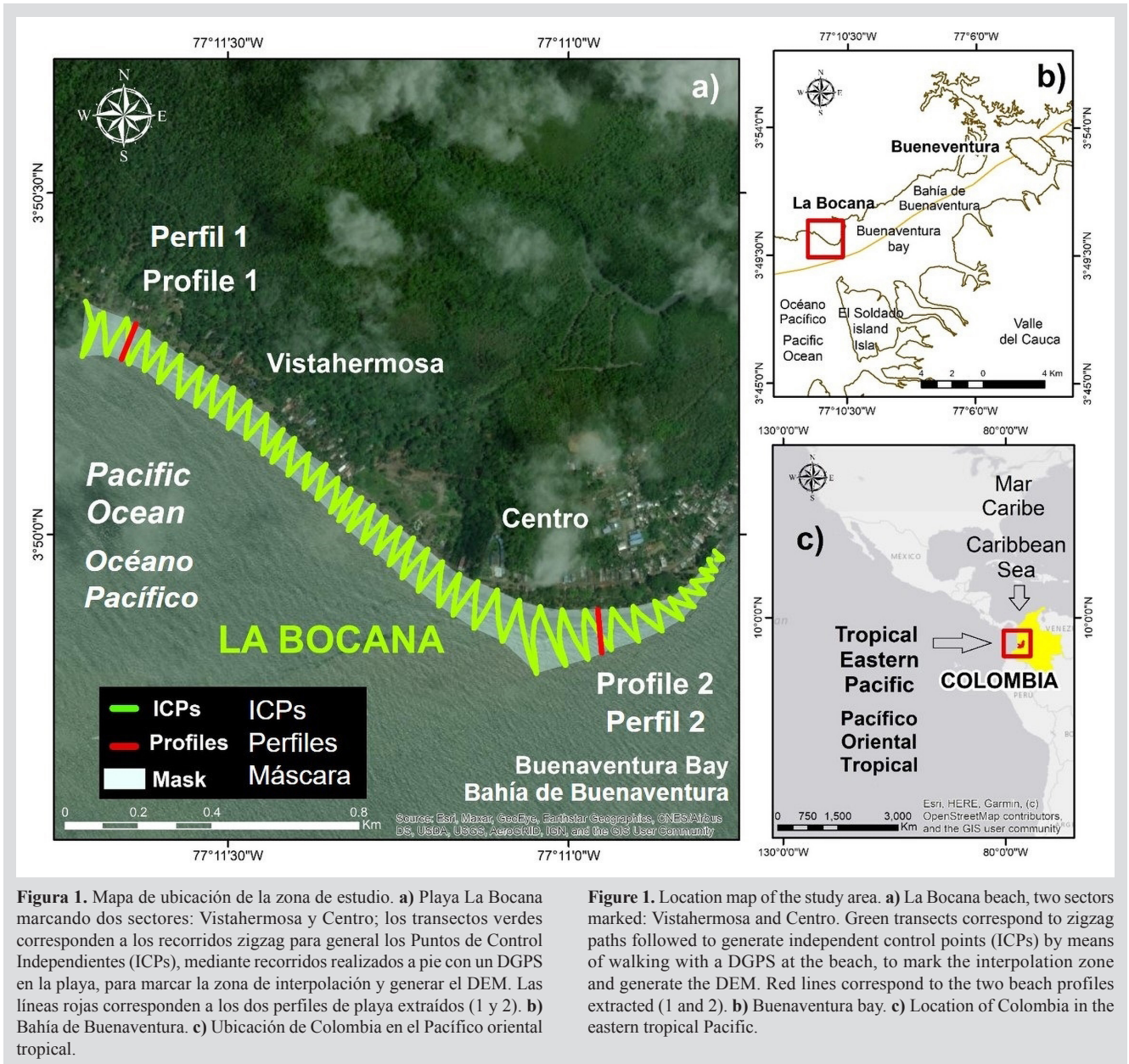
La playa La Bocana, de 2,13 km de longitud, se ubica al norte de la boca de la bahía de Buenaventura, en la costa del Pacífico colombiano, que forma parte del Pacífico oriental tropical (Figura 1). La playa precede a acantilados activos, con pendientes de 2 - 6°, compuesta por arenas líticas de grano fino-medio con abundante contenido en minerales ferromagnesianos, por lo que adquiere colores oscuros, y presencia ocasional de bioclastos. La región se caracteriza por una precipitación media anual de 7 609 mm·año⁻¹ (Ricaurte-Villota *et al.*, 2018), entre las más altas del mundo. Las mareas son mixtas semidiurnas con una amplitud macromareal media (Vásquez-López *et al.*, 2020) de aproximadamente 4,5 m en marea viva (Correa y Morton, 2010). El oleaje alcanza aproximadamente 0,5-1,5 m (Martínez-Ardila *et al.*, 2005), pero puede alcanzar una altura de 2,5 a 3,5 m durante períodos de viento fuerte (Correa y Morton, 2010). Thomas *et al.* (2014) menciona una altura significativa de la ola (Hs) entre 0,88 y 1,02 m, con una mínima de Hs de 0,71 y una máxima de 1,21 m. En abril presenta la altura de ola más baja, mientras que en octubre se observa la altura de ola más alta (Ricaurte-Villota *et al.*, 2018). El promedio del viento es de 2,3 a 3,7 m·s⁻¹ y una orientación predominantemente nororiental (Thomas *et al.*, 2014). La geomorfología del Pacífico está dominada por costas bajas (71 %) clasificadas como deltas (San Juan), islas barrera, costas fangosas, bocas, playas continentales y estuarios (Posada *et al.*, 2009).

Las playas en el área de estudio generalmente tienen una amplitud variable (entre 2 m en marea alta y aproximadamente 600 m en marea baja) y una berma bien definida en la línea de vegetación con una gran acumulación de materiales vegetales y basura. La berma tiene una altura de hasta 5 m y, en algunas partes, pequeñas crestas que marcan el avance de la última marea más alta (Posada *et al.*, 2009). Las estructuras sedimentarias, como las ondas, son comunes en la banda de la marea media, mientras que los rastros de bioturbación se vuelven más frecuentes en la parte expuesta durante la marea baja; también se observan estructuras de escorrentía (Posada *et al.*, 2009). El rango de mareas del área deriva de la presencia de un extenso delta de marea baja en el extremo sur de la boca de la bahía (isla El Soldado), lo que evidencia el predominio de fuertes corrientes de marea baja en la deriva costera. Este delta de refluo no se ve frente a la playa La Bocana.

STUDY AREA

La Bocana beach (2.13 km long) is located north of the Buenaventura Bay mouth in the Colombian Pacific coast, which is part of the eastern tropical Pacific (Figure 1). The beach precedes active cliffs with 2 - 6° slopes and is composed of medium-fine grain lithic sands with abundant ferromagnesian mineral contents, which is why it acquires dark colors, with the occasional presence of bioclasts. The region is characterized by an annual average precipitation of 7,609 mm·year⁻¹ (Ricaurte-Villota *et al.*, 2018), among the highest in the world. The tides are mixed semidiurnal, with an average macrotidal amplitude (Vásquez-López *et al.*, 2020) of approximately 4.5 m in spring tides (Correa and Morton, 2010). The waves reach approximately 0.5-1.5 m (Martínez-Ardila *et al.*, 2005), but they can reach heights between 2.5 and 3.5 m during strong wind periods (Correa and Morton, 2010). Thomas *et al.* (2014) mentions a significant wave height (Hs) between 0.88 and 1.02 m, with a minimum Hs 0.71 and a maximum value of 1.21 m. The lowest wave height occurs in April, while the highest value is observed in October (Ricaurte-Villota *et al.*, 2018). The average wind speed is 2.3 to 3.7 m·s⁻¹, with a predominantly northeastern direction (Thomas *et al.*, 2014). The geomorphology of the Pacific is dominated by low coasts (71 %) classified as deltas (San Juan), barrier islands, muddy coasts, lagoon mouths, continental beaches, and estuaries (Posada *et al.*, 2009).

The beaches in the study area generally have variable amplitude (between 2 m during high tides and approximately 600 m during low tides) and a well-defined berm at the vegetation line, with a great accumulation of plant material and wastes. The berm is up to 5 m high, and, in some parts, it has little crests that mark the advancement of the latest highest tide (Posada *et al.*, 2009). Wave-formed sedimentary structures are common in the medium-tide strip, whereas bioturbation traces are more frequent in the areas exposed during low tides. Runoff structures are also observed (Posada *et al.*, 2009). The tide range in the area derives from the presence of an extensive low-tide delta at the southern end of the bay mouth (El Soldado island), which evinces the predominance in the coastal drift of strong low-tide currents. This ebb delta is not seen in front of La Bocana beach.



MÉTODOS

Datos topográficos (DEM y perfiles de playa)

Los datos topográficos de los Puntos de Control Independientes (ICP, por sus siglas en inglés) se obtuvieron entre febrero y noviembre durante seis años (2014–2019) (Tabla 1) en el área expuesta durante la marea más baja o playa del área emergida. Los datos se obtuvieron con un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS) con GNSS (GPS y GLONASS) y corrección geoidal post-proceso (Fontán *et al.*, 2009) utilizando el software Topcon Tools y la estación Buenaventura MAGNA ECO Network que se

METHODS

Topographic data (DEM and beach profiles)

The topographic data on the independent control points (ICPs) were obtained between February and November for six years (2014–2019) (Table 1) in the area exposed during the lowest tides or at the beach of the emerged area. The data were obtained via a differential global positioning system (DGPS) with GNSS (GPS and GLONASS) and post-processing geoidal correction (Fontán *et al.*, 2009) using the Topcon Tools software and the MAGNA ECO network Buenaventura station located 15 km away from the study

ubica a 15 km del área de estudio. Los ICPs (X,Y,Z) fueron obtenidos utilizando el equipo mencionado en puntos y modo Autocollect (1 dato por segundo) y referenciados en WGS 84 zona 17. Las elevaciones en los sitios fueron la altura media de marea baja (MLT) (+ 12 m de alturas elipsoidales, punta Buenaventura). Los datos fueron tomados en la marea viva (o pujas, nombre local) de cada mes para asegurar una mayor área de playa cubierta por el muestreo, desde el borde del agua, hasta el de la playa trasera. La duración de cada muestreo fue de 4 h (2 h antes y 2 h después del momento de marea más baja) y se utilizó el método de zigzag (Fontán *et al.*, 2009). Los perfiles de playa se tomaron teniendo el mismo punto de referencia: para Centro (3° 49,894' N – 77° 10,954' O) y para Vistahermosa (3° 50,334' N – 77° 11,638' O), y siguiendo la misma dirección tomados con brújula: para Centro (175°) y para Vistahermosa (220°), a partir del punto de referencia. Para el análisis sedimentológico se tomaron tres muestras de los perfiles de playa (zonas infra, meso y supramareal), sobre los dos perfiles de playa (Figura 1).

area. The ICPs (X, Y, Z) were obtained using the equipment at the points and in the *Autocollect* mode (1 data per second), as well as referenced in WGS 84, zone 17. The elevations at the sites were the average height of the low tide (MLT) (+ 12 m in ellipsoidal heights, Buenaventura Point). The data were taken during the spring tide (or *pujas*, a local name) of each month to ensure that a larger beach area was covered by the sampling process, from the edge of the water to the edge of the back beach. The duration of each sampling was 4 h (2 h before and 2 h after the moment with the lowest tide), and the zigzag method was employed (Fontán *et al.*, 2009). The beach profiles were taken with the same reference point (for Centro: 3° 49.894'N–77° 10.954'O; for Vistahermosa: 3° 50.334'N–77° 11.638'O), following the same direction and using a compass (for Centro: 175°; for Vistahermosa: 220°) from the reference point. For the sedimentological analysis, three samples of the two beach profiles were taken (infra-, supra-, and mesotidal areas) (Figure 1).

Tabla 1. Adquisición de datos temporal con DGPS en Playa La Bocana. X con datos y O sin datos.

Table 1. Temporal data acquisition via DGPS from La Bocana beach. X: with data; O: no data.

	Ene / Jan	Feb / Feb	Mar / Mar	Abr / Apr	May / May	Jun / Jun	Jul / Jul	Ago / Aug	Sep / Sep	Oct / Oct	Nov / Nov	Dic / Dec
2014	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O
2015	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O
2016	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O
2017	O	O	X	O	O	O	X	O	X	O	X	O
2018	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O
2019	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	O

Los datos se exportaron en un archivo *shapefile* utilizando el software ArcGIS. El primer filtro consistió en eliminar los puntos con una precisión vertical superior a 0,75 cm. El segundo filtro se calculó utilizando el error cuadrático medio (RMSE), que verificó la precisión de los ICPs frente al valor Z. Posteriormente, los puntos fueron interpolados utilizando sus valores Z bajo el método Kriging (Fontán *et al.*, 2009). Los perfiles de la playa se tomaron con DGPS en los sectores Vistahermosa (Perfil 1) y Centro (Perfil 2), tomando los datos de la corrección ortométrica (Figura 1). El DEM permitió identificar la morfología característica dominante. Las características observadas en los DEM 3D (escala 1:2 000), permitieron generar el modelo de vista en planta predominante adaptado de Wright y Short (1984). Por otro lado, se adaptaron los modelos conceptuales de playa de

The data were exported in *shapefile* format using the ArcGIS software. The first filter consisted of eliminating the points with a vertical precision higher than 0.75 cm. The second filter was calculated using the root mean square error (RMSE), which verified the precision of the ICPs with regard to the Z value. Afterwards, the points were interpolated using their Z values through the Kriging method (Fontán *et al.*, 2009). The beach profiles were taken via DGPS in the Vistahermosa (Profile 1) and Centro (Profile 2) sectors, taking the orthometric correction data (Figure 1). The DEM allowed identifying the dominant characteristic morphology. The characteristics observed in the 3D DEMs (1:2,000 scale) allowed generating the predominant plan view model adapted from Wright and Short (1984). On the other hand, the conceptual beach models of Masselink and

Masselink y Short (1993), para identificar y proponer unos modelos de acuerdo con lo observado en la playa La Bocana. Esos modelos fueron definidos como tipos de playa.

Datos del estado de la playa (morfodinámica)

Para llevar a cabo la clasificación morfodinámica se consideran la pendiente de la playa, el rango de marea, la altura de la ola y el tamaño del grano de sedimento. La pendiente fue extraída de los perfiles de playa 1 y 2 para cada muestreo. Para obtener los datos granulométricos de los sedimentos, las muestras se tamizaron con un vibrador estándar de siete mallas con diferencias de 1ϕ (Phi) con las siguientes aberturas: 2 mm, 1 mm, 500 μm , 250 μm , 125 μm , 63 μm y la medida base (Blott y Pye, 2001). Para la descripción de la marea se emplearon datos de 2014 a 2019 cada cuatro horas de una boya virtual ubicada en la bahía de Buenaventura ($3^{\circ} 54,00' \text{ N}$, $77^{\circ} 6,00' \text{ W}$), extraídos de la predicción de marea “*Windows tide and current prediction program*” (<http://www.wxtide32.com/>). Mientras que la descripción del oleaje se realizó usando los datos de una boya virtual frente al puerto de Buenaventura ($3,61^{\circ} \text{ N}$, $77,61^{\circ} \text{ W}$) para el periodo 2014 a 2019, esta boya corresponde al reanálisis de quinta generación Era-5 proporcionado por el Centro Europeo de Pronósticos a Medio Plazo (ECMWF), con resolución espacial de $0,12^{\circ}$ y resolución temporal cada seis horas (Hersbach *et al.*, 2019). Los regímenes medios y extremos de oleaje en aguas profundas (ECMWF) fueron propagados hacia el borde costero de La Bocana, mediante el modelo numérico de propagación de oleaje espectral SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) (Booij *et al.*, 1999). Este modelo numérico incorpora todos los procesos fundamentales asociados a la propagación del oleaje (refracción, difracción, asomeramiento y rotura).

Estado de playa previsto

El análisis del estado morfodinámico se realizó utilizando los datos mencionados y las clasificaciones propuestas por Wright y Short (1984) y Masselink y Short (1993). Las clasificaciones utilizan un método integrado por una ecuación matemática que predice el estado morfodinámico de una playa a través del parámetro adimensional de caída de grano. La clasificación considera la pendiente de la playa, el rango de marea, la altura de la ola y el tamaño del grano de sedimento. Las ecuaciones para los parámetros de estado morfodinámico de Wright y Short (1984) proponen que los estados de la playa están relacionados con las características de las olas y los sedimentos a través de la velocidad de caída adimensional (ecuación propuesta por Ferguson y Church, 2004):

Short (1993) were adapted, aiming to identify and propose models according to that observed in La Bocana beach. These models were denoted as *beach types*.

Beach state data (morphodynamics)

In performing morphodynamic classification, the beach slope, the tidal range, the wave height, and the sediment grain size are considered. The slope was extracted from beach profiles 1 and 2 for each sampling. To obtain the sediments' granulometric data, the samples were sieved with a seven-mesh vibrating sifter, with differences of 1ϕ (Phi) and the following openings: 2 mm, 1 mm, 500 μm , 250 μm , 125 μm , 63 μm , and the base measurement (Blott and Pye, 2001). To describe the tide, data for the 2014-2019 period were employed. These data were taken from a virtual buoy located in Buenaventura Bay ($3^{\circ} 54.00' \text{ N}$, $77^{\circ} 6.00' \text{ W}$), which extracted information every four hours based on the *Windows tide and current prediction program* (<http://www.wxtide32.com/>). The wave description was carried out using data from a virtual buoy in front of the port of Buenaventura (3.61° N , 77.61° W) for the 2014 - 2019 period. This buoy corresponds to the fifth-generation Era-5 reanalysis provided by the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), with a spatial resolution of 0.12° and a temporal resolution of six hours (Hersbach *et al.*, 2019). The average and extreme deepwater wave regimes (ECMWF) were propagated towards the coastal edge of La Bocana, by means of the SWAN (Simulating Waves Nearshore) numerical spectral wave propagation model (Booij *et al.*, 1999). This numerical model incorporates all of the fundamental processes associated with wave propagation (refraction, diffraction, shoaling, and breaking).

Expected beach state

The morphodynamic state analysis was carried out using the data and the classifications proposed by Wright and Short (1984) and Masselink and Short (1993). These classifications employ a method comprising a mathematical equation that predicts the morphodynamic state of a beach by means of the grain fall dimensionless parameter. The classification considers the beach slope, the tidal range, the wave height, and the sediment grain size. The equations for Wright and Short's morphodynamic state parameters (1984) posit that beach states are related with the characteristics of the waves and sediments via the dimensionless fall velocity (equation proposed by Ferguson and Church, 2004):

$$\Omega = H_b / (w_s T)$$

Donde H_b es la altura de la ola en rompiente, w_s es la velocidad de caída de grano, y T es el periodo medio de la ola. Según Wright y Short (1984), $\Omega < 1$ denota una playa reflectante, $\Omega \sim 6$ denota una playa disipativa y los estados intermedios se denotan por $1 < \Omega < 6$.

De igual manera, se utilizó el modelo de rango relativo de mareas (RTR) (Masselink y Short, 1993), para playas macromareales (> 3 m), que expresa la relación entre el rango de mareas y la altura de la rompiente. Los valores RTR grandes (> 3 m) y pequeños (< 3 m) indican el dominio de las mareas y las olas, respectivamente.

$$RTR = TR / H_b$$

Donde TR es el rango de mareas, y H_b es la altura de la ola en rompiente. Finalmente, se utilizó el modelo conceptual propuesto por Masselink y Short (1993), denominado *Beach Model*, en el que la morfología de la playa (tipo de playa) se puede predecir usando las dos ecuaciones, obteniendo una clasificación morfodinámica basada en la velocidad de caída adimensional (Ω) y el RTR. El modelo mencionado clasifica los estados morfodinámicos en reflejantes, intermedios y disipativos, en función de los modificadores o agentes dominantes según la amplitud de las mareas vivas (*Mean Spring Tide Range*, MSR). Los escenarios son de olas dominantes (WD), mareas modificadas (TM) y mareas dominantes (TD) para rangos bajos, intermedios y altos, respectivamente.

RESULTS

Tipos y estados de playa observados

A partir de la definición y clasificación de los tipos y estados de playa, se tomaron los perfiles de playa medidos y agrupados según su forma y pendiente predominante. Posteriormente, según los resultados de estado y tipo de playa de cada perfil, se adaptaron a los perfiles clasificados y propuestos por Masselink y Short, (1993) y Wright y Short (1984), donde se generaron y propusieron cuatro tipos de playa y uno adicional tras una leve modificación (Tabla 3 y Figura 2). El tipo 4 tuvo una variación espacial y se clasificó como 4-A y 4-B, la diferencia se debe a que se identificó que la berma en ocasiones se encuentra al borde de la playa trasera, mientras que en otras ocasiones se ubica aproximadamente a 20 m de la misma playa trasera en dirección al mar.

$$\Omega = H_b / (w_s T)$$

Where H_b is the wave height at breaking, w_s is the grain fall velocity, and T is the mean wave period. According to Wright and Short (1984), $\Omega < 1$ denotes a reflective beach, $\Omega \sim 6$ denotes a dissipative beach, and the intermediate states are denoted by $1 < \Omega < 6$.

In the same way, this work employed Masselink and Short's (1993) relative tidal range (RTR) model for macrotidal beaches (> 3 m), which expresses the relationship between the tidal range and the breaking height. High (> 3 m) and low (< 3 m) RTR values indicate the dominance of waves and tides, respectively.

$$RTR = TR / H_b$$

Where TR is the tidal range and H_b is the wave height at breaking. Finally, the conceptual model proposed by Masselink and Short (1993) was employed. This model is called *Beach Model*, and it can predict beach morphology (beach type) using the two equations, thus obtaining a morphodynamic classification based on the dimensionless fall velocity (Ω) and the RTR. The model classifies morphodynamic states as reflective, intermediate, and dissipative, as a function of modifiers or dominant agents according to the spring tide amplitudes (*Mean Spring Tide Range*, MSR). Scenarios may involve dominant waves (WD), modified tides (TM), and dominant tides (TD) for low, intermediate, and high ranges, respectively.

RESULTS

Observed beach types and states

Based on the definition and classification of the beach types and states, the beach profiles were taken, measured, and grouped according to their predominant shape and slope. Afterwards, the results obtained regarding the beach state and type of each profile were adapted to the profiles proposed by Masselink and Short (1993) and Wright and Short (1984), generating and proposing four beach types and an additional one with a slight modification (Table 2 and Figure 2). Type 4 showed a special variation and was classified as 4-A and 4-B. The difference is because the berm was occasionally seen at the edge of the back beach, whereas, at other times, it is located 20 m away from the same beach in a seaward direction.

Tabla 3. Resultados de los parámetros Ω , RTR y estado morfodinámico, según la clasificación propuesta por Masselink y Short, (1993).

Tipo / Type	Rango / Range Ω	Rango / Range RTR	Estado morfodinámico / Morphodynamic state
1	$\Omega > 5$	7–15	Disipativo / Dissipative
2	$\Omega > 5$	3–7	Disipativo / Dissipative
3	$\Omega 2-5$	3–7	Intermedio / Intermediate
4-A	$\Omega 0-2$	7–15	Reflexivo / Reflective
4-B	$\Omega 0-2$	7–15	Reflexivo / Reflective

Table 2. Results obtained for the Ω , RTR, and morphodynamic state parameters according to the classification proposed by Masselink and Short (1993).

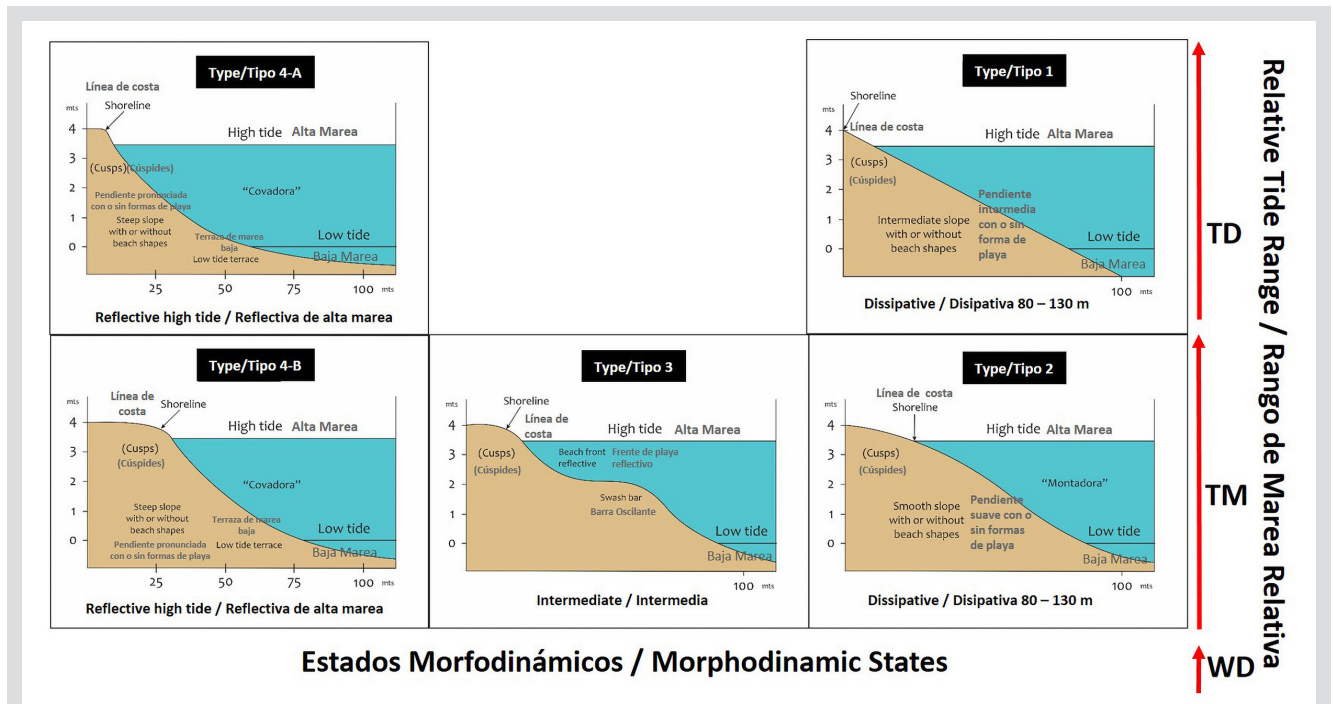


Figura 2. Tipos de playa propuestos a partir de los estados de playa predominantes en la playa La Bocana. Se relacionan con el RTR (Rango de Marea Relativo) propuesto por Masselink y Short (1993).

Figure 2. Beach types proposed based on the predominant beach states in La Bocana beach. They are related to the RTR (Relative Tide Range) proposed by Masselink and Short (1993).

En la figura 2, se puede observar que el perfil de la playa tipo 1 es simple y presenta una sola pendiente hacia el océano; la playa muestra una pendiente suave y presencia de cúspides hacia la parte trasera de la playa; otras formaciones de la playa son suaves o están ausentes; este tipo se clasificó como morfodinámica de playa disipativa. El perfil tipo 2 tiende a acumular sedimentos y presenta una amplia berma hacia el fondo de la playa (sin acantilados ni taludes). La comunidad local llama a este perfil “Montador”, porque acumula gran cantidad de sedimentos, aumentando la elevación de la playa. El tipo 2 presenta una línea costera de posición intermedia que es generada por la berma y no está asociada con procesos de erosión costera o retroceso de la línea costera. Finalmente, la playa puede contener formaciones o ser lisa y se clasifica en un estado morfodinámico disipativo.

Figure 2 shows that the type-1 beach profile is simple and exhibits a single slope towards the ocean. The beach shows a gentle slope and cusps towards the back part of the beach. Other beach formations are soft or absent. This beach type was classified as having dissipative beach morphodynamics. The type-2 profile tends to accumulate sediments and shows a wide berm towards the bottom of the beach (with no cliffs or embankments). This profile is called “Montador” by the local community, as it accumulates a large amount of sediments, increasing the elevation of the beach. Type 2 shows an intermediate-position coastline that is generated by the berm and is not associated with coastal erosion or coastline retreat processes. Finally, the beach may contain formations or be flat, and it is classified into a dissipative morphodynamic state.

El perfil tipo 3 presenta una berma con sedimento acumulado hacia el fondo de la playa; la berma es más corta que la del tipo 2 porque el sedimento se redistribuye a lo largo del perfil, generando una nueva berma (la barra oscilante) en una zona más baja. Se genera un frente de playa reflectante entre las dos bermas y el final del perfil de la playa, que se clasifica como de estado morfodinámico intermedio. Finalmente, la única diferencia entre los tipos 4-A y 4-B es la posición de la berma, que en ocasiones se sitúa hacia la playa trasera (4-A) y en otras ocasiones hacia la mitad del perfil (4-B). El tipo 4-A es propenso a la erosión costera. Los dos tipos de perfil se caracterizan por tener las pendientes más pronunciadas de todos los tipos antes mencionados; las playas pueden o no contener formaciones; las terrazas de marea baja pueden estar presentes en la base o al final del perfil. Las playas de tipo 4 se clasifican como de morfodinámica reflectante de marea alta; los lugareños llaman a este tipo de playa “Covador”.

Se obtuvo cuatro tipos de perfiles de playa para la zona (Tabla 3 y Figura 2). El tipo 4 tuvo una variación espacial y se clasificó como 4-A y 4-B, la diferencia se debe a que se identificó que la berma en ocasiones se encuentra al borde de la playa trasera, mientras que en otras ocasiones se ubica aproximadamente a 20 m de la misma playa trasera en dirección al mar.

Se obtuvieron seis modelos en planta de la playa, relacionados con el tipo de playa (Figura 3b). Del mismo modo, los modelos son el resultado de los promedios de las campañas y de la observación de los DEM obtenidos (Figura 3a). Cada modelo representa las diferencias morfológicas dentro de un mismo año, resultado de diferentes procesos costeros (clima, marea, oleaje, corrientes). Los modelos de vista en planta están relacionados con las formas del relieve observadas en el DEM (Figura 3a) y se clasifican como P11, P12, P13, P14, P15 y P16 (Figura 3b), que se describen a continuación.

El modelo en planta P11 es una representación gráfica en planta superior (modelo playa), correspondiente a los perfiles tipo 1 y 2. En P12 se observa una combinación o intercalación de los estados morfodinámicos reflejante (pendiente alta) y disipativo (pendiente baja), con presencia de formaciones de playa (p. ej. cúspides). El proceso observado en el modelo de planta P13 está relacionado con un perfil tipo 3 con barra oscilante, en el que las olas en dirección perpendicular u oblicua (dos escenarios) generan formas de onda largas (cúspides anchas) en la zona intermedia de la playa; no se descarta la presencia de cúspides de onda corta (poco anchas).

The type-3 profile shows a berm with accumulated sediments towards the bottom of the beach. The berm is shorter than that of type 2, as the sediments are redistributed along the profile, generating a new berm (oscillating bar) in a lower area. A reflective beach front is generated between the two bermas and the end of the beach profile, which is classified into an intermediate morphodynamic state. Finally, the only difference between types 4-A and 4-B is the position of the berm, which is sometimes located towards the back beach (4-A) and sometimes towards the middle of the profile (4-B). Type 4-A is prone to coastal erosion. The two types of profile are characterized by having the most pronounced slopes among the types. The beaches may or may not contain formation. There may be low-tide terraces at the base or at the end of the profile. Type-4 beaches are classified as exhibiting high-tide reflective morphodynamics. This beach type is called “Covador” by the locals.

Four beach profile types were obtained for the area (Table 2 and Figure 2). Type 4 showed a spatial variation and was classified as 4-A or 4-B. The difference is because the berm is sometimes located at the edge of the back beach, and it sometimes is approximately 20 m away from it in a seaward direction.

Six plan models were obtained for the beach, which are related to the beach type (Figure 3b). In the same way, the models are the result of the average of the campaigns and of the observation of the DEMs obtained (Figure 3a). Each model represents the morphological differences within a year, as a result of different coastal processes (weather, tide, waves, currents). The plan view models are related with the relief shapes observed in the DEM (Figure 3a) and are classified as P11, P12, P13, P14, P15, and P16 (Figure 3b), which is described below.

The P11 plan view model is an upper plan graphic representation corresponding to the type 1 and 2 profiles. In P12, a combination or intercalation between the reflective (high slope) and dissipative (low slope) morphodynamic states is observed, with the presence of beach formations, (e.g., cusps). The process observed in the P13 model is related to a type-3 profile with an oscillating bar, in which the waves, in a perpendicular or oblique direction (two scenarios) generate long wave shapes (wide cusps) in the intermediate zone of the beach. The presence of short-wave cusps (small width) is not discarded.

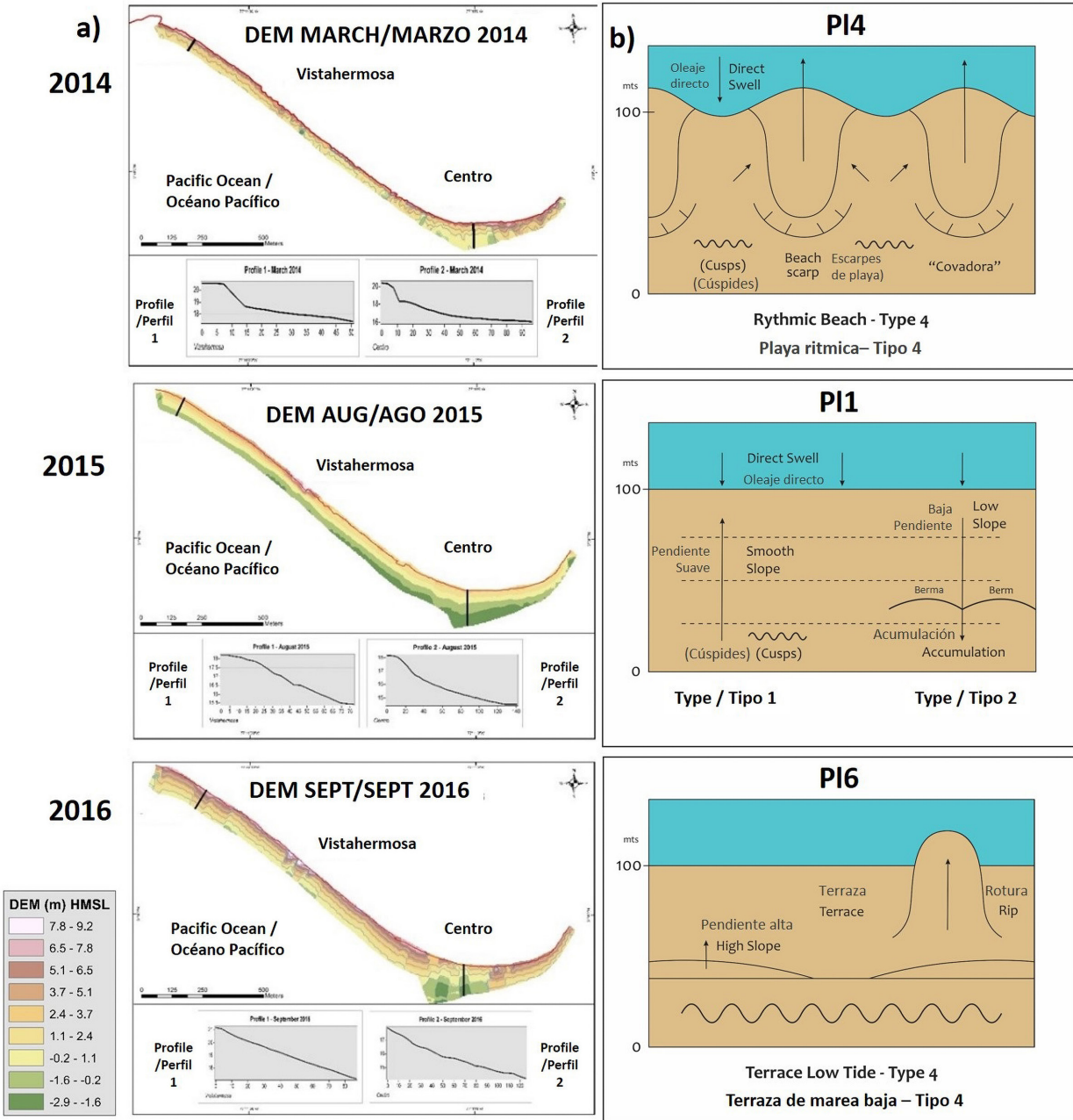


Figura 3. a) Se muestran ejemplos de DEM de playa y perfiles extraídos (1 y 2) para un mes representativo de cada año (2014-2019) con alturas medias en metros sobre el nivel del mar. **b)** Modelo de vista en planta relacionado con el DEM y el tipo de perfil.

Figure 3. a) Examples of the beach DEMs and the extracted profiles (1 and 2) are shown for a representative month of each year (2014-2019), with average heights in meters above the sea level. **b)** Plan view model related with the DEM and the profile type.

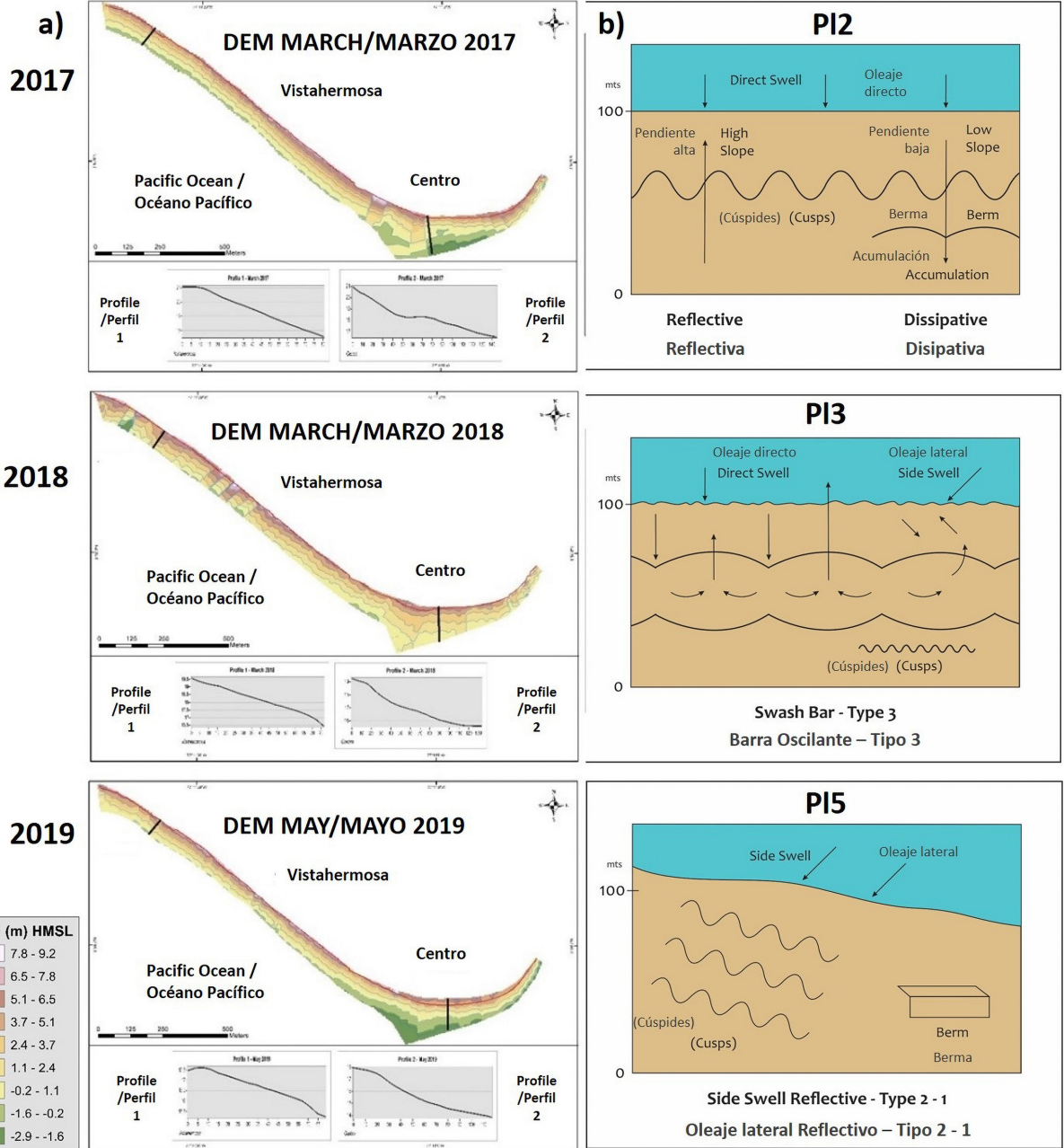


Figura 3 (Continuación). a) Se muestran ejemplos de DEM de playa y perfiles extraídos (1 y 2) para un mes representativo de cada año (2014-2019) con alturas medias en metros sobre el nivel del mar. b) modelo de vista en planta relacionado con el DEM y el tipo de perfil.

Figure 3 (Continuation). a) Examples of the beach DEMs and the extracted profiles (1 and 2) are shown for a representative month of each year (2014-2019), with average heights in meters above the sea level. b) Plan view model related with the DEM and the profile type.

El modelo PI4 presenta una playa rítmica con amplias ondulaciones o cúspides que se desplazan desde la línea de bajamar hasta la línea de costa; se generan escarpes con cúspides pronunciadas y de onda larga (y pueden acompañar a cúspides de onda corta), propias de un perfil de playa tipo 4. El modelo en planta PI5 se caracteriza por olas laterales que generan una playa inclinada y pueden presentar cúspides con

The PI4 model shows a rhythmic beach with broad undulations or cusps that move from the low-water line to the coastline. Long-wave escarpments with pronounced cusps are generated (which may also accompany short-wave cusps), typical of a type-4 beach profile. The PI5 plan model is characterized by lateral waves that generate an inclined beach and may have cusps with berms. These formations

bermas. Estas formaciones también pueden estar presentes en los perfiles tipo 1 y 2. Por último, el plano modelo P16 tiene una pendiente mayor que los demás planos, una terraza en bajamar y secuencias de pequeñas bahías y cuernos producidos por corrientes de resaca que pueden acompañar a la terraza. La playa superior puede presentar las cúspides de onda corta características de los perfiles tipo 4. La morfología de la playa observada y propuesta desde el DEM, se observa a lo largo de la playa, y puede tener variaciones por sectores, es decir, por ejemplo, la zona Centro puede tener un P13 y a la vez en otra zona de Vistahermosa un P16.

Datos del estado de la playa (morfodinámica)

La dinámica costera está asociada con el flujo y reflujo de la marea (entrada y salida de agua) y su relación con las planicies intermareales locales. La playa tiene una composición sedimentológica característica de origen continental con cuarzo y minerales pesados y un ambiente de depósito marino somero agitado. No se detectó variación entre los años en los que se realizaron campañas de muestreo: se observó arena fina (100 %) para todas las campañas, lo que sugiere un régimen de baja energía consistente a lo largo de los años. El tamaño de grano fino promedio de la selección varió de moderadamente bueno a bueno en todas las campañas de muestreo. Los valores del coeficiente de simetría varían con las asimetrías de delgado a grueso. La forma de campana para la distribución de datos entre % en peso y ϕ es generalmente mesocúrtica, pero varía de platicúrtica a leptocúrtica. La pendiente de la playa varía de 1 a 4°.

El comportamiento de los frentes de oleaje representados por el SWAN, satisface las condiciones iniciales de estado de mar proporcionadas (especialmente la H_s); alcanzando alturas de ola que en condiciones medias no superan los dos metros y que en un escenario de altura de ola con mínima probabilidad de excedencia no superarían 2,5 m; lo que concuerda con lo encontrado por Otero (2004). Por esta razón, la zona costera de la boca de la bahía de Buenaventura puede ser considerada como de baja energía, donde las olas más energéticas (de mayor altura), no se localizan en la playa La Bocana, se localizan al frente en isla Soldado. La máxima altura se observa hacia el sector de Vistahermosa, alcanzando un H_b de 0,9 m (Figura 4).

La figura 5 muestra que el rango mareal en marea viva tiene dos valores máximos a lo largo de cada año, un primer máximo alrededor de febrero o marzo, y el segundo entre septiembre y octubre, observándose además los mayores rangos mareales entre 2014 y principios de 2016, seguidos por los máximos de 2019, aunque estos últimos de menor magnitud.

may also be present in type 1 and 2 profiles. Finally, the P16 plan model has the highest slope, a low-water terrace, and sequences of small bays and horns created by rip currents that may accompany the terrace. The upper beach may have short-wave cusps typical of type-4 profiles. The beach morphology observed and proposed based on the DEM is seen along the beach, and it may show sectoral variations. For example, the Centro area may have a P13, and there may be a P16 at the same time in another area of Vistahermosa.

Beach state data (morphodynamics)

Coastal dynamics are associated with the flow and reflow of the tide (water entry and exit) and their relationship with local intertidal flats. The beach has a sediment composition that is continental in origin, with quartz and heavy minerals, as well as a shallow agitated marine depositional environment. No variations were detected for the years in which the sampling campaigns were carried out. Fine sand (100 %) was observed in all campaigns, which suggests a low-energy regime that has been consistent over the years. The average fine grain size of the selection varied from moderately good to good in all sampling campaigns. The symmetry coefficient values vary from thin to thick with the asymmetries. The bell shape of the data distribution between % weight and ϕ is generally mesokurtic, but it varies from platykurtic to leptokurtic. The beach slope varies from 1 to 4°.

The behavior of the wave fronts represented by the SWAN satisfies the initial sea state conditions provided (especially H_s), reaching wave heights that do not exceed 2.0 m in average conditions and that, in a wave height scenario with a minimal probability of exceeding, would not go over 2.5 m. This agrees with what was found by Otero (2004). Therefore, the coastal area of the Buenaventura Bay mouth may be regarded as a low-energy one, where the most energetic waves (the highest ones) are not located in La Bocana beach; they are in front of Soldado island. The maximum height is observed towards the Vistahermosa sector, reaching an H_b of 0.9 m (Figure 4).

Figure 5 shows that the tidal range during the spring tide has two maximum values throughout each year: one around February or March, and another one between September and October. Moreover, the greatest tidal ranges are observed between 2014 and early 2016, followed by the maxima of 2019, although the latter had a lower magnitude. As for the maximum wave height, (H_{max}) for the day with the highest tide and its period, the values reported throughout this study oscillate between 0.55 and 1.4 m and between 4

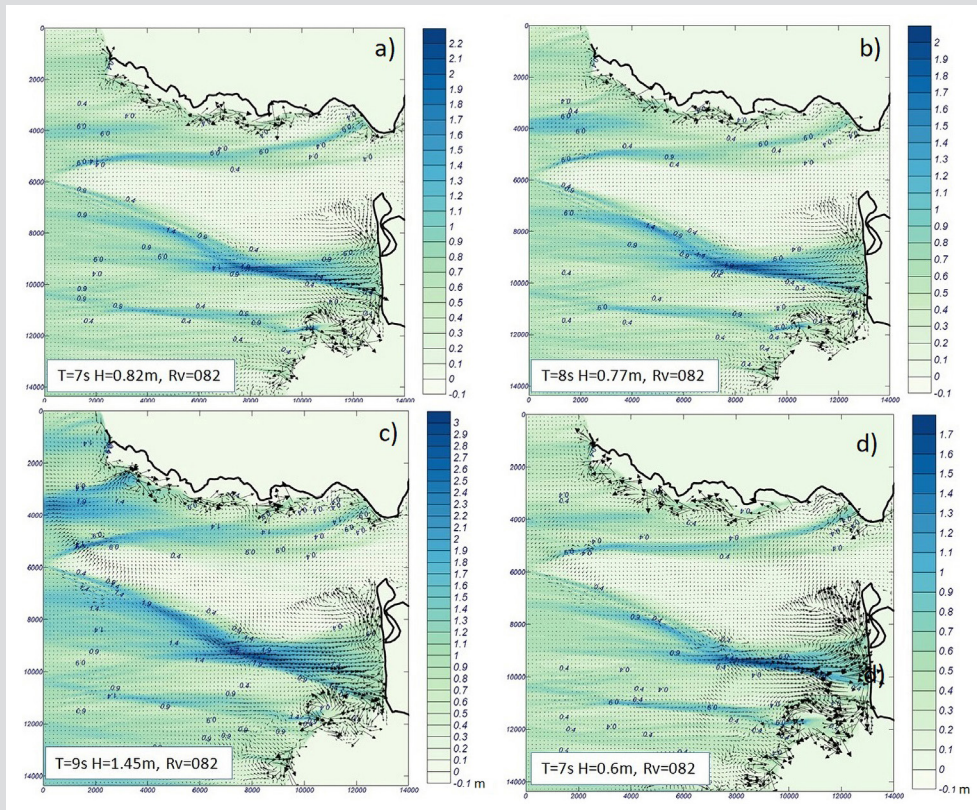


Figura 4. Salida del modelo visualizando los vectores de corriente y en la paleta las alturas de ola obtenidas (m). Los oleajes fueron simulados con los periodos típicos de la zona de 7 a) 8 b) y 9 c) segundos; d) escenario de oleaje medio.

Figure 4. Model output showing the current vectors, and, in the palette, the wave heights obtained (m). The waves were simulated with the periods typical of the zone with 7 a), 8 b), and 9 c) sec. d) average wave scenario.

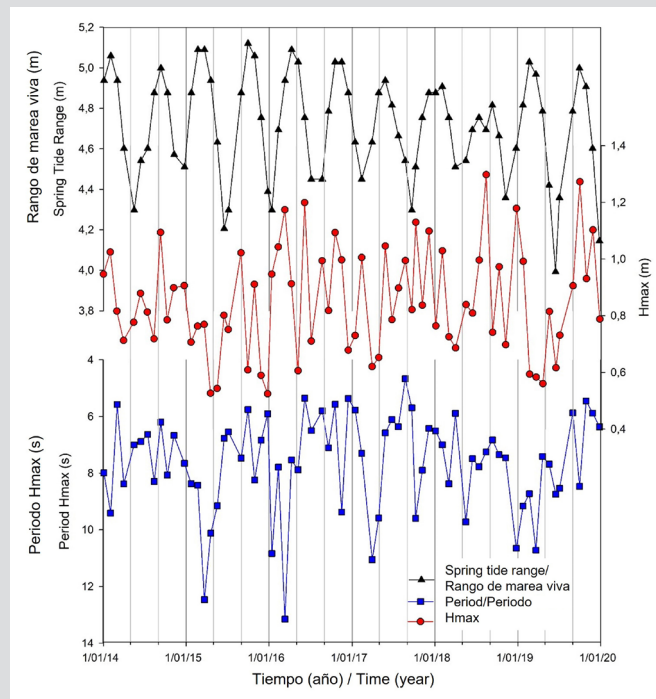


Figura 5. Rango mareal máximo, altura de la ola máxima durante el día de máximo rango mareal y su periodo de 2014 a 2019 para Buenaventura.

Figure 5. Maximum tidal range, maximum wave height during the day with the maximum tidal range, and its period from 2014 to 2019 for Buenaventura.

Con respecto a la altura máxima de la ola (H_{max}) para el día de más alta marea y su período, los valores a lo largo del tiempo de estudio oscilan entre 0,55 y 1,4 m y entre 4 y 14 s, respectivamente. Los parámetros del oleaje no muestran una tendencia en el tiempo del estudio, aunque entre 2016 y 2018 se observan las mayores alturas de H_{max} del periodo de análisis, de igual manera durante estos años hay una amplia variabilidad en los valores tanto de H_{max} como del período. Mientras que en 2014 y el segundo semestre de 2015 la H_{max} muestra una menor variabilidad de los datos, manteniéndose por encima de 0,7 m y con periodos entre 9 y 5 s, es decir alturas de la ola intermedias, y un tren de olas más recurrente, lo cual coincide con estados morfodinámicos reflectivos observados.

Estado de playa previsto

Los resultados mostraron un predominio de los estados intermedio y disipativo, representados para la mayoría de los datos, y la presencia de algunos datos en estado reflejante para 2014 y 2015. Las mareas en los rangos TM y TD fueron el agente dominante, registradas por el número de datos en cada casilla (Figura 6).

and 14 s, respectively. The wave parameters do not show a tendency during the analyzed time, even though, between 2016 and 2018, the greatest H_{max} heights were observed. Similarly, during these years, there is a high variability in the values for both H_{max} and the period, whereas, in 2014 and in the second semester of 2015, H_{max} shows a lower data variability, remaining over 0.7 m and with periods between 5 and 9 s, that is, intermediate wave heights, and a more recurrent wave train, which agrees with the observed reflective morphodynamic states.

Expected beach state

The results showed a predominance of the intermediate and dissipative states, represented by most of the data, as well as the presence of some data corresponding to reflective states for 2014 and 2015. The tides in the TM and TD ranges were the dominant agent, recorded by the number of data in each field (Figure 6).

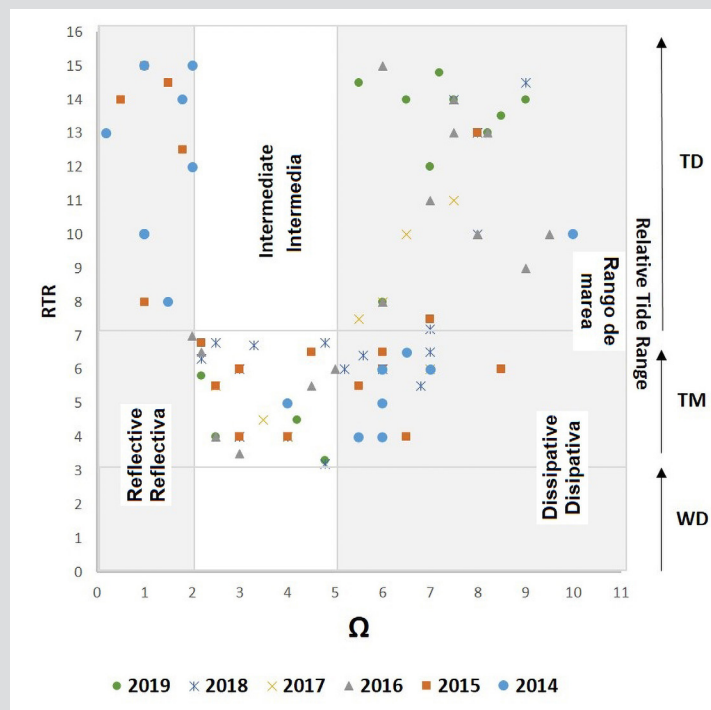


Figura 6. Distribución de los resultados de los parámetros Ω (estado de playa) y RTR (tipo de playa) y el estado y tipo morfodinámico, respectivamente, según la clasificación propuesta por Masselink y Short, (1993). Tipo de playa: WD, TM y TD (Masselink y Short, 1993; Wright y Short, 1984; Short, 2020). Estado de la playa: reflejante, intermedio y disipativo. Cada punto (forma geométrica) representa el valor obtenido por cada medición en relación a Ω y RTR (estado y tipo de playa), los colores corresponden a los diferentes años de la serie temporal.

Figure 6. Results distribution for the Ω (beach state) and RTR (beach type) and the morphodynamic state and type, respectively, according to the classification proposed by Masselink and Short (1993). Beach type: WD, TD, and TM (Masselink and Short, 1993; Short, 2020; Wright and Short, 1984). Beach state: reflective, intermediate, and dissipative. Each point (geometric shape) represents the value obtained in each measurement with regard to Ω and RTR (beach state and type). Colors correspond to the different years in the time series.

Relación entre tipo de playa y estado morfodinámico (estado playa)

El análisis del tipo de perfil de playa predominante mostró una distribución temporal variada. El tipo 2 fue dominante en 2014 en la playa de Vistahermosa (perfil 1, Figura 1, “Montador”) (62,5 %), con una clasificación morfodinámica disipativa. Perfiles tipo 4-A (25 %) clasificados como morfodinámicos reflejantes con tendencia a la erosión costera o retroceso de la línea de costa, ocurridos en marzo y agosto. El perfil de playa del sector Centro (perfil 2, Figura 1) presentó predominantemente los tipos 4A y 4B, lo que indica una tendencia a la pérdida de sedimentos o erosión costera y un estado morfodinámico reflejante (Figura 7). En 2015, el perfil de la playa de Vistahermosa estuvo dominado por el tipo 3 (morfodinámica intermedia, 44,4 %), el tipo 1 y el tipo 4B. En el mismo año, el sector Centro estuvo dominado por el tipo 2 (morfodinámica disipativa, 44,4 %) (Figura 7).

El tipo 1 (morfodinámico disipativo) fue dominante (100 %) en 2016, 2017 y 2019 en el sector de Vistahermosa. En el sector Centro predominó la morfodinámica intermedia tipo 3 hasta agosto; y el tipo 1 predominó en septiembre y octubre (Figuras 8 y 9). En 2018, los tipos 1, 2 y 3 fueron dominantes en el sector de Vistahermosa; el sector Centro estuvo dominado por el tipo 3.

Los modelos en planta revelaron condiciones variables en diferentes partes de la playa y contienen combinaciones de tipos de perfiles. Este es generado por diferentes condiciones climáticas e hidrodinámicas, la posición de otros planos sedimentarios y la orientación de la costa.

El tipo 1 (morfodinámico-erosivo disipativo) fue generalmente el estado de playa predominante durante los años de muestreo (promedio 35,1 %) y tuvo la mayor presencia en 2016 y 2019. El segundo estado más común fue el tipo 3 (morfodinámico intermedio-no erosivo, promedio 33 %), que tuvo una mayor frecuencia en 2015 y 2018. El tipo 2 representó un promedio de 17 % y tuvo una mayor frecuencia en 2014 y 2015. En el mismo período predominó el estado tipo 4-A (morfodinámico-erosivo reflejante) pero representó sólo el 8 % del sector Centro. Los cambios en los estados y el tipo de playa que se pueden observar en relación con las variaciones mensuales, indican que la playa se adapta rápidamente a las condiciones oceanográficas, en algunas ocasiones se observan fuertes cambios de un mes a otro, con variaciones importantes en la morfología de la playa (perfiles y DEM), la playa no muestra un marco temporal necesario para adaptarse a los cambios, al contrario, como ya se ha dicho, se ajusta rápidamente.

Relationship between the beach type and the morphodynamic state (beach state)

The analysis regarding the predominant beach profile showed a varied temporal distribution. Type 2 was dominant in 2014 at Vistahermosa beach (profile 1, Figure 1, “Montador”) (62.5 %), with a dissipative morphodynamic classification. The type-4-A profiles (25 %), classified as reflective with a tendency towards coastal erosion or coastline retreat, were observed in March and August. The beach profile of the Centro sector (profile 2, Figure 1) showed a predominance of types 4A and 4B, which indicates a tendency towards sediment loss or coastal erosion and a reflective morphodynamic state (Figure 7). In 2015, the Vistahermosa beach profile was dominated by type 3 (intermediate morphodynamics, 44.4 %), type 1, and type 4B. In the same year, the Centro sector was dominated by type 2 (dissipative morphodynamics, 44.4 %) (Figure 7).

Type 1 (dissipative) was dominant (100 %) in 2016, 2017, and 2019 in the Vistahermosa sector. In the Centro sector, there was a predominance of type-3 intermediate morphodynamics until August, and type 1 predominated in September and October (Figures 8 and 9). In 2018, types 1, 2, and 3 were dominant in the Vistahermosa sector; the Centro sector was dominated by type 3.

The plan models revealed variable conditions in different parts of the beach and contain combination of profile types. This is caused by different climatic and hydrodynamic conditions, by the position of other sediment planes, and by the orientation of the coast.

Type 1 (morphodynamic-erosive dissipative) was, in general, the predominant beach state during the sampling years (average: 35.1 %) and showed the highest presence in 2016 and 2019. The second most common state was type 3 (intermediate morphodynamic-non-erosive, average: 33 %), which was more frequent in 2015 and 2018. Type 2 reported an average of 17 % and was more frequent in 2014 and 2015. In the same period, the 4-A state (morphodynamic-erosive reflective) predominated, but it only represented 8 % of the Centro sector. The observed changes in the beach states and types regarding monthly variations indicate that the beach adapts rapidly to oceanographic conditions. On some occasions, marked changes are seen from one month to another, with significant beach morphology variations (profiles and DEMs). The beach does not exhibit the temporal framework necessary to adapt to changes; on the contrary, as mentioned before, it adjusts rapidly.

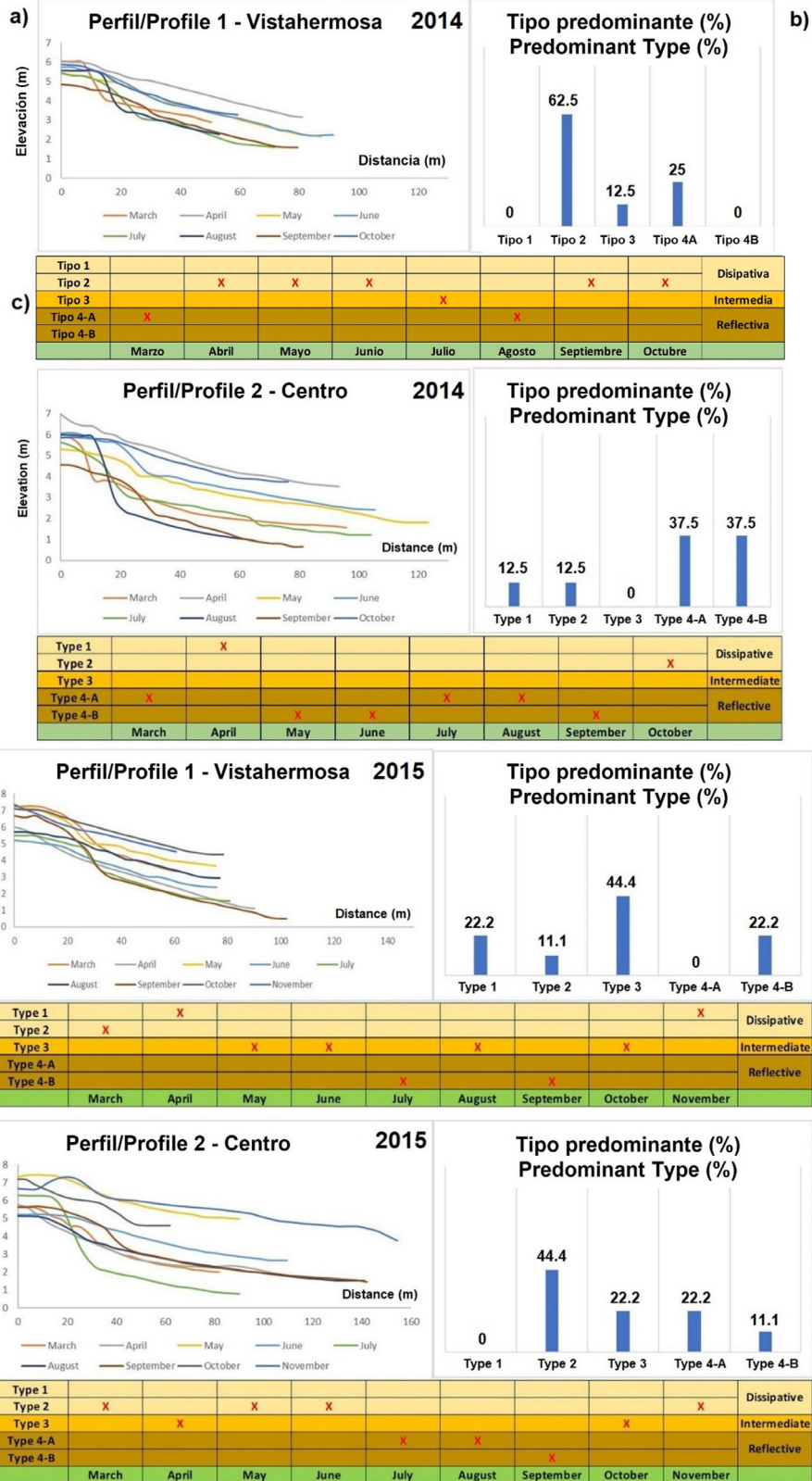


Figura 7. a) Perfiles de playa mensuales (Vistahermosa y Centro) para 2014 y 2015. b) Tipo de perfil de playa predominante en % para cada año, sector y perfil. c) Tipo de perfil de playa para cada mes y el estado morfodinámico correspondiente, marcado con una (x) roja.

Figure 7. a) Monthly beach profiles (Vistahermosa and Centro) for 2014 and 2015. b) Predominant beach profile type in % for each year, sector, and profile. c) Beach profile type for each month and its corresponding morphodynamic state, marked with a red x.

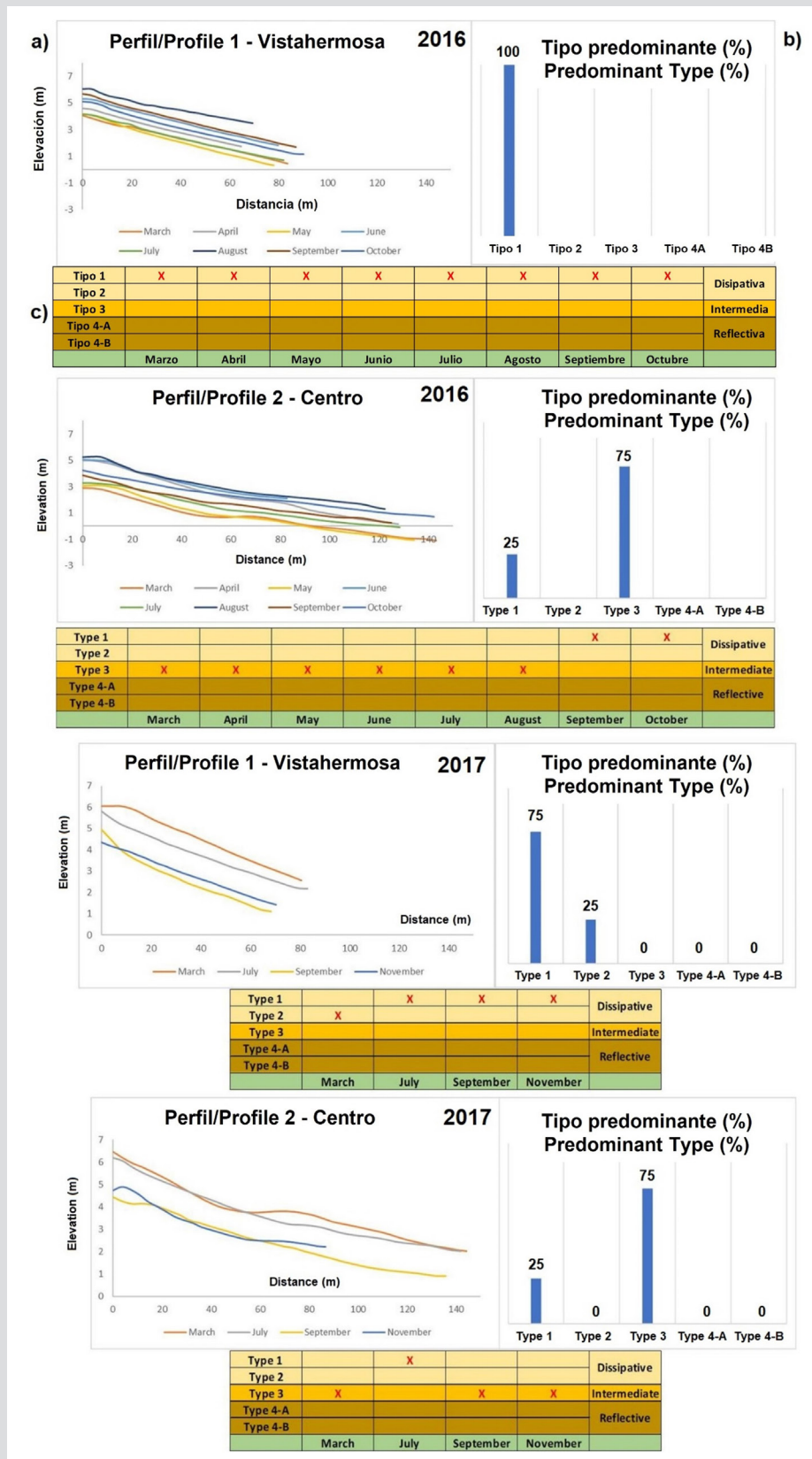


Figura 8. a) Perfiles de playa mensuales (Vistahermosa y Centro) para 2016 y 2017. b) Tipo de perfil de playa predominante en % para cada año, sector y perfil. c) Tipo de perfil de playa para cada mes y el estado morfodinámico correspondiente, marcado con una (x) roja.

Figure 8. a) Monthly beach profiles (Vistahermosa and Centro) for 2016 and 2017. b) Predominant beach profile type in % for each year, sector, and profile. c) Beach profile type for each month and its corresponding morphodynamic state, marked with a red x.

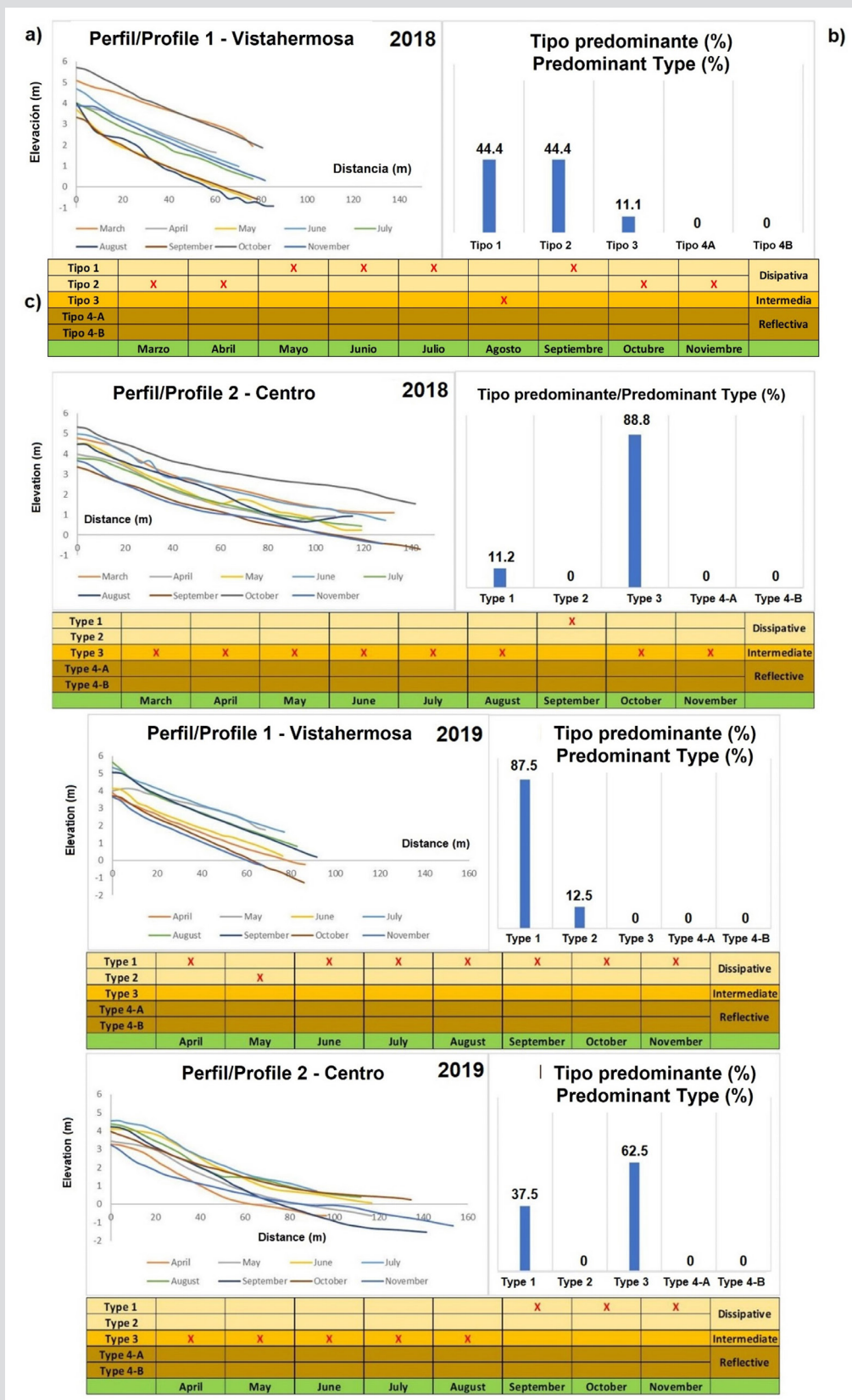


Figura 9. a) Perfiles de playa mensuales (Vistahermosa y Centro) para 2018 y 2019. **b)** Tipo de perfil de playa predominante en % para cada año, sector y perfil. **c)** Tipo de perfil de playa para cada mes y el estado morfodinámico correspondiente, marcado con una (x) roja.

Figure 9. a) Monthly beach profiles (Vistahermosa and Centro) for 2018 and 2019. **b)** Predominant beach profile type in % for each year, sector, and profile. **c)** Beach profile type for each month and its corresponding morphodynamic state, marked with a red x.

En relación con los valores máximos de la marea en el comportamiento intranual de la playa, se esperaría que en los meses en que se da un aumento de la marea se presenten estados reflejantes de la playa, pero esto solo sucedió en 2014 y 2015. De manera general, se evidencia que, con valores de marea altos o bajos, se mantiene la presencia de los estados disipativo e intermedio (Figura 9). Los resultados interanuales muestran que en 2014 y 2015, cuando la marea alcanzó sus valores máximos, se presentaron estados de playa reflectiva, representados por procesos de erosión, pero cuando la marea estuvo baja (2016 a 2019), pasó a estados disipativos e intermedios (Figura 10).

Cuando la marea se encuentra con valores de altura que no superan 4,5 m (2016 a 2019) en el perfil de la zona Centro (dentro de la bahía), sucede que en los primeros meses del año se encuentra en estado intermedio, pasando a disipativo en la segunda mitad del año. Por su parte, Vistahermosa estuvo siempre en estado disipativo. Otra observación es que la relación de los estados con la marea es inversa. En 2014 y 2015, el estado de la playa es dominado por la marea (TD), lo que implica un aumento de la influencia del oleaje, es decir, que hay más área de la playa donde el oleaje interactúa con la superficie de la playa. Después de esto, hay procesos sin dominio del oleaje.

As for the maximum tide values in the intra-annual beach behavior, it would be expected that, in the months with increased tides, reflective beach states are observed, but this only happened in 2014 and 2015. It was evidenced that, with high or low tide values, the presence of dissipative and intermediate states is maintained (Figure 9). The interannual results show that in 2014 and 2015, when the tide reached its maximum values, reflective states were observed, represented by erosion processes. However, when the tide was low (2016-2019), dissipative and intermediate states were observed (Figure 10).

When the tide height exhibits values not higher than 4.5 m (2016-2019) in the Centro sector profile (inside the bay), an intermediate state is observed in the first months of the year, which becomes dissipative in the second half of the year. On the other hand, Vistahermosa always showed a dissipative state. another observation is that the relationship between the states and the tide is inverse. In 2014, and 2015, the beach state was dominated by the tide (TD), which implies an increase in the influence of the waves, that is, there is a larger beach area where the waves interact with the surface of the beach. After this, there are processes with no dominance of the waves.

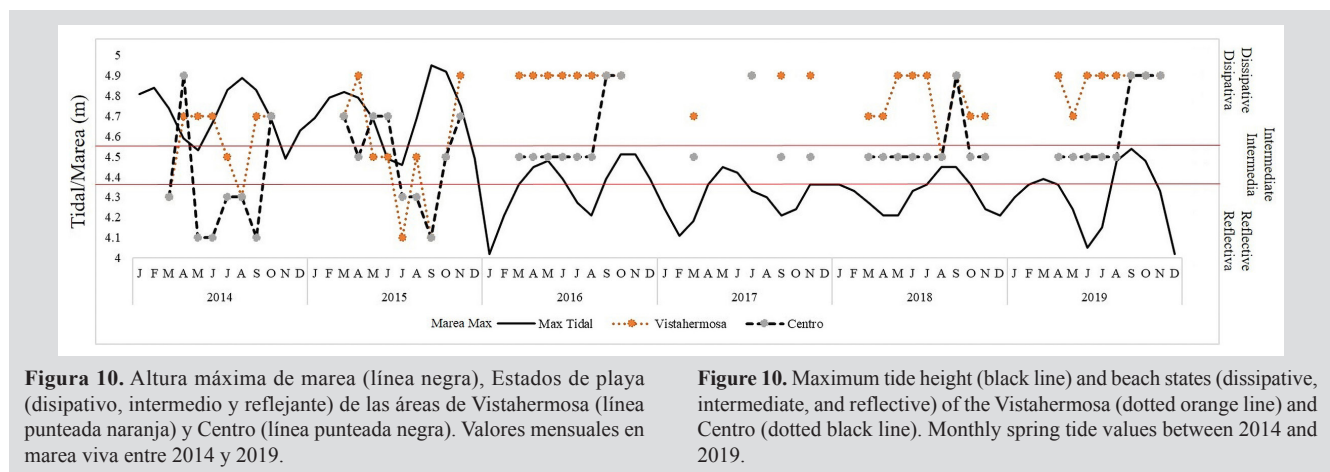


Figura 10. Altura máxima de marea (línea negra), Estados de playa (disipativo, intermedio y reflejante) de las áreas de Vistahermosa (línea punteada naranja) y Centro (línea punteada negra). Valores mensuales en marea viva entre 2014 y 2019.

Figure 10. Maximum tide height (black line) and beach states (dissipative, intermediate, and reflective) of the Vistahermosa (dotted orange line) and Centro (dotted black line). Monthly spring tide values between 2014 and 2019.

DISCUSIÓN

Las descripciones generadas en los modelos en planta de esta investigación coinciden con los resultados y las diferentes características descritas por Correa y Restrepo (2002), quienes utilizaron observaciones de campo para describir e incluir un modelo morfodinámico de la playa El Choncho (Pacífico colombiano); estos autores representaron

DISCUSSION

The descriptions provided by the plan models of this research match the results and the different characteristics described by Correa and Restrepo (2002), who employed field observations to describe and propose a morphodynamic model of El Choncho beach (Colombian Pacific). These authors represented the main morphological characteristics

las principales características morfológicas y procesos costeros y clasificaron la playa en un estado morfodinámico intermedio. Asimismo, estos resultados coinciden con los perfiles de playa realizados previamente sobre geoformas asociadas a islas barrera (Martínez y González, 1997). Cabe recordar que los modelos de planta son adaptaciones de los modelos propuestos y las observaciones morfológicas obtenidas de los DEM generados, es decir, lo que se hizo fue recolectar las características morfológicas predominantes y representarlas en modelos ya adaptados por los autores ya mencionados.

Los resultados de este estudio muestran que los estados morfodinámicos disipativos e intermedios predominaron en la playa macromareal del Pacífico oriental tropical, La Bocana, con procesos dominantes de TM y TD que coinciden con los propuestos por Short (2020) y autores anteriores (Masselink y Short, 1993; Masselink *et al.*, 2006; Scott *et al.*, 2011) para latitudes medias. Estos estados se distribuyen estacional e interanualmente y brindan un enfoque para la comprensión de los procesos temporales de rotación de playas propuestos por Loureiro y Ferreira (2020). Los mayores cambios de estados morfodinámicos intranuales (2014 y 2015) muestran un efecto sinérgico entre el rango de marea y la altura máxima del oleaje, mostrando un cambio a perfiles reflectivos principalmente, cuando esta supera 0,7 m y el período es corto (entre 5 y 9 s). Esto puede ser más crítico en la zona de estudio ante eventos extremos, ya que se han llegado a registrar alturas máximas de la ola de hasta 2,18 m (Portilla *et al.*, 2015), lo que podría traducirse en pérdida del frente costero, lo cual debe ser analizado en futuros trabajos.

Este método agrupa cronológica y espacialmente los estados morfodinámicos de dos perfiles de playa. Pereira *et al.* (2010) realizaron un agrupamiento homogéneo y heterogéneo y una clasificación morfodinámica de un segmento costero de más de 300 km de longitud e identificaron los tres estados que se encuentran en este segmento. Así, el área costera contiene diferentes escalas de variación espacio-temporal de estados morfodinámicos.

Se observó un predominio de los perfiles tipo 1 (disipativo-erosivo) y tipo 3 (intermedio-no erosivo). Los estados están dominados por la marea con patrones anuales que dependen de la variabilidad ambiental estacional e interanual en la zona tropical. Esto confirma la clasificación del estado morfodinámico propuesta por Wright y Short (1984) y Masselink y Short (1993) para playas macromareales.

En el sector Vistahermosa (área expuesta) predominó la playa tipo 1 (disipativa), mientras que en el sector Centro

and coastal processes, and they classified the beach as being in an intermediate morphodynamic state. These results agree with the beach profiles previously elaborated regarding the geoforms associated with barrier islands (Martínez and González, 1997). It is worth remembering that the plan models are adaptations of the proposed models and the morphological characteristics obtained from the generated DEMs, that is, the predominant morphological characteristics were collected and represented in models that had already been adapted by different authors.

The results of this study show a predominance of the dissipative and intermediate morphodynamic states in the macrotidal beach of La Bocana in the eastern tropical Pacific, with dominant TM and TD processes that coincide with those proposed by Short (2020) and previous authors (Masselink and Short, 1993; Masselink *et al.*, 2006; Scott *et al.*, 2011) for middle latitudes. These states are seasonally and interannually distributed and provide an approach for understanding the temporal beach rotation processes proposed by Loureiro and Ferreira (2020). The greatest intra-annual morphodynamic state changes (2014 and 2015) show a synergic effect between the tide range and the maximum wave height, with a transition towards mainly reflective profiles when the latter exceeds 0.7 m, and the period is short (between 5 and 9 s). This may be more critical in the study area in the face of extreme events, as maximum wave heights of up to 2.18 m have been reported (Portilla *et al.*, 2015), which could translate into a loss of the coastline. This should be analyzed in future works.

This method groups chronologically and spatially the morphodynamic states of two beach profiles. Pereira *et al.* (2010) performed a homogenous and heterogenous grouping and a morphodynamic classification of a coastal segment more than 300 km in length. They identified the three states in this segment. Thus, the coastal area contains different spatial-temporal variation scales with regard to morphodynamic states.

A predominance of type-1 (dissipative-erosive) and type-3 (intermediate-non-erosive) profiles was observed. The states are dominated by the tide, with annual patterns that depend on the seasonal and interannual environmental stability of the tropical zone. This confirms the morphodynamic state classification proposed by Wright and Short (1984) and Masselink and Short (1993) for macrotidal beaches.

In the Vistahermosa sector (exposed area), there was a predominance of type-1 beaches (dissipative),

(área interna de la bahía) predominó el tipo 3 (intermedio). La velocidad del viento y la altura del oleaje aumentan en el segundo semestre del año (Thomas *et al.*, 2014; Ricaurte-Villota *et al.*, 2018), pero la playa no presenta tipos de WD estacionales ni estados relacionados con la climatología mencionada, un factor que puede estar alterando esta relación, no es sólo el dominio evidente de la marea, sino que la playa del sector Centro (área interna de la bahía), tiene una influencia antrópica debido al oleaje generado por los barcos que ingresan al puerto de Buenaventura que altera las condiciones normales de una posible playa tipo estuario. Por su parte, la playa Vistahermosa (área exterior y expuesta), que debe tener una correlación con el oleaje, tiene una fuerte intervención antrópica para protegerse de la erosión costera con muros de hormigón y madera, que altera las condiciones normales de la playa, que actualmente se encuentra bajo un estado disipativo (predominante). Esto puede estar alterando los resultados y quizás no permite visualizar las condiciones naturales estacionales, pero evidencia la influencia antrópica en los cambios en los estados morfodinámicos de la playa.

Las clasificaciones morfodinámicas de playas se han desarrollado principalmente en latitudes medias, por ejemplo, en el Reino Unido (Scott *et al.*, 2011) y Australia (Masselink y Short, 1993; Masselink *et al.*, 2006) con condiciones ambientales muy diferentes a las del Pacífico tropical oriental. El potencial para playas de WD de alta energía es mayor en latitudes medias, ya que la altura de las olas generalmente disminuye en latitudes por debajo de 30 ° y por encima de 60 ° (Davies, 1980). Los sedimentos también se controlan latitudinalmente; los trópicos son dominados por una abundancia de sedimentos terrígenos finos y playas reflectantes de baja energía (Short, 2020). A pesar de la ubicación tropical y las condiciones ambientales variables, las clasificaciones coinciden con las propuestas para las latitudes medias, lo que sugiere el dominio del rango de mareas en la determinación de los estados morfodinámicos de la playa.

En este estudio no se utilizaron análisis matemáticos de datos topográficos multitemporales para dilucidar patrones morfológicos que varían temporal y espacialmente (Winant *et al.*, 1975; Miller y Dean, 2007a, 2007b; Conlin *et al.*, 2020), ya que el énfasis principal fue el de identificar las características morfológicas y realizar el análisis morfodinámico de la playa, y posteriormente con base en los resultados obtenidos de los estados de playa, realizar el análisis temporal y espacial de estos. Sería interesante y bajo otro objetivo, poder adaptar los análisis cuantitativos desde la perspectiva utilizada en este estudio. Otro factor a tener

while, in Centro (internal bay area), type 3 (intermediate) was predominant. The wind speed and the wave height increase in the second semester of the year (Thomas *et al.*, 2014; Ricaurte-Villota *et al.*, 2018), but the beach shows no seasonal WD types nor states related with the climatology. A factor that may influence this relationship is not only the evident dominance of the tide, but also the fact that the Centro sector beach (internal bay area) is under anthropic influence due to the waves generated by the ships entering the port of Buenaventura, which alters the normal conditions of a possibly estuarine beach. On the other hand, Vistahermosa beach (exterior and exposed area), which should be correlated with the waves, shows a marked anthropic intervention, as concrete and wooden walls are built for protection against coastal erosion, which alters the normal conditions of a beach. This beach currently shows a (predominantly) dissipative state, which may have altered the results and perhaps does not allow visualizing the natural seasonal conditions, although it evidences the anthropic influence on the changes in beach morphodynamic states.

Morphodynamic beach classifications have been mainly carried out in middle latitudes, *e.g.*, in the United Kingdom (Scott *et al.*, 2011) and Australia (Masselink and Short, 1993; Masselink *et al.*, 2006), under environmental conditions very different from those of the eastern tropical Pacific. The potential for high-energy WD beaches is greater in middle latitudes, as the wave height generally decreases in latitudes below 30° and above 60 ° (Davies, 1980). Sediments are also controlled latitudinally, and the tropics are dominated by an abundance of fine terrigenous sediments and low-energy reflective beaches (Short, 2020). Despite the tropical location and the variable environmental conditions, the classifications match those proposed for middle latitudes, which suggests the dominance of the tidal range in the determination of beach morphodynamic states.

This study did not employ mathematical analyses on multitemporal topographic data in order to determine morphological patterns with temporal and spatial variations (Winant *et al.*, 1975; Miller and Dean, 2007a, 2007b; Conlin *et al.*, 2020), as the main emphasis was the identification of morphological characteristics and carrying out a beach morphodynamic analysis, and, later, based on the results obtained, on temporally and spatially analyzing the beach states. It would be interesting, under another objective, to be able to adapt quantitative analyses in the perspective used in this study.

en cuenta, son los datos faltantes, equivalentes a los meses de diciembre, enero y febrero. El parámetro Ω implementado en este estudio, predice la morfología de la playa, con las condiciones predominantes; esto es una ventaja frente a estos vacíos en los datos. Aun así, el muestreo realizado durante seis años, por nueve meses cada uno, es una muestra representativa, teniendo en cuenta las condiciones naturales predominantes de la playa.

CONCLUSIONES

Se proponen cuatro tipos predominantes de playa, clasificadas según la morfodinámica y estado de la playa, caracterizadas estacionalmente y según la posición de la playa, es decir, un perfil de playa en condiciones externas y expuestas a condiciones de oleaje directo (sector Vistahermosa) y un perfil de la playa dentro de la bahía (sector Centro). Se observó que para playa Vistahermosa predomina el tipo 1 de playa en estado morfodinámico disipativo y para playa Centro predomina el tipo 3 en estado intermedio. Asimismo, se proponen seis modelos de plantas obtenidos a partir de observaciones morfológicas.

En la playa macromareal del Pacífico tropical oriental (La Bocana), el principal resultado fue que predominan los estados morfodinámicos disipativos e intermedios, con procesos dominantes de MT y TD, lo que sugiere la dominancia del rango de mareas en la determinación de los estados morfodinámicos de la playa. Además, el estado TD observado en 2014 y 2015 muestra un frente de playa reflectante debido al posible aumento de las olas debido a condiciones más energéticas.

La clasificación morfodinámica de playas para el litoral Pacífico colombiano y la determinación de las causas del cambio morfológico de las playas a escalas de tiempo intra e interanual, contribuye al conocimiento de las playas tropicales, a partir de dilucidar cómo responden a los procesos ambientales que varían de manera intra e interanual, por ejemplo los efectos sinérgicos entre la marea y el oleaje, lo cual puede favorecer el desarrollo racional de las zonas costeras del Pacífico colombiano.

Finalmente, se evidencia la importancia del monitoreo *in situ* de los sistemas costeros. Esta primera serie temporal de seis años de perfiles y modelos de playa para el Pacífico tropical oriental y Colombia relaciona variables oceanográficas y climáticas y ayuda a comprender la dinámica espacio-temporal, aunque se requiere mayor frecuencia de observaciones pues se desconoce el efecto de eventos

Another factor to be considered is the missing data corresponding to December, January, and February. The parameter Ω employed in this study can predict beach morphology with the predominant conditions. This is an advantage against these gaps in the data. Still, the sampling carried out for six (nine months for each one) constitutes a representative sample, considering the predominant natural conditions of the beach.

CONCLUSIONS

Four predominant beach types are proposed classified according to beach morphodynamics and states, characterized seasonally and according to the position of the beach, that is, one beach profile under external conditions and exposed to direct wave conditions (Vistahermosa sector) and one profile of the beach within the bay (Centro sector). It was observed that, in Vistahermosa beach, type 1 is predominant in a dissipative morphodynamic state, while Centro shows a predominance of type 3 in an intermediate state. Similarly, six plan models obtained from morphological observations are proposed.

In this macrotidal beach of the eastern tropical Pacific (La Bocana beach), the main result was a predominance of dissipative and intermediate morphodynamic states, with dominant MT and TD processes, thus suggesting a dominance of the tidal range in determining the beach morphodynamic states. In addition, the TD state observed in 2014 and 2015 shows a reflective beach front due to the possible increase in the waves caused by more energetic conditions.

The morphodynamic classification of beaches in the Colombian Pacific littoral and the determination of the causes for beach morphological changes on intra- and interannual scales contribute to understanding tropical beaches, upon the basis of elucidating the way in which they respond to environmental processes with intra- and interannual variations, *e.g.*, the synergic effects between tides and waves, which may favor the rational development of coastal areas in the Colombian Pacific.

Finally, this work evidences the importance of monitoring coastal systems *in situ*. This first time series spanning six years of beach profiles and models for the eastern tropical Pacific and Colombia relates oceanographic and climatic variables, and it helps to understand spatial-temporal dynamics, although more frequent observations is required, given that the effect of external events is unknown.

extremos, los resultados contribuyen al conocimiento regional y local de las playas y son útiles para proponer soluciones para mitigar la erosión costera y ayudar a los tomadores de decisiones, planificadores e instituciones de gestión de riesgo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación científica ha sido financiada con recursos del Banco Nacional de Proyectos de Inversión (BPIN) Proyecto “Investigación científica hacia la generación de información y conocimiento de las áreas marinas y costeras de interés para la nación” de Invemar. Los autores agradecen a los investigadores del programa de Geociencias Marinas y Costeras de Invemar que participaron en las campañas de campo y laboratorio y a la comunidad de la localidad de La Bocana por su acompañamiento y apoyo durante el desarrollo de este estudio. Gracias a todos los revisores que contribuyeron a mejorar este documento. Finalmente agradecen a Tatiana Behar y Ricardo De La Vega por su apoyo en el diseño gráfico.

The results contribute to the regional and local knowledge of the beaches, as well as to aiding decision-makers, planners, institutions with regard to risk management.

ACKNOWLEDGEMENTS

This scientific research has been funded with resources from Invemar’s National Investment Projects Bank (BPIN) through the project “Scientific research oriented towards generating information and knowledge on marine and coastal areas of national interest”. The authors would like to thank the researchers from the Invemar Marine and Coastal Geoscience program who participated in the field and laboratory campaigns, as well as the community of La Bocana locality for their accompaniment and support during the development of this study. Thanks to all reviewers, who helped to improve this document. Finally, the authors would like to thank Tatiana Behar and Ricardo De La Vega for their support regarding graphic design.

BIBLIOGRAFÍA / LITERATURE CITED

- Agámez, N. 2013. Análisis de la evolución morfodinámica de las playas en el Caribe colombiano, para las zonas de Galerazamba, Cartagena de Indias e Isla Barú (Bolívar, Colombia). <https://www.academia.edu/8197649>
- Andreoli, R.V., M.T. Kayano, J. Viegas, S.S. de Oliveira, R.A.F. de Souza, S.R. García, W.H.T. Rego and M.B.I. de Oliveira. 2019. Effects of two different La Niña types on the South American rainfall. *Int. J. Climatol.*, 39: 1415–1428. <https://doi.org/10.1002/joc.5891>
- Blott, S.J. and K. Pye. 2001. Gradstat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Process. Landforms.*, 26: 1237–1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Booij, N., R.C. Ris and L.H. Holthuijsen. 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *J. Geophys. Res. Oceans.*, 104: 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Castelle, B., V. Marieu, S. Bujan, S. Ferreira, J.P. Parisot, S. Capo, N. Sénéchal and T. Chouzenoux. 2014. Equilibrium shoreline modelling of a high-energy meso-macrotidal multiple-barred beach. *Mar. Geol.*, 347: 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.11.003>
- Coca, O. and C. Ricaurte-Villota. 2019. Validation of the hazard and vulnerability analysis of coastal erosion in the Caribbean and pacific coast of Colombia. *J. Mar. Sci. Eng.*, 7: 260. <https://doi.org/10.3390/jmse7080260>
- Conde-Frias, M., L. Otero, J.C. Restrepo, J.C. Ortiz, J. Ruiz and A.F. Osorio. 2017. Swash Oscillations in a Microtidal Dissipative Beach. *J. Coast. Res.*, 336: 1408–1422. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-16-00147.1>
- Conlin, M.P., P.N. Adams, J.M. Jaeger and R. MacKenzie. 2020. Quantifying seasonal-to-interannual-scale storm impacts on morphology along a cusped coast with a hybrid empirical orthogonal function approach. *JGR Earth Surface.*, 125: 12. <https://doi.org/10.1029/2020JF005617>
- Correa, I. and R. Morton. 2010. Pacific Coast of Colombia. 193-198. In: Bird, E.C.F. (Ed.). *Encyclopedia of the World’s Coastal Landforms*. Springer Netherlands, Dordrecht. 1516 p. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8639-7_29
- Correa, I.D. y J.D. Restrepo. 2002. Geología y Oceanografía del delta del río San Juan. *Litoral Pacífico colombiano*. Universidad EAFIT, Medellín. 221 p.
- Davies, J.L. 1980. *Geographical variation in coastal development*. Longman, London. 212 p.
- Ferguson, R.I. and M. Church. 2004. A simple universal equation for grain settling velocity. *J. Sediment. Res.* 74: 933–937. <https://doi.org/10.1306/051204740933>
- Fontán, A., S. Albarracín and J. Alcántara-Carrió. 2009. Estudios de erosión en costas sedimentarias mediante GPS diferencial y ecosondas Monohaz/Multihaz. 100–122. En: Alcántara-Carrió, J., I. Stalliviere, F. Isla, M. Alvarado, A. da Fontoura, A. Cabrera y R. Sandoval. (Eds.). *Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral*. CYTED. 415 p.



- Gómez-García, A.M., G.R. Bernal, A.F. Osorio and V. Botero. 2014. Morphodynamics of a mesotidal rocky beach: Palmeras beach, Gorgona Island National Natural Park, Colombia. *J. South Am. Earth Sci.*, 54: 196–209. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.06.002>
- Gómez-Pujol, L., and A. Orfila. 2020. Reflective–dissipative continuum. 421–437. In: Jackson, D.W.T. and A.D. Short. (Eds.). *Sandy Beach Morphodynamics*. Elsevier. 793 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00018-7>
- Guza, R.T. and D.L. Inman. 1975. Edge Waves and Beach Cusps. *J. Geophys. Res.*, 80: 2997–3011. <https://doi.org/10.9753/icce.v16.81>
- Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, A. Horányi, J.M. Sabater, J. Nicolas and D. Dee. 2019. Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, helloERA5. *ECMWF Newsl.*, 159: 17-24.
- Holanda, T.F., R. Mikosz Gonzalves, A. Pereira Lino and P. de Souza Pereira. 2020. Morphodynamic classification, variations and coastal processes of Paiva beach, PE, Brazil. *Rev. Bras. Geomorfol.*, 21: 2. <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i2.1769>
- Jackson, D.W.T. and A.D. Short. 2020. Introduction to beach morphodynamics. 1–14. In: Jackson, D.W.T. and A.D. Short (Eds.). *Sandy Beach Morphodynamics*. Elsevier, 793 p. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102927-5.00001-1>
- Karunarathna, H., J.M. Horrillo-Caraballo, R. Ranasinghe, A.D. Short and D.E. Reeve. 2012. An analysis of the cross-shore beach morphodynamics of a sandy and a composite gravel beach. *Mar. Geol.*, 299–302: 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.12.011>
- Komar, P.D. and R. Moore. 1983. *Handbook of Coastal Processes and Erosion*. Taylor and Francis group, New York. 48 p.
- Levoy, F., E.J. Anthony, O. Monfort and C. Larssonneur. 2000. The morphodynamics of megatidal beaches in Normandy, France. *Mar. Geol.*, 171: 39–59. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00110-9](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00110-9)
- Loureiro, C. and Ó. Ferreira. 2020. Mechanisms and timescales of beach rotation. 593–614. In: Jackson, D.W.T. and A.D. Short (Eds.) *Sandy Beach Morphodynamics*. Elsevier, 793 p. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102927-5.00024-2>
- Martínez-Ardila, N.J. 2005. Amenazas naturales en el litoral Pacífico colombiano asociadas al ascenso del nivel del mar. *Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.*, 14: 83–96.
- Martínez, J.O. y J.L. González. 1997. Evolución histórica de las islas barrera del sector de Buenaventura y El Naya. *Invemar*, Santa Marta. 72 p.
- Masselink, G., Kroon, A., Davidson-Arnott, R.G.D., 2006. Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal settings—A review. *Geomorphology.*, 73: 33–49. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.007>
- Masselink, G., and C.B. Pattiaratchi. 2001. Seasonal changes in beach morphology along the sheltered coastline of Perth, Western Australia. *Mar. Geol.*, 172: 243–263. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00128-6](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00128-6)
- Masselink, G. and A.D. Short. 1993. The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology: A Conceptual Beach Mode. *J. Coast. Res.*, 9: 785–800.
- Miller, J.K. and R.G. Dean. 2007a. Shoreline variability via empirical orthogonal function analysis: Part I temporal and spatial characteristics. *Coast. Eng.*, 54: 111–131. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.08.013>
- Miller, J.K. and R.G. Dean. 2007b. Shoreline variability via empirical orthogonal function analysis: Part II relationship to nearshore conditions. *Coast. Eng.*, 54: 133–150. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.08.014>
- Mustapa, M.Z., S. Saad, M.S.A. Hadi, K. Yunus and N. Sapon. 2015. Beach-face morphodynamics of different morphological setting along Teluk Chempedak to Kuala Pahang, Malaysia. *J. Teknol.*, 77: 51–56. <https://doi.org/10.11113/jt.v77.6739>
- Pereira, P.S., L. Júlio Calliari and R. Carmo Barletta. 2010. Heterogeneity and homogeneity of Southern Brazilian beaches: A morphodynamic and statistical approach. *Cont. Shelf Res.*, 30: 270–280. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.11.007>
- Portilla, J., A.L. Caicedo, R. Padilla-Hernández and L. Cavaleri. 2015. Spectral wave conditions in the Colombian Pacific Ocean. *Ocean Model.*, 92: 149–168. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.06.005>
- Posada, B.O., W. Henao Pineda y G. Guzmán Ospitia. 2009. Diagnóstico de la erosión y sedimentación en la zona costera del Pacífico colombiano. *Invemar*, Santa Marta. 148 p.
- Price, T.D., B.G. Ruessink and B. Castelle. 2014. Morphological coupling in multiple sandbar systems—a review. *Earth Surf. Dyn.*, 2: 309–321. <https://doi.org/10.5194/esurf-2-309-2014>
- Reichmüth, B. and E.J. Anthony. 2008. Dynamics of intertidal drainage channels on a multi- barred macrotidal beach. *Earth Surf. Process. Landforms.*, 33: 142–151. <https://doi.org/10.1002/esp.1561>
- Reichmüth, B. and E.J. Anthony. 2007. Tidal influence on the intertidal bar morphology of two contrasting macrotidal beaches. *Geomorphology.*, 90: 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.01.015>
- Restrepo, J.D., B. Kjerfve, I.D. Correa and J. González. 2002. Morphodynamics of a high discharge tropical delta, San Juan River, Pacific coast of Colombia. *Mar. Geol.*, 192: 355–381. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(02\)00579-0](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(02)00579-0)

- Restrepo, J.D. and S.A. López. 2008. Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. *J. South Am. Earth Sci.*, 25: 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2007.09.002>
- Ricaurte-Villota, C., O. Coca, M. González, M. Bejarano-Espinosa, D.F. Morales, C. Correa-Rojas, F. Briceño-Zuluaga, G., Legarda y M., Arteaga. 2018. Amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia: Enfoque regional para la gestión del riesgo. *Invemar, Santa Marta*. 272 p.
- Ruiz de Alegría-Arzaburu, A., M.A. Arreola-Cortez, H. García-Nava, R. Hernández-Walls and A. Mejía-Trejo. 2016. The Effects of Beach Morphology Variations on the Profile of Nearshore Currents on a Gently Sloping Mesotidal Beach. *J. Coast. Res.*, 75: 457–461. <https://doi.org/10.2112/si75-092.1>
- Ruiz de Alegría-Arzaburu, A. and J.A. Vidal-Ruiz. 2018. Beach recovery capabilities after El Niño 2015 – 2016 at Ensenada Beach, Northern Baja California. *Ocean Dyn.*, 68: 749–759. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1164-6>
- Ruiz de Alegría-Arzaburu, A., J.A. Vidal-Ruiz, H. García-Nava and A. Romero-Arteaga. 2017. Seasonal morphodynamics of the subaerial and subtidal sections of an intermediate and mesotidal beach. *Geomorphology*, 295: 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.021>
- Ruiz de Alegría-Arzaburu, A., I. Mariño-Tapia, R. Silva and A. Pedrozo-Acuña. 2013. Post-nourishment beach scarp morphodynamics. *J. Coast. Res.*, 65: 576–581. <https://doi.org/10.2112/si65-098.1>
- Scott, T., G. Masselink and P. Russell. 2011. Morphodynamic characteristics and classification of beaches in England and Wales. *Mar. Geol.*, 286: 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.04.004>
- Sénéchal, N., T. Gouriou, B. Castelle, J.-P. Parisot, S. Capo, S. Bujan and H. Howa. 2009. Morphodynamic response of a meso- to macro-tidal intermediate beach based on a long-term data set. *Geomorphology*, 107: 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.12.016>
- Sénéchal, N. and A. Ruiz de Alegría-Arzaburu. 2020. Seasonal imprint on beach morphodynamics. 461–486. In: Jackson, D.W.T. and A.D. Short (Eds.). *Sandy Beach Morphodynamics*. Elsevier, 793 p. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102927-5.00020-5>
- Short, A.D. 1999. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Wiley, Chichester. 379 pp. [https://doi.org/10.1002/1099-0755\(200009/10\)10:5<391::AID-AQC418>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/1099-0755(200009/10)10:5<391::AID-AQC418>3.0.CO;2-F)
- Short, A.D. 2020. Wave-dominated, tide-modified and tide-dominated continuum. 363–389. In: Jackson, D.W.T. and A.D. Short (Eds.). *Sandy Beach Morphodynamics*. Elsevier, 793 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00016-3>
- Sonu, C. 1973. Three-Dimensional beach changes. *J. Geol.*, 81(1): 42-64. <https://doi.org/10.1086/627806>
- Sonu, C., S. Murray, S.A. Hsu, J. Suhayda and E. Waddell. 1973. Sea breeze and coastal processes. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union.*, 54(9): 820-833. <https://doi.org/10.1029/EO054i009p00820>
- Thomas, Y., C. Ricaurte-Villota y O. Coca. 2014. Atlas climatológico del océano Pacífico colombiano y áreas adyacentes. *Invemar, Santa Marta*. 172 p.
- Torres-Freyermuth, A., J.A. Puleo, N. Di Cosmo, M.E. Allende-Arandia, P. Chardón-Maldonado, J. López, B. Figueroa-Espinoza, A. Ruiz de Alegría-Arzaburu, J. Figlus, T.M. Roberts Briggs, J. de la Roza and J. Candela. 2017. Nearshore circulation on a sea breeze dominated beach during intense wind events. *Cont. Shelf Res.*, 151: 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.10.008>
- U.S. Army Corps of Engineers–USACE. 1984. *Shore protection manual*. The Coastal Engineering Research Center (CERC), Washington, D.C. 143 p.
- Valiente, N.G., G. Masselink, T. Scott, D. Conley and R.J. Mccarroll. 2019. Role of waves and tides on depth of closure and potential for headland bypassing. *Mar. Geol.*, 407: 60–75. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.10.009>
- Vásquez-López, L.M., R.R. Torres-Parra, J.D. Iriarte-Sánchez, F. Oviedo-Barrero, Y.V. Camacho-De Angulo y H.F. Quiñonez-Torres. 2020. Medición y características generales del nivel del mar en la Cuenca Pacífica Colombiana. 134–152. En: División General Marítima (Ed.), *Compilación Oceanográfica de La Cuenca Pacífica Colombiana II*. Editorial Dimar, Bogotá. 229 p.
- Winant, C.D., D.L. Inman and C.E. Nordstrom. 1975. Description of seasonal beach changes using empirical Eigenfunctions. *J. Geophys. Res.*, 80: 1979–1986.
- Wright, L.D., J. Chappell, B.G. Thom, M.P. Bradshaw and P. Cowell. 1979. Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: Southeastern Australia. *Mar. Geol.*, 32: 105–140. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(79\)90149-X](https://doi.org/10.1016/0025-3227(79)90149-X)
- Wright, L.D. and A.D. Short. 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Mar. Geol.*, 56: 93–118. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-2)
- Wright, L.D. and B.G. Thom. 1977. Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach. *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.*, 1: 412–459. <https://doi.org/10.1177/030913337700100302>

RECIBIDO / RECEIVED: 29/01/2022

ACEPTADO / ACCEPTED: 05/01/2023