



Latin American Journal of Aquatic Research

E-ISSN: 0718-560X

lajar@ucv.cl

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Chile

Bernal, Gladys; Urrego, Ligia Estela; Gómez-García, Ángela M.; Betancur, Sara; Osorio, Andrés F.
Evolución geomorfológica y vegetación costera de playa Palmeras Parque Nacional Natural Isla
Gorgona, Pacífico Colombiano

Latin American Journal of Aquatic Research, vol. 42, núm. 3, 2014, pp. 622-638
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
Valparaíso, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=175031375018>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Research Article

Evolución geomorfológica y vegetación costera de playa Palmeras Parque Nacional Natural Isla Gorgona, Pacífico Colombiano

Gladys Bernal¹, Ligia Estela Urrego², Ángela M. Gómez-García¹, Sara Betancur² & Andrés F. Osorio¹

¹Grupo de investigación Oceánicos, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia, Calle 59A No 63-20, Medellín, Colombia

²Grupo de investigación Oceánicos, Departamento de Ciencias Forestales, Facultad de Ciencias Agrarias,
Universidad Nacional de Colombia, Calle 59A No 63-20, Medellín, Colombia

RESUMEN. Se realizó un estudio de la geomorfología y vegetación en playa Palmeras a partir del levantamiento de un modelo digital de elevación, mediciones sistemáticas de perfiles de playa durante 15 meses, análisis de la planta de equilibrio, mediciones de coberturas vegetales, conductividad eléctrica del agua de inundación y granulometría en 15 parcelas establecidas a lo largo de la playa. La playa se puede dividir en dos sectores. El sector NE se caracteriza por una forma en planta cóncava, cúspides de playa, mayor pendiente, mayor elevación, amplia zona seca, mayor variabilidad de la forma en planta y en perfil y mayor tendencia a la acreción, con vegetación herbácea dominada por *Rhynchospora polystachys*. El sector SW tiene una forma en planta convexa, es menos elevado, el ancho de zona seca es mínimo, la variabilidad de la planta y perfil son menores y tiende a la erosión. La vegetación herbácea en este sector está dominada por *Sphageticola trilobata* y hay mayor proporción de palmas muertas. Aunque la longitud de las observaciones limita las conclusiones sobre la variabilidad estacional e interanual de la playa, la cota de inundación aumenta en la época húmeda y hay mayor pérdida de sedimentos. Asimismo, durante años El Niño se evidenció un incremento de la energía del oleaje, que estaría asociado con erosión costera. En el largo plazo hay evidencias de un cambio en la dirección del oleaje y una basculación de la playa con acreción hacia el NE y erosión hacia el SW.

Palabras clave: islas rocosas, playas de bolsillo, geomorfología, vegetación de playa, Pacífico tropical oriental.

Geomorphological evolution and coastal vegetation of Palmeras Beach Gorgona Island National Natural Park, Colombian Pacific

ABSTRACT. A study of the geomorphology and vegetation in Palmeras Beach was conducted from a digital elevation model, systematic measurements of beach profiles for 15 months, analysis of equilibrium shape and measurements of vegetation, electric conductivity of the floodwater and granulometry at 15 parcels established along the beach. The beach can be divided into two sectors. The NE is characterized by a concave shape, beach cusps, steeper slope, higher elevation, wider dry zone, greater variability of the shape in plan and profile, greater tendency for accretion and herbaceous vegetation dominated by *Rhynchospora polystachys*. The SW sector has a convex shape, lower elevation, minimal dry zone width, lower variability of the plan and profile, its shape tends to erosion. The herbaceous vegetation is dominated by *Sphageticola trilobata* and it has a higher proportion of dead palms. Although the length of the observations limits the conclusions on the seasonal and interannual variability of the beach, in the wet season there is loss of sand and the sea level rises. Also during El Niño years increased wave energy, which could be associated with coastal erosion was evident. In the long term, there is evidence of a change in wave direction and a tilting of the beach with accretion to the NE and erosion to the SW.

Keywords: rocky islands, pocket beaches, geomorphology, beach vegetation, Eastern Tropical Pacific.

Corresponding author: Angela M. Gómez-García (amgomezgar@unal.edu.co)

INTRODUCCIÓN

La geomorfología de las playas en costas rocosas es resultado de diversas interacciones de procesos naturales y antropogénicos (Adriani & Walsh, 2007).

La dinámica de los sedimentos en relación directa con la hidrodinámica es el principal factor responsable de la geomorfología, así como de los procesos de erosión y sedimentación que tienen lugar en estas playas (Calhoun *et al.*, 2002). En general, los procesos

erosivos son causados principalmente por el oleaje (Kench *et al.*, 2006; Adriani & Walsh 2007; Llanes *et al.*, 2009) incluso en playas dominadas por la marea, pues existe un gradiente transversal a la costa de la magnitud de las corrientes por marea, siendo relativamente fuertes costa afuera pero insignificantes sobre la playa (Dehouck *et al.*, 2009).

La vegetación (natural o cultivada) es otro de los factores que interactúa en la dinámica y la configuración de la playa. La composición y estructura de la vegetación dependen de la topografía, salinidad, sustrato, nivel y frecuencia de la inundación del mar (Ghazanfar, 1999; Perillo *et al.*, 2009). Además, el establecimiento de cultivos o la deforestación, pueden modificar los procesos de sedimentación y erosión, y conjuntamente dar forma final a la playa y determinar sus tendencias de largo plazo a la erosión o acreción (Komar, 1998; Dawson & Smithers, 2010).

Desde el punto de vista geomorfológico, las playas en islas rocosas exhiben características particulares. Tienen salientes rocosas (*headlands*) que delimitan sus extremos y restringen el transporte longitudinal de sedimentos (playas encajadas o *pocket beaches*) e intervienen en la formación de cúspides y barras de arena, debido a la resonancia de ondas estacionarias, lo cual no es típico en costas abiertas (Özkan-Haller *et al.*, 2001; Dehouck *et al.*, 2009). A pesar que las playas en islas rocosas tienden a ser más pequeñas que las abiertas, la variabilidad espacial y temporal en los tamaños de grano, pendiente, forma del lecho, proveniencia de los sedimentos e incidencia del oleaje puede ser muy amplia (Dehouck *et al.*, 2009; Naylor *et al.*, 2011), y su respuesta a eventos extremos es diferente que en costas arenosas. Las costas arenosas responden de manera instantánea, y tienen una capacidad mayor de recuperarse y regresar a su estado anterior, mientras que las costas rocosas son más resistentes ante estos eventos pero, una vez que cambian su configuración, generalmente les es imposible recuperarse (Pethick & Crooks, 2000).

La vegetación costera juega un papel primordial en el equilibrio de estas playas. Ésta garantiza protección del suelo y con ello de las comunidades vegetales y animales interactuantes, ante mareas y vientos fuertes, así como de poblaciones humanas que viven en zonas costeras continentales e insulares (Mederos, 2005). Especialmente las complejas redes de raíces dan cohesión a los sedimentos y pueden disminuir el impacto de estos eventos. El sistema de raíces de la palma de coco (*Cocos nucifera L.*) varía según el sustrato en el que se encuentre: en tierra firme la longitud de las raíces alcanza 5 m y en substratos arenosos 7 m. Las raíces pueden ocupar un radio de ~6 m, y como sistema de anclaje de la palma permite la

retención efectiva del sustrato donde crece (Carr, 2011).

La interacción de factores como la cota de inundación del mar, temperatura y precipitación son claves para determinar la colonización y dominancia de plantas halófitas, herbáceas o leñosas en las playas. Esta vegetación, a su vez, incide en la infiltración y salinidad del agua intersticial de los sedimentos (Lara & Cohen, 2006). Adicionalmente, la granulometría de los sedimentos, principalmente arenas (62 μm - 2 mm), y los altos niveles de radiación que imperan en las playas, inciden en la estructura y vigor de las diferentes formas de crecimiento (Durán & Méndez, 2010), y constituyen un factor limitante adicional para el establecimiento de especies tolerantes a la sombra.

No obstante, la erosión costera afecta la vegetación, al exponer las raíces superficialmente y causar su desecación; de la misma forma, la deposición de sedimentos las puede asfixiar. Adicionalmente, la salinidad y la inundación causada por tormentas causan mortalidad de árboles adaptados a condiciones de inundación por agua dulce (Stanturf, 2007).

La playa Palmeras está ubicada al sur occidente del Parque Nacional Natural (PNN) Isla Gorgona. La vegetación de la playa está dominada por una plantación de palma de coco (*Cocos nucifera L.*), establecida aproximadamente hace 150 años (Ministerio del Medio Ambiente, 1998) y ha sido usada tradicionalmente por al menos dos especies de tortugas marinas para el desove (Camacho-Mosquera *et al.*, 2008; Amorocho & Reina, 2008; Amorocho *et al.*, 2012). Aunque las raíces de las palmas conceden soporte a los nidos de las tortugas, brindándoles mayor cohesión a los sedimentos, algunos de los sitios potenciales para el desove de las tortugas están ocupados por estas raíces. En los últimos años la erosión costera ha disminuido el ancho de playa, haciendo que las tortugas, en búsqueda de nuevos lugares para sus nidos, por encima del nivel de inundación del mar, compitan por espacio con las raíces de las palmas. Sin embargo, no se conocen las tasas de erosión de largo plazo, ni la variabilidad espacio temporal de la geomorfología de la playa, las variables que la determinan, ni cómo la vegetación natural responde a estas variaciones.

Por lo anterior, esta investigación se propuso identificar las variaciones espaciales en la sedimentación, la morfología y vegetación de esta playa, así como la dinámica de los sedimentos en escalas estacional a interanual, resultado de los procesos costeros que interactúan en este sector de la isla, y la relación con la vegetación natural predominante. Se presentan resultados de la geomorfología general obtenidos a partir del levantamiento de un modelo

digital de elevación; un análisis de las tendencias de erosión y sedimentación a partir de mediciones sistemáticas de perfiles de playa durante 15 meses; un análisis de la planta de equilibrio basado en una serie reconstruida de oleaje de 19 años; y la relación de la morfología con la vegetación, desde mediciones realizadas en 15 parcelas establecidas a lo largo de la playa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Isla Gorgona, es una isla rocosa mesomareal situada a 30 km del continente (Fig. 1), es el territorio insular más extenso sobre la plataforma continental del Pacífico colombiano, con cerca de 13,2 km² (Giraldo *et al.*, 2008). Playa Palmeras, con 1,2 km de longitud, a pesar de estar limitada por puntas rocosas, no se configura netamente como una playa encajada, especialmente en el sector sur, donde las rocas tienen espacios que permiten la circulación de sedimentos.

Playa Palmeras tiene un régimen mesomareal (amplitud de hasta 4 m de carrera de marea). Es un sistema costero complejo en el que intervienen procesos hidrodinámicos como difracción del oleaje inducida por el islote Gorgonilla (Fig. 1); reflexión, asomeramiento y refracción; interacción no lineal de frentes de onda en el sector sur; y sistemas de corrientes inducidas por marea, viento y geostrofía, además de las asociadas a la rotura del oleaje, que transportan gran cantidad de sedimentos en el contorno de la playa.

Gorgona está influenciada por la variación estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que genera un patrón de lluvia unimodal, con máximos de septiembre a octubre (época húmeda), mínimos de diciembre a febrero (época seca), y un promedio de 6.661 mm año⁻¹ (Blanco, 2009). También recibe la influencia interanual del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), cuya fase cálida -El Niño- aumenta la temperatura del aire, y reduce la lluvia y los caudales continentales, ocurriendo lo contrario en la fase húmeda de La Niña (Poveda, 2004; Blanco, 2009).

Cuando la ZCIT se encuentra en la latitud mínima, alrededor de los 2°N (abril), los vientos Alisios del noreste ingresan al Pacífico a través del Istmo de Panamá. Cuando está en su máxima latitud (8-10°N), en octubre, dominan los Alisios del sureste (Kessler, 2006). Esta dominancia estacional de los vientos determina la circulación, anomalías del nivel del mar y oleaje de la región (Rodríguez-Rubio & Schneider, 2006; Kessler, 2006). En la época seca (ZCIT al sur) se presentan corrientes predominantes hacia el norte sobre

la plataforma continental, en la época húmeda (ZCIT al norte) las corrientes sobre la plataforma tienen dirección sur.

Durante la mayor parte del año (marzo-diciembre) el oleaje proviene del SW y SSW, con períodos asociados de $13,8 \pm 1,8$ s y $14,0 \pm 1,8$ s, y alturas significantes entre $0,83 \pm 0,16$ m y $0,96 \pm 0,22$ m. En enero y febrero (época seca) el oleaje incidente se caracteriza por provenir desde el NWW, con alturas significantes entre $0,89 \pm 0,22$ m y $0,99 \pm 0,26$ m, y períodos entre $13,8 \pm 2,0$ s y $14,0 \pm 1,9$ s (Restrepo *et al.*, 2009).

Sobre los cambios del nivel del mar en la zona, no hay datos concluyentes. El mareógrafo cercano con el registro más similar al de Gorgona es el de Tumaco (Fig. 1). De acuerdo con Restrepo *et al.* (2009), la tendencia de largo plazo de este registro entre 1953 y 2000 es de descenso (-1,14 mm a⁻¹), debido a levantamientos tectónicos. En general, toda la región del Pacífico colombiano está afectada por intensa actividad tectónica que se sobrepone a las tasas de ascenso globales. Específicamente en Gorgona, han habido cambios abruptos en el nivel de la isla durante terremotos, particularmente en los más intensos como los de 1906, 1979 y 2007 (Bermúdez *et al.*, 2008).

Morfología de playa

En mayo de 2011 se levantó la topografía de detalle de la playa utilizando un GPS diferencial Topcon y se obtuvo un Modelo Digital de Elevación (MDE) actualizado del sistema (Fig. 2), además de la batimetría de las zonas costeras aledañas con una ecosonda Hummingbird de 200-28 Hz. Entre octubre de 2010 y septiembre de 2011 se levantaron, quincenalmente, cinco perfiles topográficos perpendiculares a la playa, distribuidos cada 200 m (Fig. 1), y entre el 20 de julio y 5 de septiembre de 2011 se midieron de dos a tres veces por semana. En octubre de 2010 (época húmeda) y febrero de 2011 (época seca) se recolectaron muestras de sedimentos de la playa, para análisis granulométrico, sobre los cinco perfiles, en las zonas seca, húmeda, de lavado y de rompiente.

Los perfiles y la topografía se llevaron a un mismo nivel de referencia utilizando como *datum* los promedios de las bajamaras de sicigia, calculados en la serie de nivel del mar de 49 años (1959-2008), medida en el municipio de Tumaco (Fig. 1). Se definieron los niveles medio alto (NMA, promedios de las mareas altas), medio medio (NMM, promedio de la serie completa) y medio bajo (NMB, promedio de las mareas bajas) en cada perfil medido. Finalmente, se utilizaron las aproximaciones de Masselink & Short (1993) y de Guza & Inman (1975) para realizar el análisis de estados morfodinámicos.

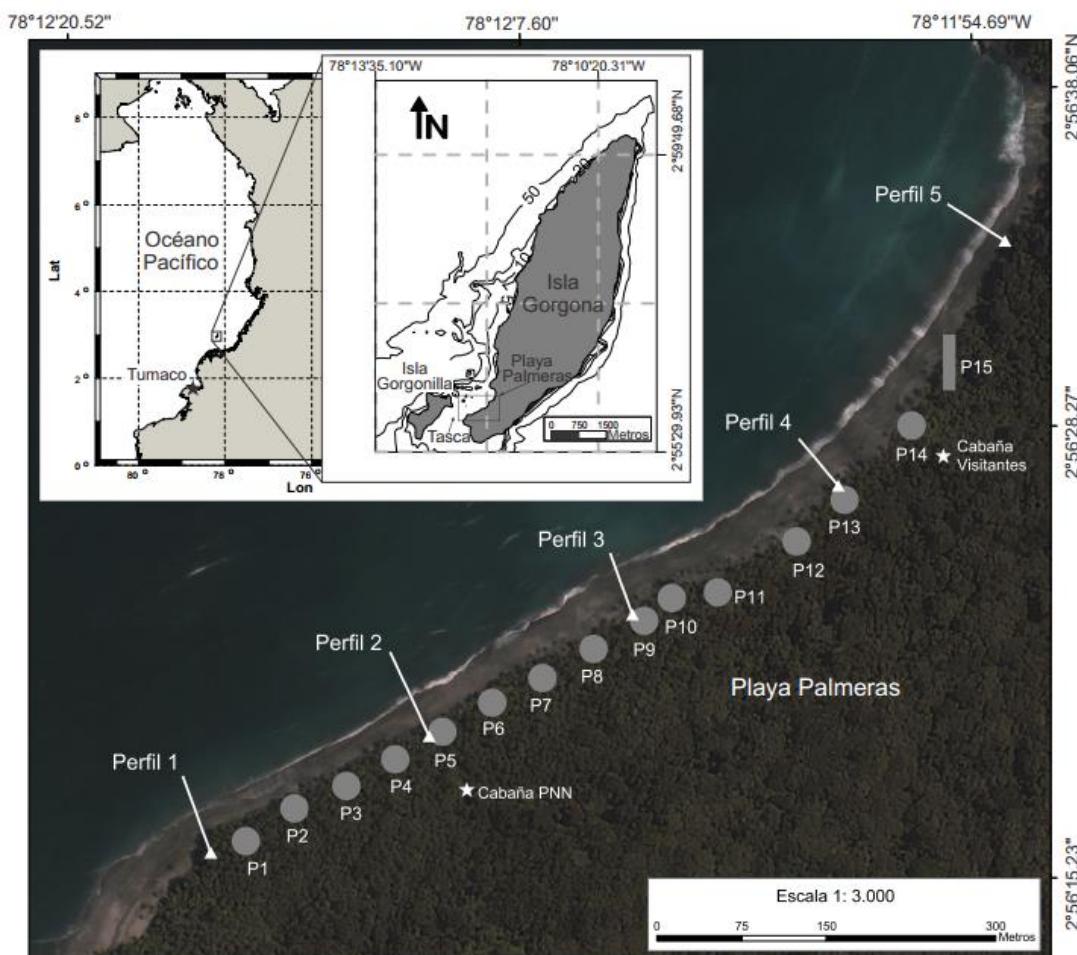


Figura 1. Localización de la playa Palmeras en el PNN Isla Gorgona, Pacífico colombiano. Se indica la ubicación de los perfiles (1 a 5) y las parcelas de control de la vegetación (P1 a P15). P15 es rectangular debido a que está demarcada por el acantilado al norte de la playa.

El análisis de largo plazo de planta de equilibrio se desarrolló con el programa computacional SMC (Sistema de Modelado Costero, González *et al.*, 2007) cuya aplicación ha sido ampliamente validada internacionalmente (González & Medina, 2001; González *et al.*, 2007; Klein *et al.*, 2010; Lausman *et al.*, 2010; Raabe *et al.*, 2010). Para este análisis se utilizó la dirección del Flujo Medio de Energía (FME) del Oleaje tal como se expresa en las ecuaciones 1, 2, 3 y 4, a partir de una serie de oleaje de 19 años, reconstruida para un punto en el norte del islote Gorgonilla (donde el oleaje sufre la mayor difracción, Fig. 1), a partir de la propagación desde aguas profundas de una serie del reanálisis del proyecto GOW (Globe Ocean Waves, Reguero *et al.*, 2012) utilizando el modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore; The SWAN Team, 1999). Mayores detalles de la meto-

dología implementada pueden ser encontrados en Osorio *et al.* (2014).

$$FME_y = \frac{1}{8} \rho g H^2 C g \sin(\theta) \quad \text{Ec. 1}$$

$$FME_x = \frac{1}{8} \rho g H^2 C g \cos(\theta) \quad \text{Ec. 2}$$

donde FME_x : Flujo medio de energía en dirección x , FME_y : flujo medio de energía en dirección y , ρ : densidad del agua del mar, g : gravedad, H : altura de ola, Cg : celeridad de grupo del oleaje y θ : ángulo de incidencia del oleaje.

El FME resultante se obtiene de la Ec. 3 y la dirección asociada de la Ec. 4:

$$FME = \sqrt{FME_x^2 + FME_y^2} \quad \text{Ec. 3}$$

$$\theta_{FME} = \tan^{-1} \frac{FME_y}{FME_x} \quad \text{Ec. 4}$$

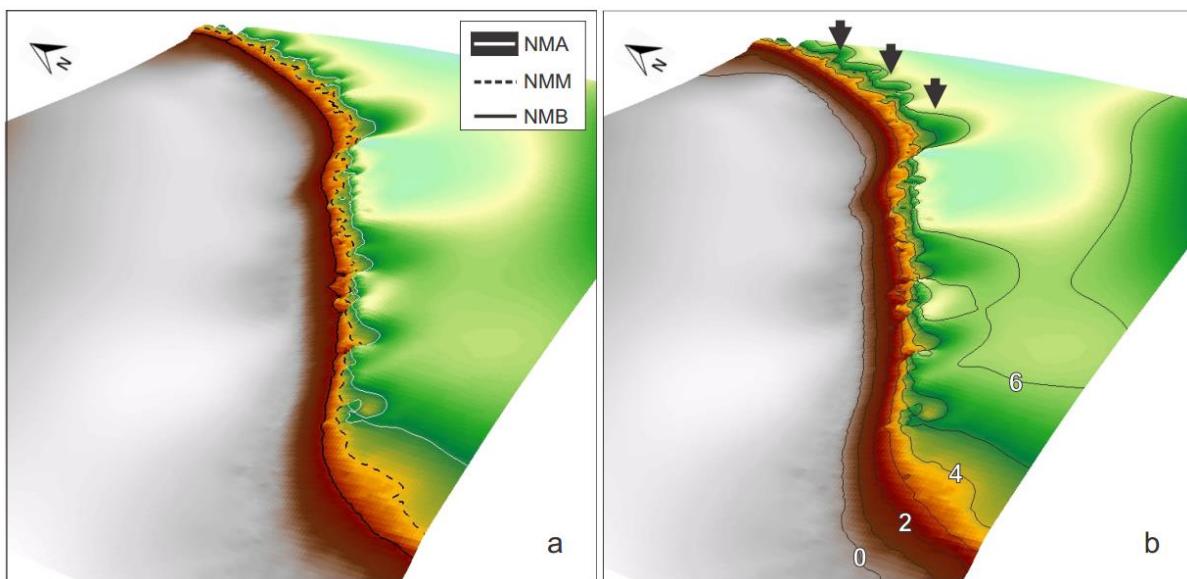


Figura 2. Modelo Digital de Elevación (MDE) de la playa en mayo de 2011 que representa únicamente el terreno no consolidado. a) NMA: nivel del mar Medio Alto (5,054 m), NMM: nivel del mar Medio Medio (3,819 m) y NMB: nivel del mar Medio Bajo (2,585 m). Al sur, las cotas están más separadas indicando una zona más inundable (tendida) que el norte, b) MDE con curvas de nivel cada metro, se observan algunas cúspides (flechas), especialmente al norte de la playa.

Se seleccionó el modelo de equilibrio que mejor se ajustó a la forma en planta observada en una imagen satelital Ikonos del 2008, que fue la parábola de Hsu & Evans (1989) (González & Medina, 2001; González *et al.*, 2007; Raabe *et al.*, 2010). Asimismo, se seleccionó el punto de difracción que mejor se ajustó a la forma en planta general, teniendo en cuenta todos los parámetros necesarios que se definen en el modelo analítico (González & Medina 2001; González *et al.*, 2007; Raabe *et al.*, 2010).

Vegetación

Para el muestreo de la vegetación en la playa, se establecieron cada 50 m dos parcelas concéntricas de 500 m² y 25 m² (Fig. 1), a lo largo de un transecto paralelo a la línea de costa, en dirección sur-norte. Adicionalmente, en cada parcela de 500 m² se ubicaron dos parcelas cuadradas de 1 m². En las parcelas de 500 m² se registraron, marcaron y ubicaron todas las palmas de coco, clasificadas en adultos (>4 m de altura), juveniles (1-4 m de altura) y plántulas (<1,5 m), y todos los individuos de otras especies arbóreas que tuvieran diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor o igual a 10 cm. A cada palma se le registró el estado fenológico, la altura total, con clinómetro Suunto, y el DAP con cinta métrica, y con base a éste último se calculó el área basal. En las parcelas de 25 m² se registró la altura y el DAP a los individuos de especies diferentes al coco, con DAP entre 1 y 10 cm. En las parcelas de 1 m² se

registró el porcentaje de cobertura de las especies herbáceas y arbustivas presentes.

Se realizaron análisis de ordenación para establecer la relación entre la cobertura de especies tanto en las parcelas grandes como pequeñas con un Análisis de Correspondencia Canónico (ACC) utilizando CANOCO (Ter Braak & Smilauer, 2003), y con base en estos resultados se seleccionaron las variables más importantes y las especies mejor indicadoras de las condiciones ambientales. Por medio de análisis de regresión múltiple (Statgraphics Centurion XV, Version 15.1.02) se seleccionaron las variables que mejor explicaron la distribución de especies y las características estructurales de la vegetación.

RESULTADOS

Morfología

El perfil típico de la playa (Fig. 3), desde la isla hacia el mar, comienza en un terreno consolidado con vegetación dominada por palmas de coco, que se separa de la playa (terreno no consolidado) por un escalón de altura variable espacial y temporalmente dependiendo de la dinámica de los sedimentos arenosos. Continúa la zona seca de la playa, definida entre el límite del terreno consolidado (que puede ser el escalón) y el NMA; la zona húmeda entre el NMB y el NMM; y la zona sumergida entre el NMB y la profundidad de cierre de

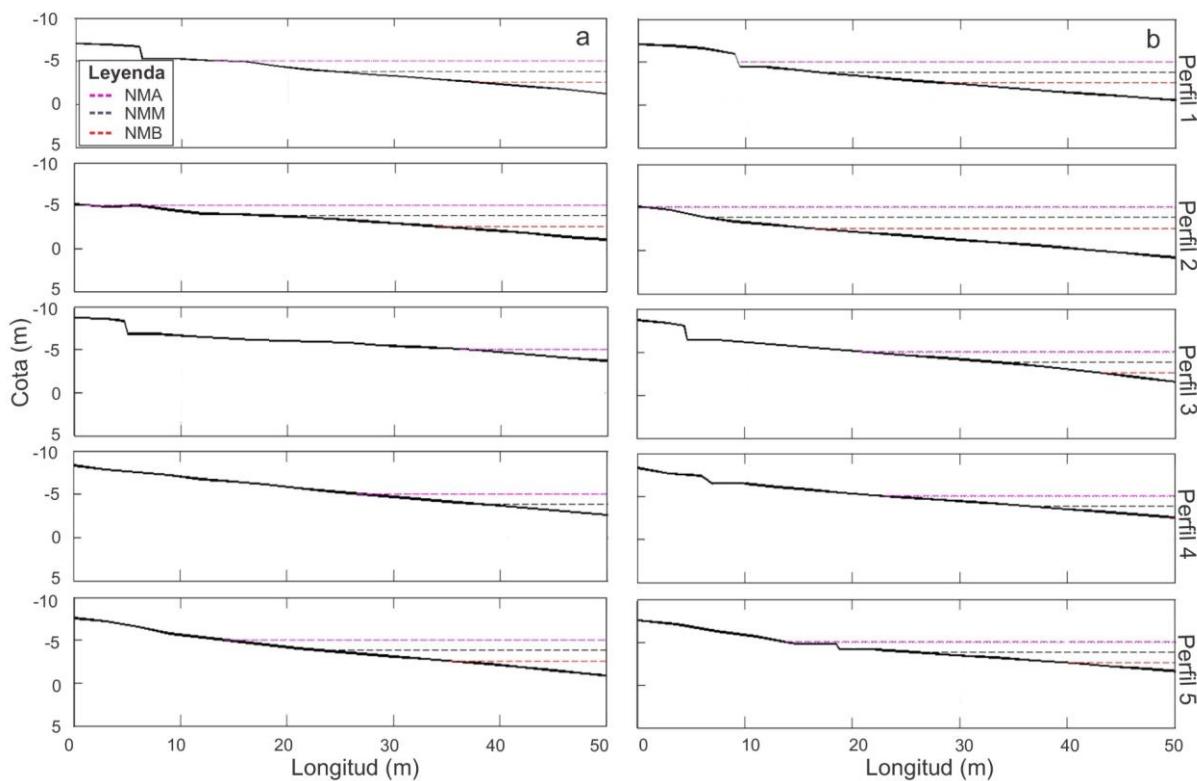


Figura 3. Variabilidad espacial y estacional de los perfiles de playa. a) Perfiles medidos en época seca (18 de enero de 2011), b) perfiles medidos en época húmeda (5 de septiembre de 2011). El cero (0) es el punto donde se comenzó a medir cada perfil.

la playa (hasta que el oleaje toca fondo, Bernabeu *et al.*, 2003). El análisis de estados morfodinámicos (Masselink & Short, 1993; Guza & Inman, 1975) indicó que la mayor parte del tiempo la playa se encuentra en estado reflejante, con un tamaño de grano promedio de 0,5 mm en la época seca y 1,2 mm en la época húmeda.

La playa se puede dividir geomorfológicamente en dos sectores debido a la difracción del oleaje en un afloramiento rocoso en el lecho marino al frente del perfil 3. El sector noreste (NE) (perfles 3-5) se caracterizó por una forma en planta cóncava, permanencia de cúspides de playa, mayor pendiente y mayor elevación, lo que permite una amplia zona seca (entre 15 m en el perfil 5 y 35 m en el perfil 3), con variabilidad estacional (menor ancho en la época húmeda y mayor en la seca). El sector suroeste (SW) (perfles 1 y 2) tiene una forma en planta convexa y es menos elevado que el resto de la playa, por lo que el NMA del mar puede inundarlo con facilidad, dejándolo prácticamente sin zona seca durante todo el año. Durante la época húmeda la playa pierde arena en toda su extensión y el NMA del mar penetra más hacia tierra (Fig. 3b). Las variaciones son más significativas en los

perfles 3-5 donde el escalón desaparece en época seca y aparece en época húmeda.

La difracción y disipación del oleaje en el fondo marino rocoso y en el islote Gorgonilla hacen que el sector NE reciba el oleaje desde el noroeste durante todo el año (principalmente por la difracción). Mientras que en el sector SW interactúan dos frentes de onda, uno sin difractar que ingresa por el estrecho de Tasca desde el sur y otro difractado que viaja en dirección norte-sur.

Aunque hay condiciones típicas estacionales, se encontró que playa Palmeras es un sistema altamente dinámico, que en el transcurso de horas puede depositar o erosionar gran cantidad de sedimentos. En general, la mayor variabilidad se presentó en la zona intermareal y puede pasar de un perfil de acreción a uno de erosión en días. La altura del escalón que separa el suelo consolidado puede variar debido a la acumulación o erosión de sedimentos, y puede aparecer y desaparecer en escala de días.

El análisis del FME medio mensual (Fig. 4) mostró que los meses de mayor energía del oleaje son enero a marzo, y los de menor noviembre y diciembre. Las

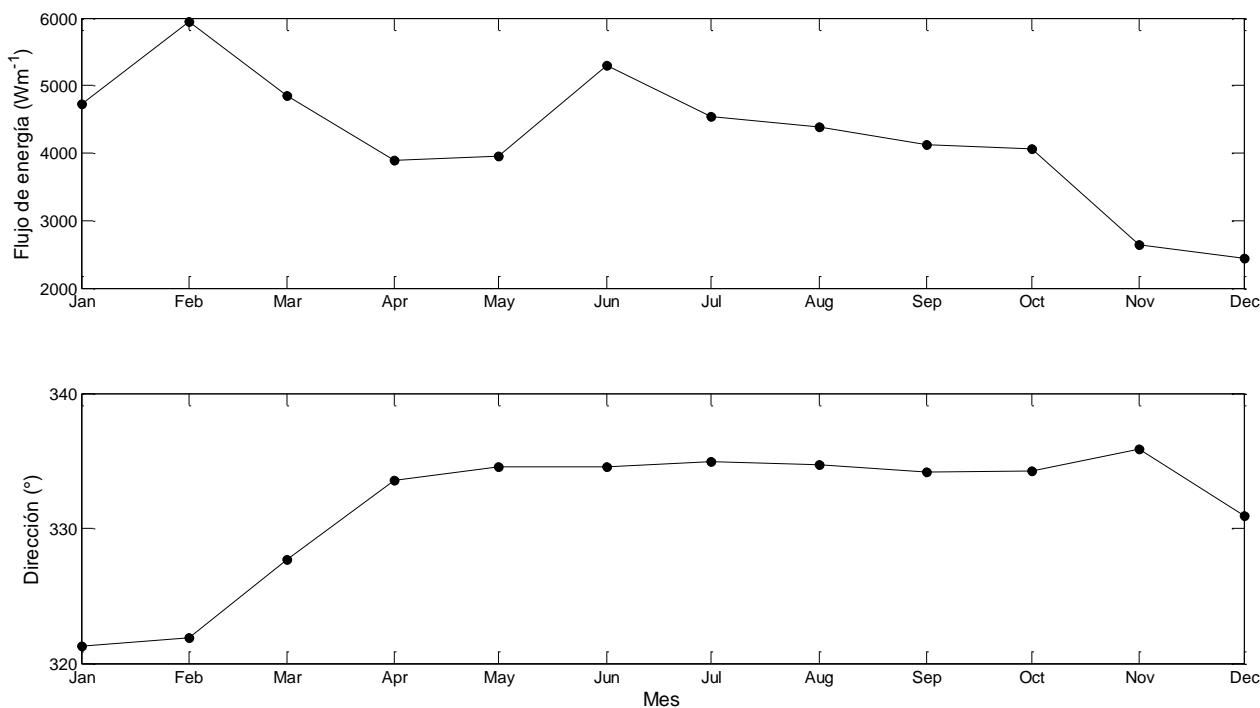


Figura 4. Flujo medio de energía mensual interanual calculado a la serie de 19 años (1989-2008) y dirección asociada.

direcciones mostraron una tendencia constante desde el noroeste; sin embargo, de enero a marzo el oleaje proviene más del norte, lo que coincide con el ingreso de los Alisios del NE debido a la migración de la ZCIT hacia el sur. El promedio anual del FME (Fig. 5) fue mayor para los años El Niño (1992, 1995, 1998 y 2003), siendo más significativo en 1998. La dirección asociada a la serie anual es muy constante ($\pm 8^\circ$), siempre desde el noroeste, debido a la difracción que sufre el oleaje en el islote Gorgonilla.

Las modelaciones de planta de equilibrio fueron realizadas para los FME mensuales y anuales de mayor variación en el ángulo de incidencia. En cuanto a la variación de la dirección del FME mensual, se consideraron los meses de enero, con un ángulo de incidencia de N51, 26°W y noviembre, con un ángulo de incidencia del FME de N65, 88°W (Fig. 6), con una diferencia de 14,62°. La planta de equilibrio resultante de estas direcciones, concuerda con los cambios detectados en el balance de sedimentos en la zona noreste de la playa, con mayor acreción en la época húmeda y menor en la seca (Fig. 7).

Las mayores variaciones anuales de la dirección del FME corresponden a 1995 con un ángulo de incidencia de N57, 8°W y 2008 con un ángulo de incidencia de N64°W. Aunque las variaciones en el ángulo de incidencia son significativas (6,2°) el modelo de equilibrio resultante sólo mostró variaciones aprecia-

bles en el sector NE de la playa, indicando una tendencia a la acreción de la línea de costa de aproximadamente 13 m bajo las condiciones del año 2008.

El análisis de erosión-acrección indicó una pérdida neta de sedimentos de la playa durante el período de medición. En la Fig. 7 se muestran series de tiempo del balance de sedimentos en cada perfil respecto al perfil medido en enero del 2011. Es evidente una variación espacial coincidente con los dos sectores geomorfológicos de la playa. La erosión es más intensa en el sector SW y hay acreción neta en el extremo del sector NE (perfíles 4 y 5). En orden de magnitud, las pérdidas netas de sedimentos durante el período de medición son cercanas a 1.800 m³ m⁻¹ de sedimentos en el perfil 2 y 600 m³ m⁻¹ en el perfil 3. En cambio, la ganancia neta en el perfil 1 es del orden de 100 m³ m⁻¹, en el perfil 4 de 500 m³ m⁻¹ y en el 5 de 1.100 m³ m⁻¹ (Fig. 7 Balance Total). Estacionalmente, en la mayoría de los perfiles se presenta mayor erosión en la época húmeda, excepto en el perfil 5, que presenta la mayor deposición de sedimentos.

Vegetación

En el análisis de la vegetación, a lo largo de la playa, se identificaron cambios asociados a la variación en las características físicas de la playa, mencionadas y relacionadas con la distancia a la línea de costa y a la tierra firme, las que presentaron un contraste entre el

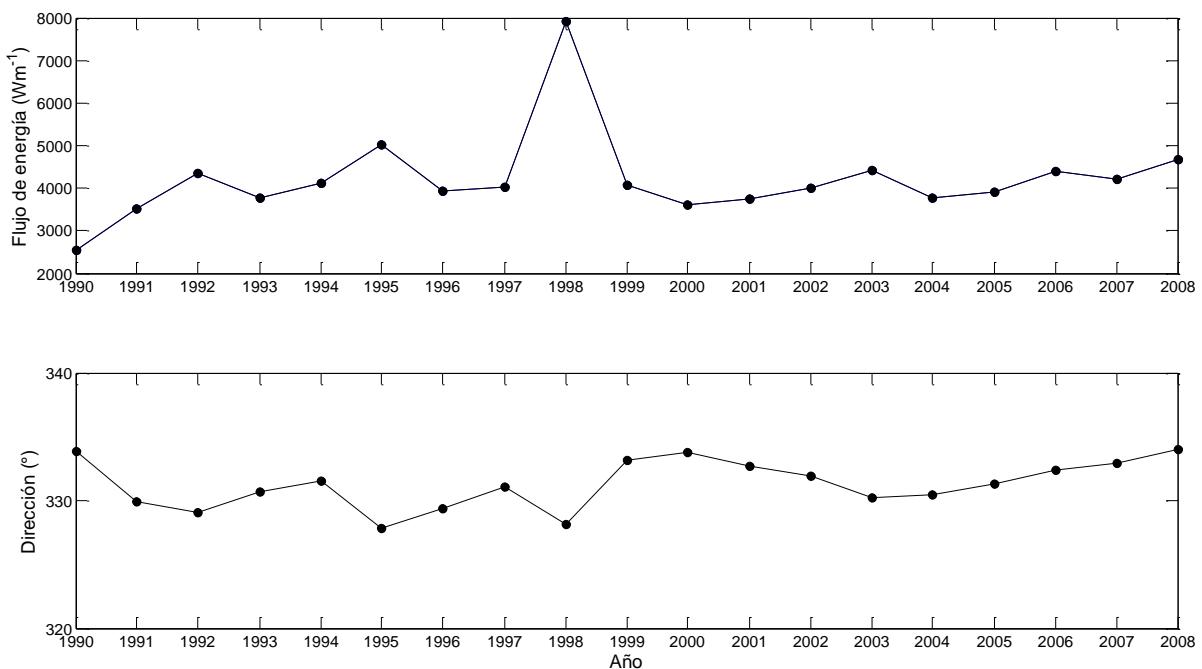


Figura 5. Flujo medio de energía anual calculado a la serie de oleaje de 19 años (1989-2008) y dirección asociada.

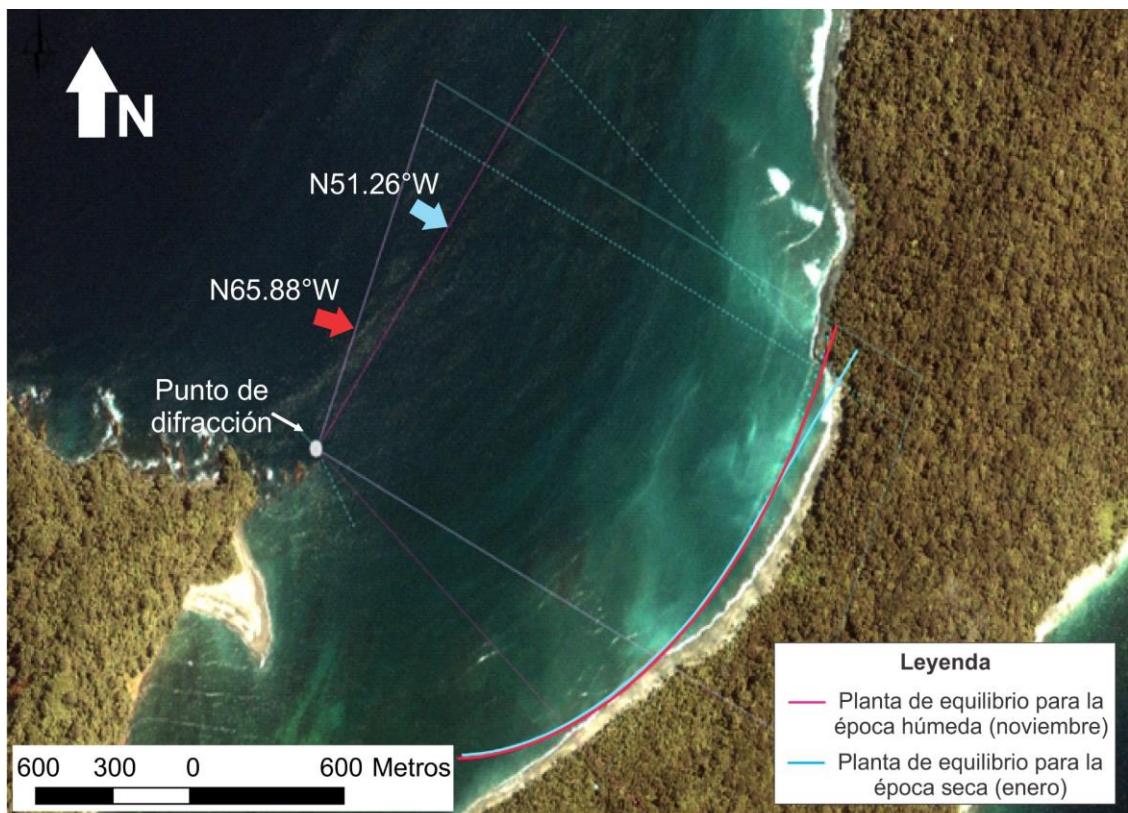


Figura 6. Plantas de equilibrio generales para variaciones del ángulo del flujo medio de energía (FME) promedio mensual. En azul planta correspondiente a la dirección del FME de enero (N51, 26°W). En magenta planta correspondiente a la dirección del FME de noviembre (N65, 88°W). El punto blanco indica la ubicación de la serie donde se calculó el FME (punto de difracción).

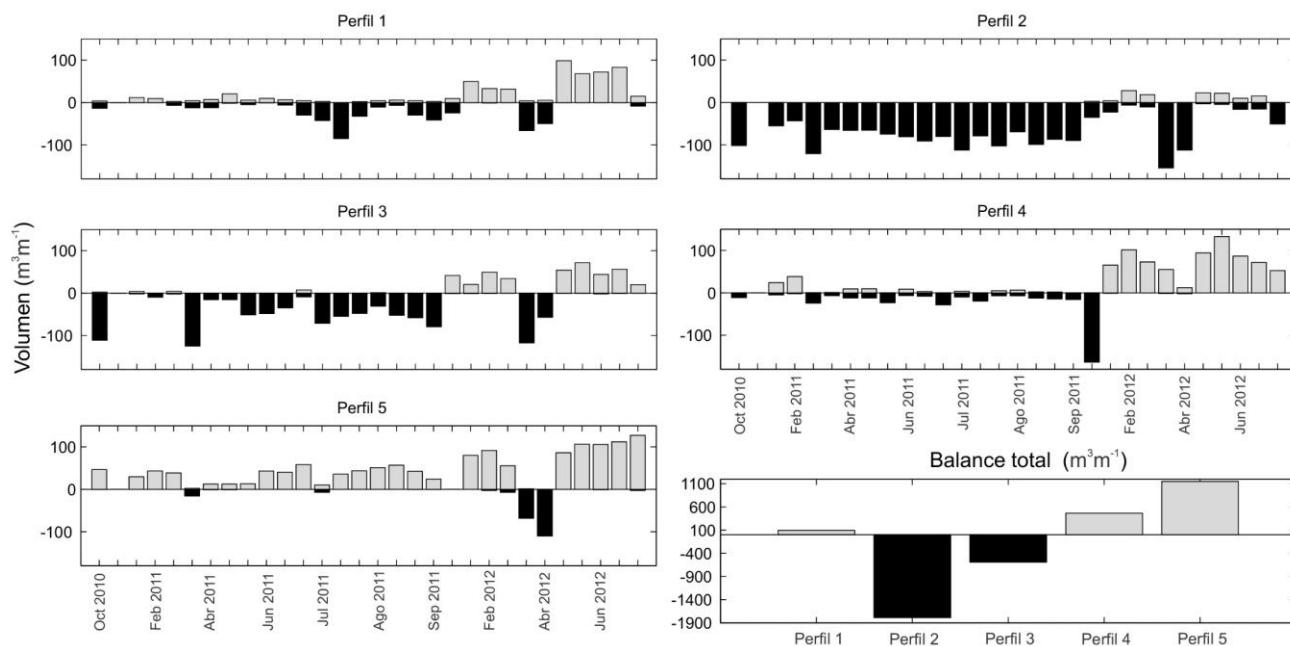


Figura 7. Estimación de la pérdida (negro) o ganancia (gris) de sedimentos ($\text{m}^3 \text{m}^{-1}$) en el tiempo, para cada perfil, con referencia al perfil de enero del 2011.

sector SW y el NE, como se muestra a continuación. La franja más próxima a la línea de costa (occidental) se denominó parte externa y la parte más cercana a la tierra firme (oriental) parte interna. A pesar que en todas las parcelas el dosel superior está dominado por palmas de coco (>80%) y en menor proporción por árboles del bosque secundario (Tabla 1), las mayores diferencias entre las parcelas se identificaron en la composición de las especies herbáceas dominantes, las cuales se relacionan especialmente con la variación en la topografía y la granulometría de ambos sectores de la playa. La Figura 8 muestra la variación en la cobertura de las dos especies herbáceas dominantes, así como de las variables ambientales más importantes a lo largo del transecto (Parcelas 1-15).

En las primeras seis parcelas ubicadas hacia el sector SW de la playa, la especie dominante es *Sphagneticola trilobata* (L.) Pruski (Asteraceae), en este sector, predominan condiciones de menor pendiente (0%). El mayor aporte de gravillas y arenas se presenta hacia la parte externa de la playa, mientras hacia el interior predominan las arcillas. En este sector se registró el mayor porcentaje de palmas de coco adultas muertas (37,2% versus 25,3%). En las parcelas restantes, ubicadas en el sector NE, la especie dominante es *Rhynchospora polystachys* (Turrill) H. Pfeiff (Cyperaceae). Aquí (NE) se presentan las mayores pendientes (15%) y el menor aporte de gravillas y arenas hacia la parte externa de la playa. La

conductividad del agua de inundación medida en los dos sectores ($70 \mu\text{S cm}^{-1}$ en el SW y $118 \mu\text{S cm}^{-1}$ en el NE) indicó condiciones de agua dulce con salinidades muy similares (0,04 y 0,06 respectivamente).

Estas relaciones se corroboraron con el Análisis de Correspondencia Canónica (ACC) de las sub-parcelas de vegetación (Fig. 9), con autovalores de 0,603 y 0,423 para los dos primeros ejes. Este análisis mostró similitudes florísticas entre las parcelas del sector SW (2, 3, 5, 7 y 8) relacionadas con la dominancia de *S. trilobata* y la presencia de *Casearia sylvestris* Sw. (Salicaceae) *Conostegia* sp. (Melastomataceae), asociadas a los mayores contenidos de arcilla y arena hacia la parte interna y de gravillas y arenas hacia la parte externa de las parcelas. La segunda agrupación corresponde a las parcelas 1, 9, 10, 11, 12 y 13 ubicadas, con excepción de la 1, en el sector NE, y se asocian con dominancia de *R. polystachys*, y la presencia de *Piper trigonum* C.DC. (Piperaceae) y *Clidemia capitellata* (Bonpl.) D. Don. (Melastomataceae). En éstas la cobertura de *S. trilobata*, disminuyó hasta desparecer completamente. Este agrupamiento está relacionado con mayores valores de pH, pendiente y conductividad eléctrica (salinidad) del agua de inundación. Las parcelas 6 y 14 no hicieron parte de las agrupaciones anteriores. La parcela 6 se asoció con menores contenidos de arena hacia la parte exterior de la playa, y la presencia de *Clibadium aggersii*

Tabla 1. Especies arbóreas presentes en playa Palmeras.

Familia	Especie	Nombre común	Área basal (m ² ha ⁻¹)
Arecaceae	<i>Cocos nucifera</i> L.	Palma de coco	441,62
Malvaceae	<i>Talipariti liliaceum</i> (L.) Fryxell	Majagua	2,01
Combretaceae	<i>Terminalia catappa</i> L.	Almendro	3,71
Bignoniaceae	<i>Amphitecna latifolia</i> (Mill.) A.H. Gentry	Calabacillo	0,52
Salicaceae	<i>Casearia sylvestris</i> Sw.	Huesito	0,36
Papilionoideae	<i>Andira inermis</i> (W. Wright) Kunth ex DC.	Amargo	14,69
Rubiaceae	<i>Cosmibuena macrocarpa</i> (Benth.) Klotsch ex Walp.	Azuceno	3,78
Melastomataceae	<i>Clidemia capitellata</i> (Bonpl.) D. Don	Almendro de río	0,11
Melastomataceae	<i>Conostegia</i> sp.		0,16

Hieron (Asteraceae) y *Cyclanthe* sp. (Cyclan-thaceae). La 14 se asoció con menores contenidos de limo hacia la parte interna y la presencia de *R. polystachys*.

El análisis de regresión múltiple entre la cobertura de las especies herbáceas y las variables ambientales mostró relaciones significativas en seis especies. *S. trilobata* presentó relaciones significativas positivas con los contenidos de gravilla y negativos con los de arena en la parte exterior ($R^2 = 0,5$; $F_{12,2} = 6,1$; $P = 0,015$). *R. polystachys* se correlacionó positivamente con los contenidos de gravilla interior ($R^2 = 0,4$; $F_{13,1} = 8,5$; $P = 0,01$), y *C. sylvestris* positivamente con los de gravilla en ambas partes ($R^2 = 0,7$; $F_{12,2} = 16,8$; $P = 0,0003$). Mientras *P. trigonum* se correlacionó con el contenido de arcilla en la parte exterior ($R^2 = 0,35$; $F_{13,1} = 7,1$; $P = 0,02$), *C. aggersii* ($R^2 = 0,45$, $F_{13,1} = 11,0$; $P = 0,006$) y *Cyclanthe* sp. ($R^2 = 0,45$; $F_{13,1} = 10,9$; $P = 0,006$) lo hicieron negativamente con los contenidos de arena en la parte exterior.

De las variables estructurales de la vegetación, tres mostraron relaciones significativas con las variables ambientales. El área basal de los árboles mayores de 10 cm de DAP ($F_{13,1} = 13,3$; $P = 0,0029$) y el de las palmas adultas ($F_{13,1} = 5,4$; $P = 0,04$) se correlacionaron con la altura sobre el nivel del mar y el porcentaje de arcilla en la parte exterior de la parcela, respectivamente. El porcentaje de palmas adultas muertas presentó una correlación negativa con la conductividad eléctrica del agua de inundación ($F_{13,1} = 16,8$; $P = 0,02$).

DISCUSIÓN

Las playas de bolsillo tienen escasa conexión o intercambio con las costas aledañas debido a que están confinadas por salientes rocosas (Dehouck *et al.*, 2009). Playa Palmeras difiere de este esquema por su extremo SW, relativamente abierto. En costas rocosas, la hidrodinámica y el transporte de sedimentos, que configuran la morfología de la playa, están fuertemente

controlados por la geología, es decir, por la morfología del sustrato rocoso (Komar, 1998). En playa Palmeras esto se hace evidente por el impacto que tiene Gorgonilla sobre el oleaje; la relación de la morfología con los altos topográficos del sustrato rocoso (la roca que aflora en el centro de la playa al frente del perfil 3); y el posible intercambio de sedimentos a través del paso de Tasca y la punta abierta hacia el SW.

Los resultados de este estudio demuestran que hay dos sectores bien diferenciados en playa Palmeras, separados por el afloramiento rocoso ubicado al centro de la playa (a unos 600 m de los extremos) y que las diferencias morfológicas entre estos sectores están directamente relacionadas con la vegetación de playa. El sector NE de la playa (perfíles 3 a 5) está caracterizado por una forma en planta cóncava, cúspides de playa, mayor pendiente, mayor elevación, una amplia zona seca, mayor variabilidad de la forma en planta y en perfil, y mayor tendencia a la acreción. La vegetación herbácea está dominada por *Rhynchospora polystachys*. El sector SW (perfíles 1 y 2) tiene una forma en planta convexa, es menos elevado, el ancho de zona seca es mínimo, la variabilidad de la planta y perfil son menores y tiende a la erosión. La vegetación herbácea está dominada por *Sphagneticola trilobata*, y hay mayor proporción de palmas muertas.

Dehouck *et al.* (2009) mencionan que en las playas de costas rocosas las barras de arena intermareal y cúspides de playa son debidas a un aumento en las ondas de infragravedad y estacionarias. En la morfología de playa Palmeras no se detectaron barras de arena intermareal, pero no se descarta su presencia en el sector NE donde debido al fuerte oleaje no se pudieron continuar los perfíles de playa por debajo del NMB del mar. Sin embargo, si se encontraron cúspides de playa, especialmente en este sector (NE).

El contraste geomorfológico registrado en la playa también lo refleja la vegetación (Fig. 10). Considerando que la vegetación adulta en playa Palmeras está domi-

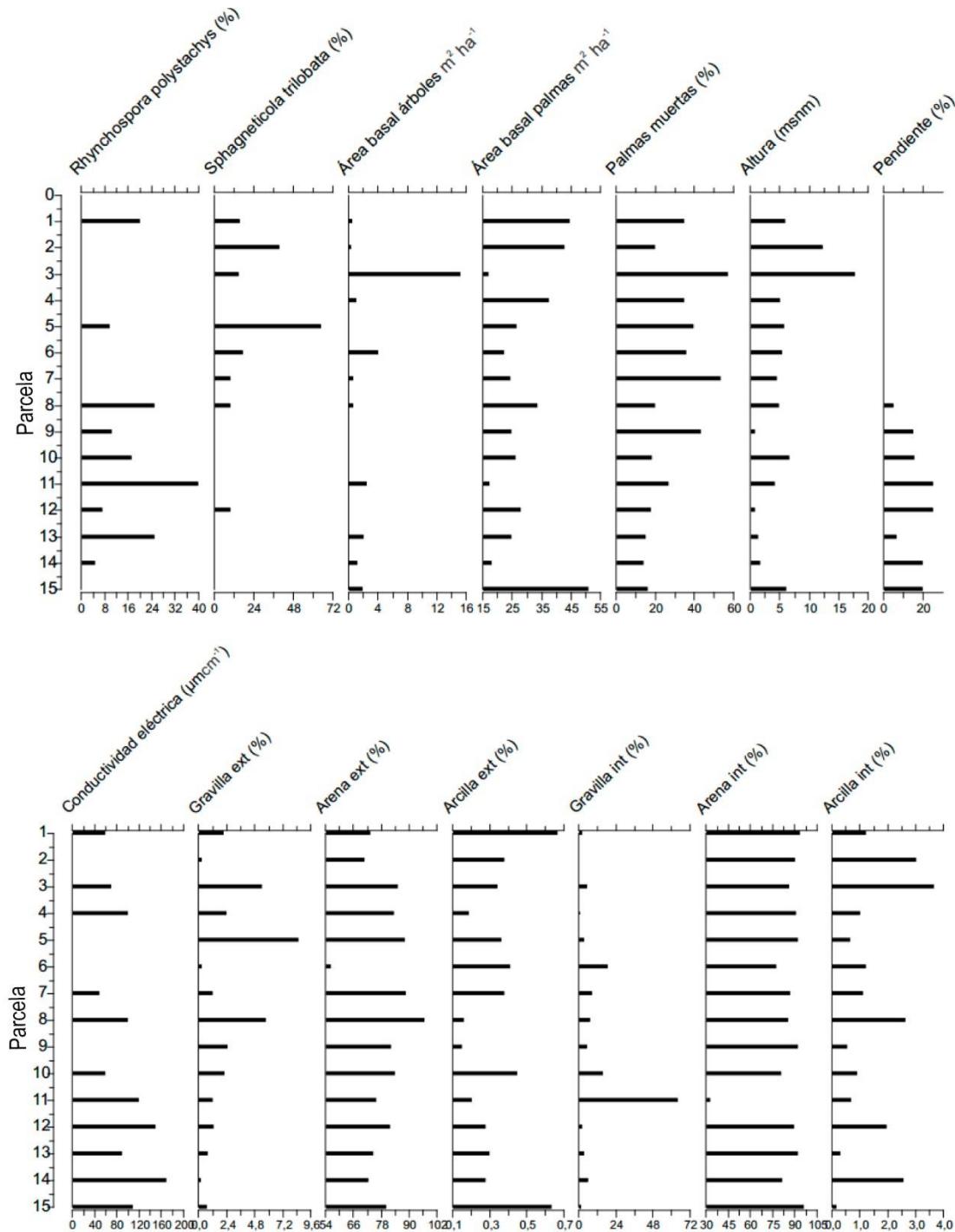


Figura 8. Cobertura vegetal de *Sphagnicola trilobata* y *Rhynchospora polystachys*, y principales variables físicas de las parcelas de vegetación en playa Palmeras. Figura realizada con C2 (Juggins, 2003-2006).

nada por una plantación de coco, establecida hace más de 150 años, no es apropiado identificar la relación de ésta con los procesos físicos, aun teniendo en cuenta que tal plantación no ha tenido manejo, posibilitando la colonización de vegetación secundaria, tal como lo muestran los datos de los árboles con DAP > 10 cm. No

obstante, es importante comparar el estado de la vegetación en relación con la sedimentología en ambos sectores. Si bien la dominancia de palmas de coco en la vegetación adulta de todas las parcelas fue superior al 80%, tanto el área basal de palmas vivas como la de los árboles mostró una correlación con la cantidad de arcí-

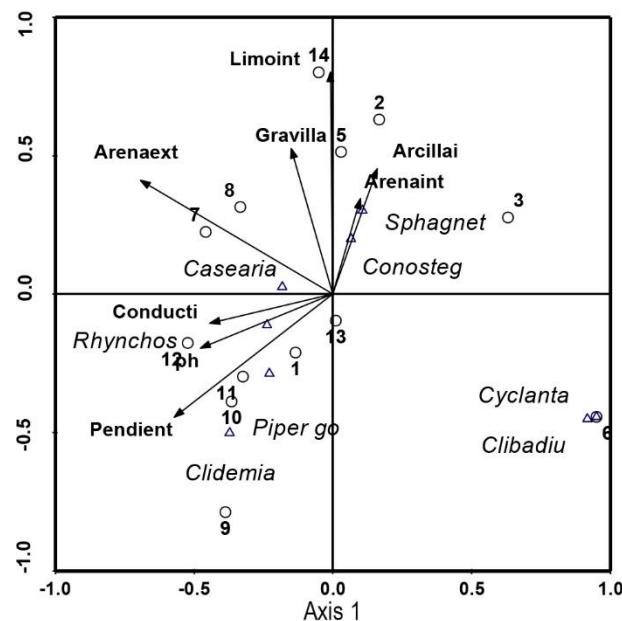


Figura 9. Análisis de Correspondencia Canónico (ACC) de las sub-parcelas de vegetación.

lla exterior, indicando el menor aporte de arenas y gravillas en el sector NE donde se presentaron los valores más altos de estas variables, en respuesta a las condiciones de suelo más consolidado y estable. Según Doyle *et al.* (2010), la vegetación boscosa responde con disminución del área ocupada y pérdida de diversidad, ante el aumento del nivel del mar, como ocurre en el sector SW.

Adicionalmente, en el sector SW se presentó el mayor porcentaje de palmas de coco muertas. Por la sintomatología (Sáenz, 2005), esta mortalidad es atribuible al anillo rojo, enfermedad ampliamente distribuida en Colombia y en otros países latinoamericanos, causada por el nemátodo *Bursaphelenchus cocophilus* y transmitido particularmente por el picudo de la palma, *Rhynchophorus palmarum*. No obstante, es muy factible que factores nutricionales y las condiciones físicas presentes este sector como altas tasas de erosión e inundación estén deteriorando las condiciones ambientales para la supervivencia de la palma y determinen la incidencia y la manifestación de la enfermedad (Chinchilla, 1997).

Una respuesta más contundente al contraste geomorfológico de la playa la presentó la vegetación herbácea, como lo muestra el ACC al separar las parcelas y las especies en los dos sectores de la playa. Particularmente, dos especies mostraron dominancia diferencial entre ambos sectores y sus preferencias ambientales coinciden con las descritas en la autoecología de éstas. En el sector SW, con mayores tasas de erosión e inundación marina, domina *S. trilobata*,

trilobata, especie típica de dunas costeras y suelos carentes de estructura, donde la salinidad, temperaturas e insolación son altas (Stevens *et al.*, 2001; Dias & Monteiro, 2006) y por ello, se asociaron con suelos de menor pendiente y mayores aportes de gravillas y arenas. Por el contrario, en el sector NE domina *R. polystachys* sobre suelos mejor desarrollados, con condiciones semejantes a las de un bosque de tierra firme. Esta especie se ha registrado en los bordes de los bosques, senderos, bancos de ríos y en claros de los bosques (Thomas, 1992). En este caso se registró en sitios con mayor pendiente y se relacionó con los aportes de gravilla en la parte interna, probablemente provenientes de la isla, ya que en este sector la topografía tierra adentro es más abrupta.

Esta colonización diferencial en ambos sectores está relacionada con el crecimiento horizontal, por medio de ramets, de las plantas herbáceas que les permite colonizar vegetativamente ambientes en donde los recursos les provean mayor posibilidad de sobrevivencia (Harper, 1977) y les conceden una ventaja competitiva para colonizar sedimentos desnudos e hipersalinos (Bertness *et al.*, 1992; Karavas *et al.*, 2005). La temperatura, disponibilidad de agua dulce y nutrientes pueden alterar el número de meristemos en desarrollo, modificando la frecuencia de reiteración de estos ramets (Kuppers, 1989). La disponibilidad de agua dulce, y con ello la salinidad, y las características de los sedimentos, no sólo pueden mejorar significativamente el crecimiento de estas herbáceas (Karavas *et al.*, 2005), sino también determinar la colonización diferencial (Glenn *et al.*, 2006). En zonas con drenaje imperfecto y acumulación de agua dulce durante la estación lluviosa, predominan algunas especies de *Cyperaceae* (Medina *et al.*, 1989; Chepstow-Lusty *et al.*, 2003; Glenn *et al.*, 2006), como en este caso *R. polystachys* en el sector NE, con menos aporte de sedimentos sueltos y presencia de suelos inorgánicos mejor desarrollados. En zonas más salinas con mayor influencia de inundaciones, se registran diversas especies de *Asteraceae* (Bertness *et al.*, 1992; Glenn *et al.*, 2006), de forma análoga al sector SE, dominado por *S. trilobata* y con mayor inundación. Estas marcadas preferencias ambientales relacionadas especialmente con la salinidad, la humedad y el aporte de sedimentos inorgánicos, combinado con su ciclo de vida más corto identifica a estos grupos (*Cyperaceae*, *Asteraceae*), como buenos indicadores no sólo de cambios en estas condiciones costeras (Chepstow-Lusty *et al.*, 2003) sino también, de los cambios en el nivel del mar presentes y pasados (González & Dupont, 2009).



Figura 10. Fotografías que ilustran la vegetación del terreno consolidado (a, b) y la morfología de la playa (c, d) de los dos sectores típicos de la playa. SW: a, c), NE: b, d).

De acuerdo con Kroon *et al.* (2008), se necesitarían mediciones mensuales durante al menos dos años para establecer la estacionalidad de una playa. Asimismo, las variaciones climáticas de alta importancia geomorfológica son de interanuales a centenales (Viles & Goudie, 2003). En este estudio, la variabilidad estacional se describió a partir de 15 meses de observaciones de perfiles de playa. Esto significa que las tendencias morfológicas estacionales observadas deben verificarse con series de mediciones más largas. Los resultados de la variabilidad estacional obtenidos con el seguimiento de los perfiles durante 15 meses indicaron una mayor cota de inundación y pérdida de arena en toda la playa en la época húmeda, con las mayores variaciones en el sector NE. Por su parte, los resultados del análisis de la planta de equilibrio para los meses con mayor cambio en el ángulo del FME del oleaje, indicaron mayor acreción en el NE en la época

húmeda y menor acreción (erosión) en la época seca. Esto puede explicarse por la combinación de los siguientes factores: 1) el FME utilizado para entender los estados estacionales de la planta de equilibrio corresponde a la media de 19 años, mientras que las observaciones de los perfiles cubren únicamente 15 meses, 2) la planta de equilibrio es un modelo analítico donde la suposición de una fuente infinita de sedimentos puede limitar la representación de la morfología de la playa (Raabe *et al.*, 2010) y 3) la planta de la playa y el perfil pueden estar acoplados de manera que en la época húmeda se pierde arena de la parte superior del perfil, que es depositada en la parte inferior, haciendo que en planta se note un aumento de la playa.

En cuanto a la variabilidad interanual, sólo pudo ser analizada con información hidrodinámica de la serie de oleaje reconstruida (no hay observaciones geomorfológicas que permitan resolver escalas interanuales). Se

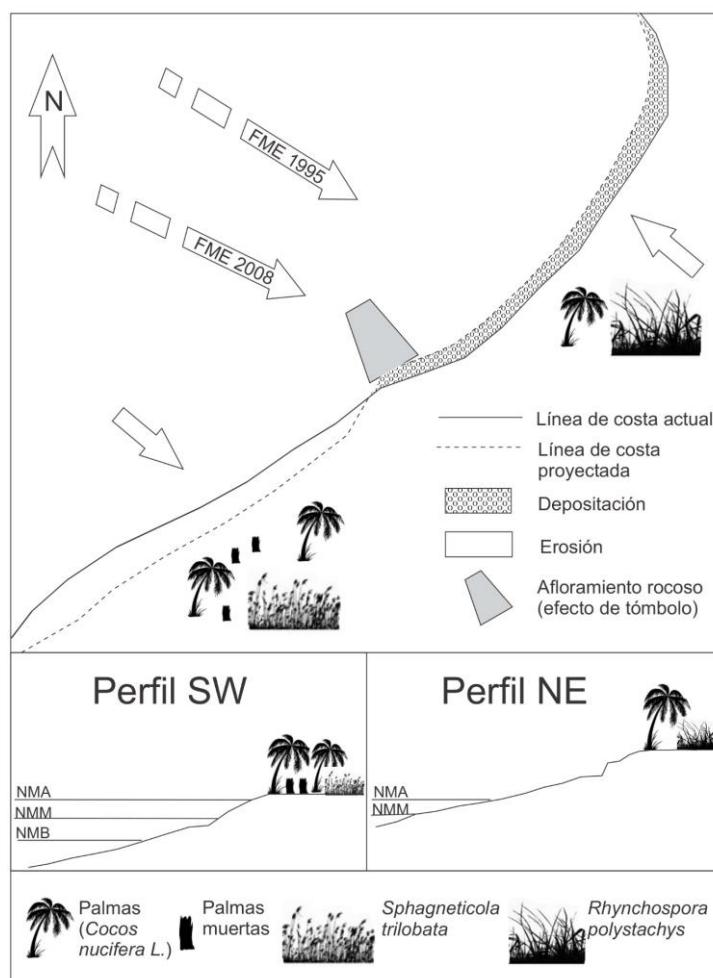


Figura 11. Esquema simplificado de la morfología actual con su vegetación característica y proyección futura de la playa de acuerdo con el cambio observado en el flujo medio de energía y los resultados del modelo morfodinámico.

encontró que el FME promedio anual fue mayor para los años El Niño, aunque no se notó un cambio significativo en la dirección. Con las mayores variaciones en la dirección del FME, se encontró que el sector NE es el que más responde, con erosión y acreción. Durante años El Niño se pueden producir eventos de tormentas que se reflejan en intensa erosión costera (Viles & Goudie, 2003). Efectivamente, durante El Niño 1997-1998, evento con mayor FME sobre playa Palmeras, se reportó una erosión acelerada en las costas continentales del Pacífico (Correa & González, 2000). Posiblemente este fue un evento intenso en la playa pero no existen registros de lo que ocurrió.

Respecto al largo plazo, existen pocos datos que permitan entender las tendencias generales en playa Palmeras. El balance neto de sedimentos en todos los perfiles medidos durante 15 meses indica que en el período de medición la tendencia neta de la playa es a la erosión, y que ésta es mayor hacia el SW, mientras que hay acreción neta en el extremo NE. Esto puede

indicar una tendencia de la playa a la basculación, cambiando el ángulo de la línea de costa, tal como se ha encontrado en otras áreas costeras (e.g., Dawson & Smithers, 2010; Klein *et al.*, 2010). En la Figura 11 se esquematiza este comportamiento que resulta en el contraste morfológico y de vegetación entre los dos extremos de la playa.

No debe olvidarse el papel que puede jugar el marco tectónico de la región en la configuración de la playa. En ambientes costeros de márgenes convergentes el transporte de sedimentos y la geomorfología pueden estar fuertemente influenciados por movimientos verticales donde movimientos cósicos pueden hacer cambiar la tendencia de una playa de depositacional a erosiva (Olson *et al.*, 2012). Este tipo de movimientos se ha documentado para la costa continental del Pacífico colombiano (Correa & González, 2000), donde un terremoto en 1991 generó subsidencia que agravó las tasas de erosión de las playas. Sin embargo, no se conocen registros específicos de este tipo de

eventos para la isla Gorgona, a pesar que según Bermúdez *et al.* (2008) probablemente han ocurrido.

AGRADECIMIENTOS

Al Fondo para la Acción Ambiental y la Niñez y a Conservación Internacional por la financiación del proyecto “Estudio Hidrodinámico y Geomorfológico de Playa Palmeras, PNN Gorgona” al cual pertenece esta investigación. A los compañeros del grupo de investigación Oceánicos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por su apoyo durante la realización de este proyecto, especialmente a Pilar Herrón, Alejandro Henao, Daniel Peláez, Juan Gabriel Correa y Luis Ospina. De igual manera, a Carlos Gutiérrez, Jesús Pérez e Iván Correa de la Universidad Eafit por el apoyo en la realización de la batimetría de detalle. A W. Thomas por su contribución en la identificación de *Rhynchospora polystachys*, a Ricardo Callejas por su identificación de la especie *Piper gorgonae-insulae*. A los funcionarios del PNN Isla Gorgona, especialmente a Luis Payán, Héctor González, Luis Jiménez y Rodrigo Ibarbo por su colaboración en la adquisición de datos de campo. A los evaluadores, quienes hicieron observaciones valiosas que enriquecieron el documento.

REFERENCIAS

- Adriani, G. & N. Walsh. 2007. Rocky coast geomorphology and erosional processes: a case study along the Murgia coastline South of Bari, Apulia-SE Italy. *Geomorphology*, 87: 224-238.
- Amoroch, D.F. & N.D. Reina. 2008. Intake passage time, digesta composition and digestibility in East Pacific green turtles (*Chelonia mydas agassizii*) at Gorgona National Park, Colombian Pacific. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 360: 117-124.
- Amoroch, D.F., F.A. Abreu-Drobois, P.H. Dutton & N.D. Reina. 2012. Multiple distant origins for green sea turtles aggregating off Gorgona Island in the Colombian Eastern Pacific. *PLoS ONE*, 7(2): e31486. doi:10.1371/journal.pone.0031486.
- Bermúdez, M.L., J. Martínez, A.M. Sarabia & H. Cifuentes. 2008. El sismo de Gorgona del 9 de septiembre de 2007. ML= 6.2. II Seminario de Ingeniería Sísmica y Geotecnia-Tunja, Octubre, 22-24.
- Bernabeu, A.M., R. Medina & C. Vidal. 2003. A morphological model of the beach profile integrating wave and tidal influences. *Mar. Geol.*, 197: 95-116.
- Bertness, M.D., L. Gough & S.W. Shumway. 1992. Salt tolerances and the distribution of fugitive salt marsh plants. *Ecology*, 73: 1842-1851.
- Blanco, J. 2009. The hydroclimatology of Gorgona Island: seasonal and Enso-related patterns. *Actual Biol.*, 31: 111-121.
- Calhoun, R., C. Fletcherb & J. Harneyb. 2002. A budget of marine and terrigenous sediments, Hanalei Bay, Kauai, Hawaiian Islands. *Sediment Geol.*, 150: 61-87.
- Camacho-Mosquera, L., D. Amoroch, L.M. Mejía-Ladino, J.D. Palacio-Mejía & F. Rondón-González. 2008. Caracterización genética de la colonia reproductiva de la tortuga marina golfinia-*Lepidochelys olivacea*- en el Parque Nacional Natural Gorgona (Pacífico colombiano) a partir de secuencias de ADN mitocondrial. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 37: 79-94.
- Carr, M.K.V. 2011. The water relations and irrigation requirements of coconut (*Cocos nucifera*): a review. *Expl. Agric.*, 47: 27-51.
- Chepstow-Lusty, A., M.R. Frogley, B.S. Bauer, M.B. Bush & A.T. Herrera. 2003. A Late Holocene record of arid events from the Cuzco region, Peru. *J. Quaternary Sci.*, 18: 491-502.
- Chinchilla, C.M. 1997. Epidemiología y manejo integrado del anillo rojo en palma aceitera. *Agron. Costarric.*, 21: 121-126.
- Correa, I.D. & J.L. González. 2000. Coastal erosion and village recolacation: a Colombian case study. *Ocean Coast. Manage.*, 43: 51-64.
- Dawson, J.L. & S.G. Smithers. 2010. Shoreline and beach volume change between 1967 and 2007 at Raine Island, Great Barrier Reef, Australia. *Global Planet Change*, 72: 141-154.
- Dehouck, A., H. Dupuis & N. Sénéchal, 2009. Pocket beach hydrodynamics: the example of four macrotidal beaches Brittany, France. *Mar. Geol.*, 266: 1-17.
- Dias, M. & M. Monteiro. 2006. A familia Asteracea en a planicie litorânea de Picinguaba, Ubatuba, São Paulo. *Hoehnea*, 33: 71-72.
- Doyle, W., K. Krauss, W. Conner & A. From. 2010. Predicting the retreat and migration of tidal forests along the northern Gulf of Mexico under sea-level rise. *Forest Ecol. Manage.*, 259: 770-777.
- Durán, R. & M. Méndez. (eds.). 2010. Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA, 496 pp.
- Ghazanfar, S.A. 1999. Coastal vegetation of Oman. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 49(Suppl. A): 21-27.
- Giraldo, A., E. Rodríguez-Rubio & F. Zapata. 2008. Condiciones oceanográficas en Isla Gorgona, Pacífico oriental tropical de Colombia. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 36: 121-128.
- Glenn, E.P., P.L. Nagler, R.C. Brusca, O. Hinojosa-Huerta. 2006. Coastal wetlands of the northern Gulf of

- California: inventory and conservation status. *Aquat Conserv.*, 16: 5-28.
- González, C. & L.M. Dupont. 2009. Tropical salt marsh succession as sea-level indicator during Heinrich events. *Quaternary Sci. Rev.*, 28: 939-946.
- Gonzalez, M., R. Medina. 2001. On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches. *Coast. Eng.*, 43: 209-225.
- González, M., R. Medina, J. González-Ondina, A. Osorio, F.J. Mendez & E. García. 2007. An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. *Comput. Geosci.*, 916-931.
- Guza, R. & D. Inman. 1975. Edge waves and beach cusps. *J. Geophys. Res.*, 80: 2997-3012.
- Harper, J.L. 1977. Population biology of plants. Academic Press, London, 892 pp.
- Hsu, J.R.C. & C. Evans. 1989. Parabolic bay shapes and applications. *ICE Proceedings*, 87: 557-570.
- Juggins, S. 2003-2006. C2 data analysis. Version 1.4.3 New Castle University, U.K.
- Karavas, N., K. Georghiou, M. Arianoutou & D. Dimopoulos. 2005. Vegetation and sand characteristics influencing nesting activity of *Caretta caretta* on Sekania beach. *Biol. Conserv.*, 121: 177-188.
- Kench, P., R. Brander, K. Parnell & R. McLean. 2006. Wave energy gradients across a Maldivian atoll: Implications for island geomorphology. *Geomorphology*, 81: 1-17.
- Kessler, W. 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: a review. *Prog. Oceanogr.*, 69: 181-217.
- Klein, A.H.F., Ó. Ferreira, J.M.A. Dias, M.G. Tessler, L.F. Silveira, L. Benedet, J.T. De Menezes & J.G.N. De Abreu. 2010. Morphodynamics of structurally controlled headland-bay beaches in southeastern Brazil: a review. *Coast. Eng.*, 57: 98-111.
- Komar, P.D. 1998. Beach processes and sedimentation. Prentice Hall, New Jersey, 544 pp.
- Kroon, A., M. Larson, I. Möller, H. Yokoki, G. Rozynski, J. Cox & P. Larroude. 2008. Statistical analysis of coastal morphological data sets over seasonal to decadal time scales. *Coast. Eng.*, 55: 581-600.
- Kuppers, M. 1989. Ecological significance of above ground architectural patterns in woody plants: a question of cost-benefit relationship. *Tree*, 4: 375-379.
- Lara, R.J. & M.C.L. Cohen. 2006. Sediment porewater salinity, inundation frequency and mangrove vegetation height in Bragança, North Brazil: an ecohydrology-based empirical model. *Wetl. Ecol. Manage.*, 14: 349-358.
- Lausman, R., A.H.F. Klein & M.J.F. Stive. 2010. Uncertainty in the application of the parabolic bay shape equation: Part 2. *Coast. Eng.*, 57: 142-151.
- Llanes, P., R. Herrera, M. Gómez, A. Muñoz, J. Acosta, E. Uchupi & D. Smith. 2009. Geological evolution of the volcanic island La Gomera, Canary Islands, from analysis of its geomorphology. *Mar. Geol.*, 264: 123-139.
- Masselink, G. & A. Short. 1993. Effect of tide range on beach morphodynamic and morphology: a conceptual beach model. *J. Coast. Res.*, 9: 785-800.
- Mederos, J. 2005. Restauración de dunas costeras al norte de "Cayo Fragoso" Villa Clara. Cuba. I Simposio Internacional de Restauración Ecológica, ISBN: 959-250-156-4.
- Medina, E., W.J. Cram, H.S.J. Lee, U. Popp, J.A.C. Smith & M. Diaz. 1989. Ecophysiology of xerophytic and halophytic vegetation of a coastal alluvial plain in northern Venezuela. I. Site description and plant communities. *New Phytol.*, 111: 233-243.
- Ministerio del Medio Ambiente. 1998. El sistema de parques nacionales naturales de Colombia. Editorial Nomos, Bogotá, 497 pp.
- Naylor, L.A., W.J. Stephenson & A.S. Trenhaile. 2011. Rock coast geomorphology: recent advances and future research directions. *Geomorphology*, 114: 3-11.
- Olson, D., D.M. Kennedy, I. Dawe & M. Calder. 2012. Decadal-scale gravel beach evolution on a tectonically-uplifting coast: Wellington, New Zealand. *Earth Surfaces Processes Landforms*, 37(11): 1133-1141.
- Osorio, A.F., D.S. Peláez-Zapata, J. Guerrero-Gallego, O. Álvarez-Silva, J.D. Osorio-Cano, F.M. Toro & A. Giraldo. 2014. Hidrodinámica aplicada a la gestión y la conservación de ecosistemas marinos y costeros: Isla Gorgona, Océano Pacífico Colombiano. *Rev. Biol. Trop.*, 62: 133-147.
- Özkan-Haller, H.T., C. Vidal, I.J. Losada, R. Medina & M.A. Losada. 2001. Standing edge waves on a pocket beach. *J. Geophys. Res.*, 106(C8): 16981-16996.
- Perillo, G., E. Wolanski, D.R. Cahoon & M.M. Brinson. 2009. Coastal wetlands an integrated ecosystem approaches. Elsevier, Amsterdam, 974 pp.
- Pethick, J.S. & S. Crooks. 2000. Development of a coastal vulnerability index: a geomorphological perspective. *Environ. Conserv.*, 27: 359-367.
- Poveda, G. 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 28: 201-222.
- Raabe, A.L.A., A.H. Klein, M. González & R. Medina. 2010. MEPBAY and SMC: software tools to support different operational levels of headland-bay beach in coastal engineering projects. *Coast. Eng.*, 57: 213-226.

- Reguero, B.G., M. Menéndez, F.J. Méndez, R. Mínguez & I.J. Losada. 2012. A global ocean wave (GOW) calibrated alysis from 1948 onwards. *Coast. Eng.*, 65: 38-55.
- Restrepo, J.C., L. Otero & S.A. López. 2009. Clima de oleaje en el Pacífico sur de Colombia, delta del río Mira: comparaciones estadísticas y aplicación a procesos costeros. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 33(128): 357-375.
- Rodríguez-Rubio, E. & W. Schneider. 2006. On the seasonal circulation within the Panama Bight derived from satellite observations of wind, altimetry and sea surface temperature. *Geophys. Res. Lett.*, 30 pp.
- Sáenz, A. 2005. Aspectos generales e importancia del agente causal de anillo rojo. *Palmas*, 26: 59-70.
- Received: 27 September 2013; Accepted: 26 June 2014
- Stanturf, J.A., S.L. Goodrick & K.W. Outcalt. 2007. Disturbance and coastal forests: a strategic approach to forest management in hurricane impact zones. *Forest Ecol. Manag.*, 250: 119-135.
- Stevens, W., C. Ulloa, A. Poo & O. Montiel. 2001. Flora de Nicaragua. Introducción a las angios-permas y a las gimnospermas. Tomo II. Missouri Botanical Garden, Saint Louis-Missouri, 372 pp.
- Scientific and Technical Documentation (SWAN Team). 2009. SWAN Cycle III version 41.01. Delft. University of Technology, Delft.
- Ter Braak, C.J.F. & P. Smilauer. 1997-2003. Canoco for windows version 4.52. Plant research International Wageningen CPRO-DLO, The Netherlands.
- Thomas, W. 1992. A synopsis of *Rhynchospora* (Cyperaceae) in Mesoamerica. *Brittonia*, 44: 14-44.
- Viles, H.A. & A.S. Goudie. 2003. Interannual, decadal and multidecadal scale climatic variability and geomorphology. *Earth-Sci. Rev.*, 61: 105-131.