

## **Caracterización de la geomorfología costera y sus coberturas vegetales asociadas, a través de sensores remotos, en la costa de Tumaco, Nariño**

### ***Characterization of the coastal geomorphology and associated vegetation cover through remote sensing, on the coast of Tumaco, Nariño.***

Fecha de recepción: 2014-03-03 / Fecha de aceptación: 2014-09-19

**Christian Bermúdez Rivas<sup>1</sup>, Merly Constanza Álvarez Machuca<sup>2</sup>, Diana Carolina Niño Pinzón<sup>3</sup>**

**Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP)**, Capitanía de Puerto de Tumaco, Vía al Morro, Tumaco, Colombia. Tel: +57 (2) 727 26 37. Correo electrónico: cbermudez@dimar.mil.co<sup>1</sup>, malvarez@dimar.mil.co<sup>2</sup>, dnino@dimar.mil.co<sup>3</sup>

**Bermúdez C, Álvarez MC, Niño DC.** Caracterización de la geomorfología costera y sus coberturas vegetales asociadas, a través de sensores remotos, en la costa de Tumaco, Nariño. Bol. Cient. CIOH 2014;32:27-46.

#### **RESUMEN**

La presente investigación comprendida entre Salahondita y Candelillas de la Mar, en el municipio de Tumaco (Nariño), describe las características geomorfológicas y de cobertura vegetal a lo largo de 823.4 km de la costa Pacífica sur de Colombia utilizando teledetección y productos derivados de datos *Light Detection and Ranging*. Geomorfológicamente, predominan las planicies costeras con un 87.8 % del área total estudiada (45960.53 ha), que a su vez se constituyen por plataformas intermareales no vegetadas, planos de inundación y planos y llanuras con vegetación halófitas; sobre la primera geoforma predomina el bosque denso alto inundable y sobre las dos últimas predomina el manglar. La cobertura vegetal que más abunda en el área de estudio es el manglar con un 61.14 %, gracias a condiciones climático-ambientales y meteomarinas que propician su crecimiento. Sin embargo, las colinas y lomas (9.25 %) también se hacen presentes con los bosques densos altos de tierra firme y los bosques fragmentados con vegetación secundaria, que finalmente no son más que una modificación de los primeros a manos del hombre. La idea de relacionar las características geomorfológicas con las coberturas vegetales surge de la necesidad de contar con herramientas geográficas para el ordenamiento y manejo de la costa Pacífica.

**PALABRAS CLAVES:** cobertura vegetal, geomorfología, LiDAR, teledetección, productos derivados, imagen multiespectral, zona costera.

#### **ABSTRACT**

This research was made between Candelillas de la Mar and Salahondita in the municipality of Tumaco (Nariño) and describes the geomorphology and vegetation cover along 823.4 km of the southern Pacific coast of Colombia using remote sensing (LiDAR and satellite imagery) and products derived from LiDAR data. Geomorphologically, coastal plains predominate with 87.8% of the total study area (45960.53 ha), which in turn it constitutes: non vegetated intertidal platforms, floodplain, and flat plains with halophyte vegetation; on the first geophorm predominates the dense high flooded forest and on the two last ones predominates the mangrove forest. The most abundant vegetation in the study area is the mangrove with 61.14% due to climatic-environmental and sea conditions that promote their growth. However, the hills and ridges (9.25%) are also present in the dense forests of high land and fragmented secondary growth forests, which are ultimately nothing more than a modification of the first at the hands of man. The idea of linking geomorphology with the vegetation cover surges from the need of obtain geographic tools for the planning and management of the Pacific Coast.

**KEYWORDS:** Vegetation cover, geomorphology, LiDAR, remote sensing, derived products, multiespectral image, coastal zone.

## INTRODUCCIÓN

La zona costera constituye un hábitat atractivo por brindar amplias oportunidades económicas y debido a esto soporta entre el 30 y el 50 % de la población mundial humana [1], generando un patrón de mayor densidad poblacional hacia las zonas costeras. Esta alta densidad de población en las costas genera dos problemáticas: (i) la población se pone en riesgo debido a la dinámica marino-costera y (ii) se genera un desgaste de los recursos naturales trayendo como consecuencia problemas ambientales.

En el territorio colombiano se evidencia una situación particular, caracterizada por una alta concentración de población hacia el interior y una disminución de ésta hacia la periferia. En esta periferia se encuentran las zonas costeras, que en Colombia presentan un patrón poblacional contrario a la tendencia mundial, destacándose mayores índices de poblamiento en las zonas interiores (>75 %) que en las zonas costeras (<25 %), lo cual ha contribuido a que en estas últimas se presente un marcado abandono por parte del Estado, trayendo como consecuencias conflictos sociales y medio-ambientales en el ámbito nacional, y conflictos fronterizos en el ámbito internacional [2].

Las costas colombianas ostentan una alta diversidad de recursos naturales, siendo aprovechadas en actividades como la pesca, la explotación minera, la producción de alimentos nativos y cultivados, entre otras. Dichas actividades han llevado a la colonización de nuevos territorios para suplir la demanda constante de dichos recursos [3]. En este proceso de colonización se han explotado tierras de manera indiscriminada, en las cuales, pese a no estar densamente pobladas, se han generado conflictos de uso de suelo, que requieren la intervención por parte de las entidades administrativas regionales o estatales para su recuperación. Donde no existe control administrativo, muchas veces estas tierras se deterioran al punto de generar pérdidas ambientales [2].

La caracterización, tanto de la geomorfología como de las coberturas vegetales y los ecosistemas, es una parte básica e importante en el reconocimiento, planificación y administración del territorio, debido a que proporciona información sobre cómo están, dónde están y en qué cantidad se encuentran estos elementos. Reconocer y espacializar estos elementos en grandes extensiones de terreno es complejo, debido al tiempo que en

campo demandaría su evaluación y el costo que generarían estos estudios. Tradicionalmente la geomorfología y las coberturas vegetales se han cartografiado con técnicas topográficas y el uso de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) que permite obtener datos punto a punto; estas técnicas limitan la aplicación de estos datos a escalas pequeñas y en ámbitos espaciales reducidos. Como alternativa se ha optado por el uso complementario de información que puede ser más actualizada continuamente, como son las tecnologías de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG) [4].

La tecnología de los SIG y teledetección son herramientas que facilitan el reconocimiento de las características del paisaje en corto tiempo, con mayor exactitud y han permitido mejorar el análisis y el almacenamiento de información [5]. Estas herramientas han sufrido vertiginosos cambios en los últimos treinta años, tanto que ya no se concibe una planificación territorial sin datos basados en teledetección [6]. Por lo general, la información que los sensores remotos recolectan es radiación electromagnética que se refleja en los objetos; en el caso de la observación de la Tierra, la superficie de la misma y las características que en ella existen son el objeto de análisis y por ende, el emisor de los reflejos electromagnéticos. Todos estos reflejos son transformados en información digital, la cual permite análisis matemáticos y estadísticos tanto cualitativos como cuantitativos [6].

La tecnología LiDAR se ha utilizado para determinar la geomorfología y las características de las coberturas vegetales en estudios forestales [7]. Ejemplos de esto han sido la obtención de cartografía geomorfológica para detectar zonas inundables [8]; la modelación de la morfología fluvial y la vegetación asociada a ésta [9]; la estimación de características dasométricas [10]; el análisis de riesgo en procesos geomorfológicos destructivos, como caídas de roca y derrumbes [11]; la detección de alteraciones antropogénicas en la topografía y vegetación con una alta resolución [12], entre otras. En la zona costera se ha usado esta tecnología para diferentes objetivos, desde el mapeo del hábitat costero y estuarino [13], pasando por el análisis espacial de la geomorfología del litoral [4] y la detección de la geomorfología del suelo marino [14].

En la costa Caribe de Colombia se ha utilizado la tecnología LiDAR en el análisis de la geomorfología, para generar información básica para el control y la administración de los bienes

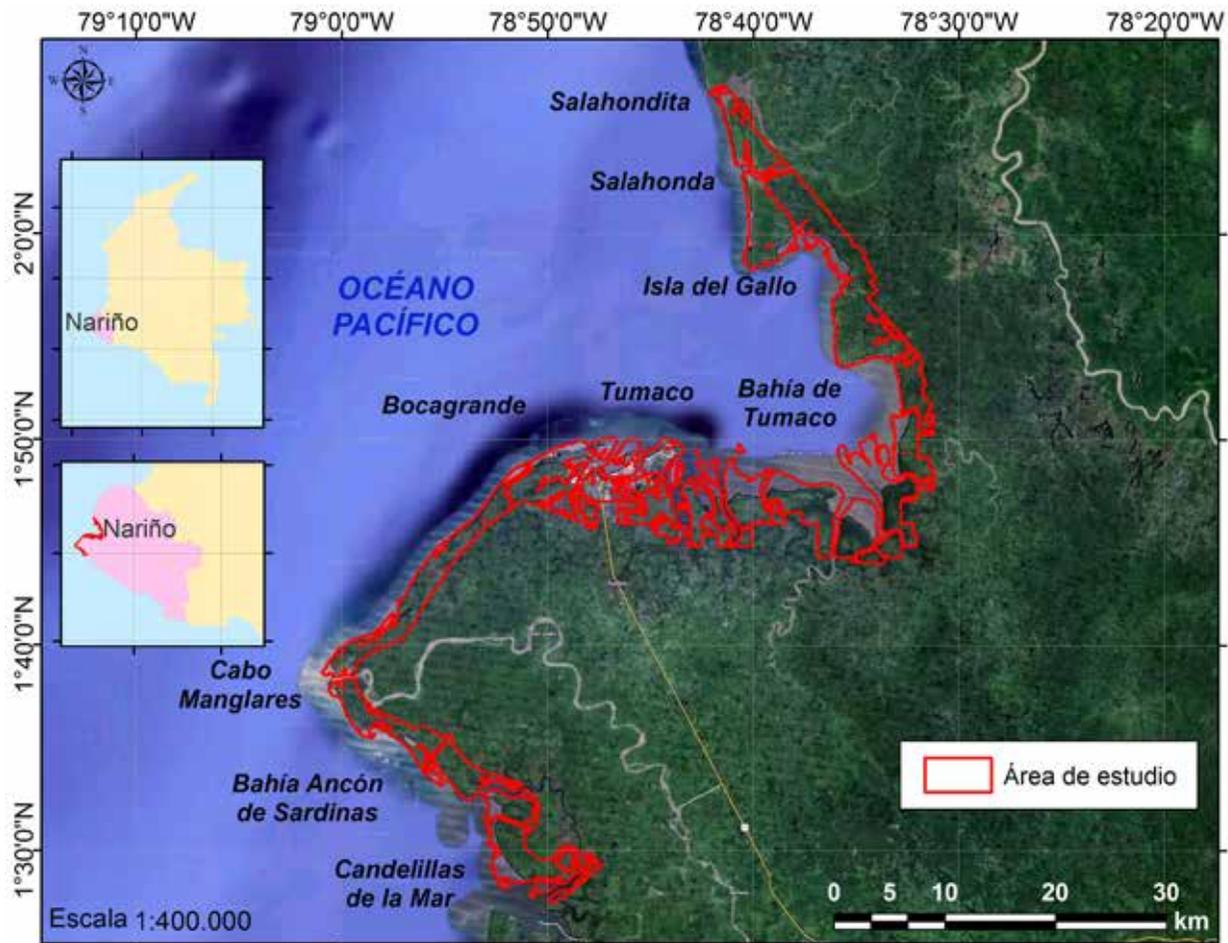
de uso público bajo la jurisdicción de la Dirección General Marítima (Dimar). En este estudio se lograron identificar seis geoformas, donde la más extensa fue la llanura costera con 704.41 ha [15].

La presente investigación tuvo como objetivo identificar, espacializar, describir y relacionar, la geomorfología y las coberturas vegetales de una porción de la costa Pacífica de Colombia, a través de la interpretación de ortofotos e imágenes de satélite, análisis de alturas de terreno proporcionado por modelos digitales de terreno (MDT) obtenidos de la información LiDAR y actividades específicas en campo; además, realizar el inventario de coberturas vegetales costeras y analizar el estado de éstas con modelos digitales de vegetación (MDV),

para obtener información de línea base para el manejo integrado y el ordenamiento de las zonas costeras de Tumaco, Nariño.

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el departamento de Nariño, en los municipios de Tumaco y Francisco Pizarro, entre los sectores de Salahondita, con las coordenadas  $78^{\circ}42'3.42''$  W y  $02^{\circ}06'52.125''$  N, hasta la bahía de Ancón de Sardinias en el río Mataje, cerca a Candelillas de la Mar, con las coordenadas  $78^{\circ}49'47.044''$  W y  $1^{\circ}27'27.108''$  N; con una extensión de línea de costa de 1245 km y un área de 157 km<sup>2</sup>. Allí desembocan los ríos Mira, Mataje, Tablón, Chagüí, Colorado, Curay, Llanage, Patía y Guandipa (Fig. 1).



**Figura 1.** Mapa de la zona de estudio.

## METODOLOGÍA

### Datos

El conjunto de datos utilizados para los análisis de esta investigación estuvo conformado por ortofotografías y datos LiDAR, tomados en 2006 para la zona comprendida desde Bocagrande hasta Salahondita, y en 2012 para la zona comprendida desde Bocagrande hasta Candelillas de la Mar en la costa Pacífica (Fig. 1).

Las ortofotografías se capturaron con una resolución espacial de 25 cm por pixel, brindando mayor detalle de la información, cuya toma se hizo con una cámara métrica digital paralelamente a la captura de datos LiDAR. Estos últimos fueron capturados con un sistema ALS40 aerotransportado en un avión Cessna 402B, cuyos parámetros de calibración fueron: FOV de escaneo de 30°; altura de vuelo de 1219 m; velocidad del avión de 125 nudos; frecuencia de escaneo de 29 Hz; longitud de onda del láser de 1084 nm [16], y cumplen con las especificaciones técnicas para la generación de la base cartográfica digital de Dimar [17], que plantea una exactitud vertical máxima de ±15 cm y una exactitud horizontal máxima de ±0.5 m. El espaciamiento promedio de la nube de puntos es de 0.98 m, valor determinado a través de un muestreo y está clasificada en las categorías: suelo, construcción, vegetación y agua, entre otras.

Los datos LiDAR presentan el estándar de la Sociedad Americana para Fotogrametría y

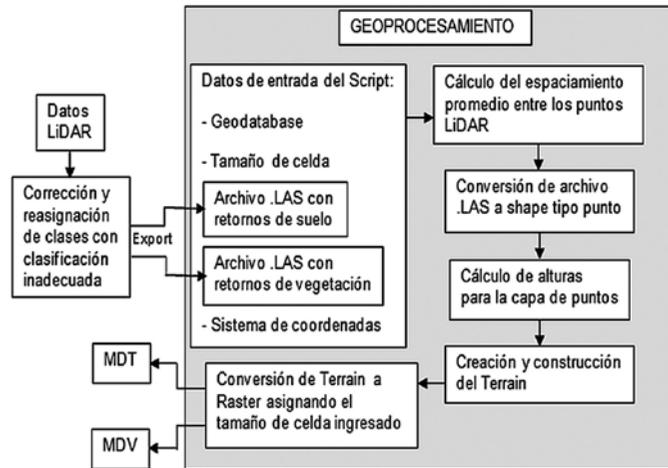
Sensores Remotos (Asprs, por sus siglas en inglés) en la versión 1.0 del 9 de mayo de 2003, que normaliza la estructura, forma y el contenido de los archivos '.LAS' para facilitar el intercambio, traslado y almacenamiento de estos datos [18].

Se usaron además las escenas de octubre de 2013 del satélite LandSat 8 y de junio de 2003 de LandSat 7, con resolución espacial de 30 m. Específicamente se generó una combinación a color con las bandas 5 (Infrarrojo cercano), 6 (Infrarrojo medio) y 4 (Rojo), que corresponden a 4, 5 y 3 para LandSat 7.

### Productos derivados

El primer paso para generar los productos derivados fue realizar un diagnóstico, revisión y corrección de la nube de puntos que componen los datos LiDAR, donde se reasignaron los puntos que no correspondían a la clase inicialmente establecida por la clasificación automática en el postproceso. El segundo paso fue generar un MDT con los puntos de retorno del suelo (Ground-Return 2), que describe las alturas del terreno de la zona de estudio; y el tercer paso fue crear un MDV con los retornos de vegetación alta, media y baja (Vegetation High, Medium and Low-Retornos 3, 4 y 5), que describe la altura del dosel de las coberturas vegetales. Ambos modelos se crearon con una resolución de 1 m/pixel.

Además de lo anterior, para la generación de los MDV y MDT se implementó un geoprocésamiento en Python para optimizar la creación de estos modelos (Fig. 2).



**Figura 2.** Modelo conceptual del proceso de los datos LiDAR y la creación de los modelos de terreno y de vegetación.

Partiendo del MDT se generaron modelos de pendiente (Slope), curvatura (Curvature), sombreado (Hillshade) y curvas de nivel (Contour), para apoyar la clasificación de las unidades geomorfológicas. Con el MDV se generó únicamente el modelo de sombreado (Hillshade), para ayudar en la clasificación de la cobertura vegetal.

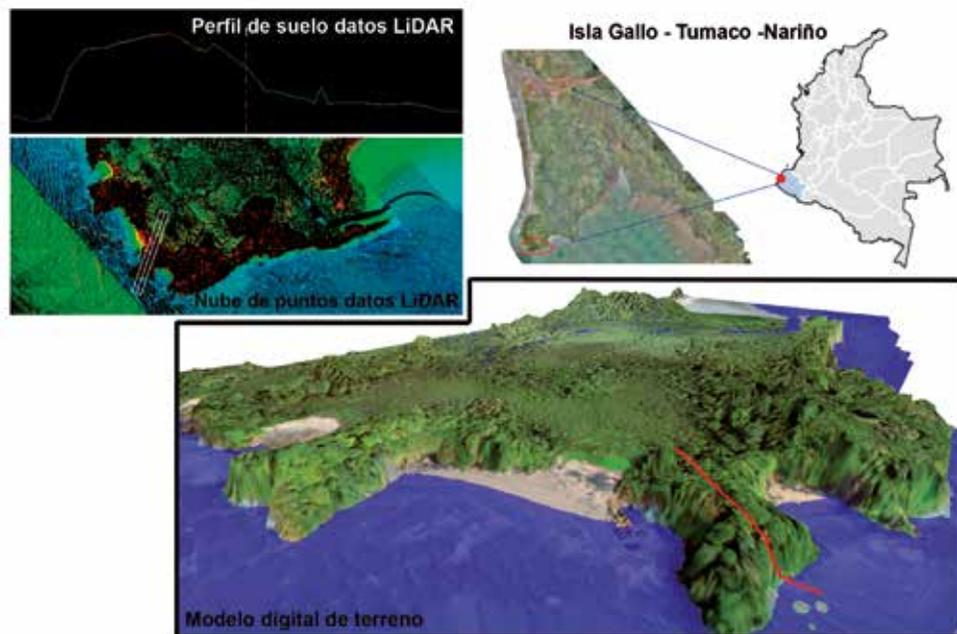
Otros productos derivados fueron las composiciones a color RGB 453 y RGB 564 de las bandas de LandSat 7 y 8, respectivamente, que permitieron la identificación y digitalización del límite de costa de las unidades geomorfológicas y la identificación de coberturas vegetales; esto gracias a la notable diferenciación entre respuestas espectrales del suelo y el agua.

### Creación de la cartografía e interpretación de imágenes

El proceso de interpretación de imágenes abarca el reconocimiento de características tales como: forma, tono, color, estructura, tamaño, textura, sombreado, patrones y asociaciones; esto acompañado del análisis espacial que se aplica visualmente sobre los modelos digitales y las combinaciones RGB de las imágenes satelitales, permite la identificación y trazado de

las unidades geomorfológicas y las coberturas vegetales.

Para identificar las unidades geomorfológicas costeras fue necesario diferenciar las zonas que tienen influencia directa de la marea. Para esto se construyó un modelo de la línea de más alta marea para toda el área de estudio, basado en el cálculo de la inundación mareal a partir del modelo hidrodinámico H2D, el cual hace parte de otro estudio (Dimar 2013, Vásquez, Sánchez e Iriarte 2013, en preparación). Con los resultados de las cotas de inundación de este modelo y los MDT se generaron los contornos para estas cotas y se trazó la línea de más alta marea. Para la delimitación de la zona intermareal, se utilizó esta línea de más alta marea junto con la línea de más baja marea, la cual se trazó a partir de las composiciones RGB 564 (L8) y 453 (L7) de las imágenes satelitales, en las cuales se pudo observar los bajos de arena y las zonas de bajamar. Con lo anterior fue posible diferenciar las áreas inundables de las no inundables. Luego se separaron los terrenos planos de los que presentaron un marcado relieve, utilizando modelos de visualización 3D y curvas de nivel del modelo de terreno, para identificar estas estructuras de relieve y diferenciar rasgos geomorfológicos. Además se diferenciaron las zonas vegetadas de las no vegetadas, con ayuda de la capa de coberturas vegetales.



**Figura 3.** Modelo digital en 3D, perfil de suelo y datos LiDAR de los bosques de manglar de la Isla del Gallo en la bahía de Tumaco, Nariño.

La capa de coberturas vegetales se obtuvo a partir del análisis directo de las ortofotografías, donde se examinaron los elementos que pertenecen a los diferentes tipos de vegetación y se establecieron los patrones de textura, color y forma de las copas de los árboles y arbustos. Una vez establecidas estas características y apoyados en las composiciones RGB de las imágenes satelitales, se identificó cada cobertura en diferentes áreas. Para analizar los límites de las diferentes coberturas por medio de las alturas de dosel, se construyeron modelos de visualización 3D a partir de los datos LiDAR, con el software GlobalMapper® y perfiles de terreno en MARS®, esto facilita el proceso de identificación, delimitación y clasificación.

Las coberturas vegetales determinadas fueron nombradas a partir de la leyenda nacional de coberturas de la Tierra [19], la cual es una adaptación de la metodología *Corine Land Cover* para Colombia. Como esta metodología está enfocada a una escala de 1:100.000, algunas de las coberturas identificadas en este estudio solo son posibles de detectar a escalas más grandes (>1:2000), por esta razón se crearon nuevas coberturas que no aparecen dentro de la leyenda nacional.

### **Fase de campo**

A partir de la cartografía que se obtuvo de los productos derivados se llevó a cabo un trabajo de verificación en campo de las coberturas vegetales y la geomorfología, esto debido a que la interpretación requiere comprobación y actualización, a través del reconocimiento directo sobre el terreno [6].

Inicialmente se pretendía visitar la totalidad del área de estudio, pero no fue posible en algunos lugares debido a factores como:

terrenos con pendientes altas y de difícil acceso, costas con oleajes agitados que no permitían los desembarcos y áreas con problemas de orden público. Este último fue el factor que más limitó el alcance de las salidas de campo, sobre todo en la zona entre Bocagrande y Candelillas de la Mar, por la presencia de bandas criminales que representan gran riesgo.

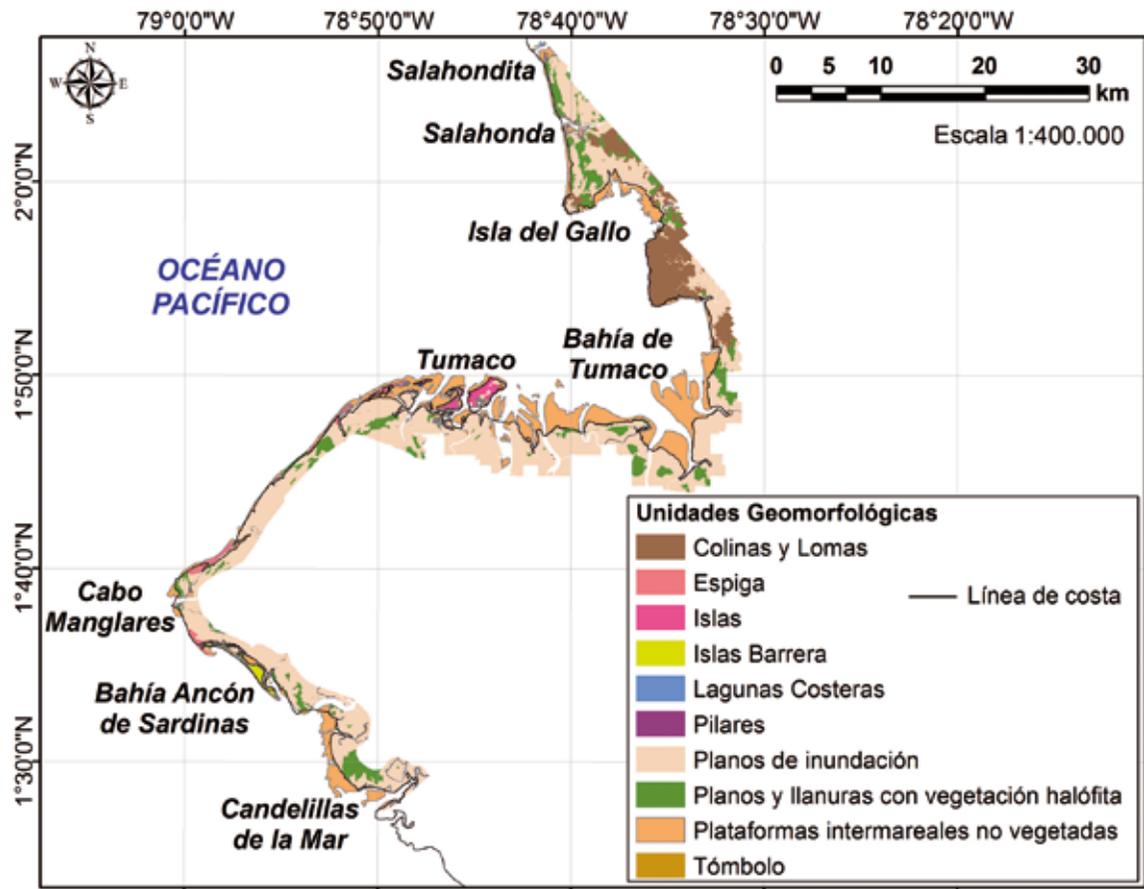
Para los sitios de muestreo se efectuaron visitas a cada tipo de cobertura identificada, realizando un análisis visual de la zona costera y tomando muestras de vegetación de las especies dominantes para su reconocimiento en el laboratorio; además se tomaron fotografías panorámicas de las coberturas para que sirvieran de apoyo en la verificación o corrección de éstas.

En cuanto a las unidades geomorfológicas, se realizaron visitas en toda el área de estudio para reconocer y corroborar la geomorfología identificada durante el análisis de los productos derivados. Donde se encontraron inconsistencias se tomaron fotografías georreferenciadas para hacer las correcciones en laboratorio.

## **RESULTADOS**

### **Unidades geomorfológicas**

En el área de estudio se identificaron nueve (09) unidades geomorfológicas que caracterizan las costas bajas: espigas, islas, isla barrera, lagunas costeras, planos de inundación, planos y llanuras con vegetación halófila, plataformas intermareales no vegetadas, playas y tómbolos (Fig. 4). De estas unidades la que ocupa una mayor extensión son los planos de inundación, con 23432.58 ha, y las que ocupan una menor extensión fueron los tómbolos, con 0.13 ha (Tabla I).



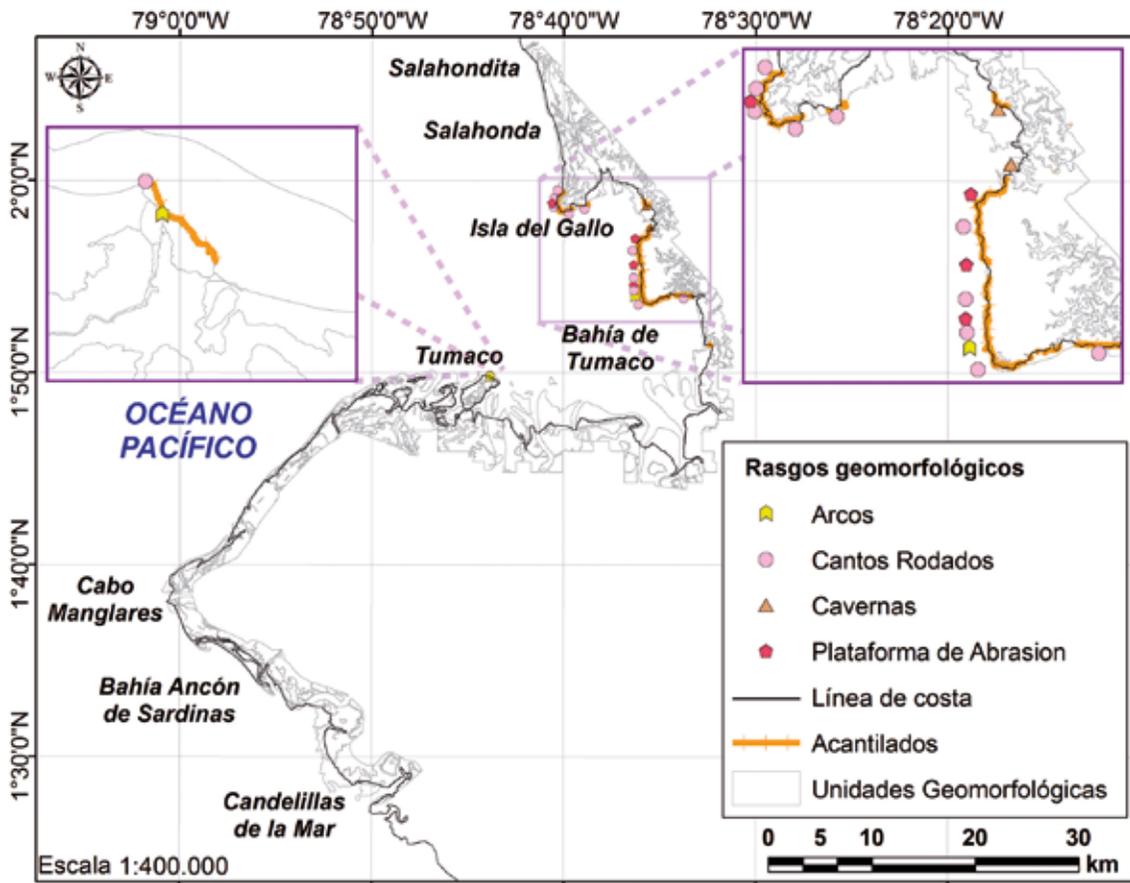
**Figura 4.** Mapa de las unidades geomorfológicas de la costa de Tumaco, Nariño.

**Tabla I.** Extensión de las unidades geomorfológicas identificadas en la zona de estudio.

| Unidades geomorfológicas                  | Ha              | %             |
|---|-----------------|---------------|
| Planos de inundación                      | 23432.58        | 50.98         |
| Plataformas intermareales no vegetadas    | 11261.46        | 24.50         |
| Colinas y lomas                           | 4252.82         | 9.25          |
| Planos y llanuras con vegetación halófila | 5669.16         | 12.33         |
| Islas                                     | 478.16          | 1.04          |
| Espigas                                   | 604.24          | 1.31          |
| Lagunas costeras                          | 15.08           | 0.03          |
| Pilares                                   | 0.99            | 0.0019        |
| Islas barrera                             | 245.91          | 0.54          |
| Tómbolo                                   | 0.13            | 0.00028       |
| <b>Total</b>                              | <b>45960.53</b> | <b>100.00</b> |

En cuanto a las unidades que caracterizan las costas altas se encontraron lomas y colinas que representan 4252,82 ha (Tabla I). Estas

unidades presentan rasgos geomorfológicos como acantilados, arcos, cavernas, plataformas de abrasión, cantos rodados y pilares (Fig. 5).



**Figura 5.** Mapa de rasgos geomorfológicos de la costa de Tumaco, Nariño.

- **Planos de inundación.** Es la unidad geomorfológica más común en toda el área. Son planicies de origen fluvio marino que están a la misma altura o por debajo del nivel del mar, se inundan completamente cuando la marea sube lo cual hace que este suelo sea fangoso, compuesto de sedimentos finos y materia orgánica, sobre esta unidad generalmente crece manglar.
- **Planos y llanuras con vegetación halófila.** Al igual que los planos de inundación, son planicies de origen fluvio marino que se encuentran por encima del nivel de marea alta

y tienen un alto nivel freático, pero son menos fangosos que los planos de inundación, debido a que se inundan solo cuando hay oleajes extremos o por desborde de los ríos o lagunas costeras; se componen de sedimentos finos y abundante materia orgánica. Sobre esta unidad crece vegetación halófila, que soporta condiciones salobres pero no soporta una inundación diaria total de agua de mar como lo hace el manglar.

- **Plataformas intermareales no vegetadas.** Estos depósitos de sedimentos no consolidados y no vegetados que quedan descubiertos

cuando la marea baja totalmente y cubiertos cuando ésta sube, constituyen los fondos someros y están ubicados principalmente a lo largo de la línea de costa, los acantilados y adyacentes a los planos de inundación con manglares, lo cual hace que contengan gran cantidad de materia orgánica.

- **Playas.** Se presentan en casi toda la línea de costa del área de estudio, excepto en las zonas adyacentes a los manglares y a los acantilados, donde reciben el nombre de plataformas intermareales no vegetadas. Son áreas con acumulación de sedimentos (lodos, arenas, gravas) no consolidados depositados por el oleaje. Esta unidad va desde la línea de más alta marea, que generalmente coincide con el inicio de la vegetación halófitas, hasta la zona donde llega la línea de más baja marea y hacen parte de las plataformas intermareales no vegetadas.
- **Espigas.** Son cuerpos arenosos alargados y en forma de gancho, elongados en dirección de la deriva litoral, caracterizados porque uno de sus extremos se encuentra fijo a una saliente o bajo firme, mientras el otro lado progresa en forma curva por procesos de deriva, refracción y difracción del oleaje. Contienen otras unidades en su interior como playas y lagunas costeras y pueden estar pobladas por vegetación permanente y no permanente. En total se identificaron cinco (05) espigas litorales hacia el sur de la costa nariñense.
- **Isla barrera.** Se encontró una (01) en este sector y es llamada Isla Verde, uno de sus extremos tiene forma de espiga. Es un cuerpo arenoso alargado paralelo a la línea de costa en dirección N-W; en ella crecen herbáceas de playa, manglar y otras especies halófitas y en su interior también presenta otras unidades como las playas. Limitada en su parte trasera por un estero que la separa de los pantanos de manglar por las playas en dirección al mar y lateralmente por las desembocaduras de los ríos y esteros. Esta acumulación de arena está por encima de los niveles de la marea promedio más alta [20].
- **Lagunas costeras.** Hacia el sector de la bocana Cabo Manglares se observa una laguna costera, la cual es una depresión ocupada parcialmente por agua y separada por una playa del mar. Cuando la marea alta promedio tiene su máximo alcance inunda esta depresión. También se encontró otra en la espiga del sector de Bocagrande. Hacia el mar está limitada por una playa con herbáceas y hacia el continente está limitada por zonas de manglar. Cuando la marea sube inunda el manglar y a su vez inunda la laguna.
- **Islas.** Hacia el sur de la bahía de Tumaco hay tres (03) islas llamadas La Viciosa, Tumaco y El Morro. Dentro de éstas se encontraron otras unidades como las playas que se caracterizan por presentar sedimentos de color gris oscuro, compuestos principalmente de minerales ferro-magnesianos y materia orgánica proveniente de los manglares. En la isla El Morro se encontraron una colina de aproximadamente 90 msnm y de laderas muy inclinadas. La isla de Tumaco está totalmente urbanizada.
- **Lomas y colinas.** En la bahía de Tumaco se observan lomas y colinas en los sectores de la bocana Colorado, de punta Laura a punta de Cruz Chola, ensenada de Tumaco, en punta Isla del Gallo y punta Cascajal. Las colinas presentan alturas de hasta 140 msnm en las zonas más altas (Fig. 4), son de laderas muy escarpadas de roca sedimentaria. Las lomas presentan alturas menores, son de laderas con pendientes suaves y formas redondeadas, con vegetación tipo bosque.

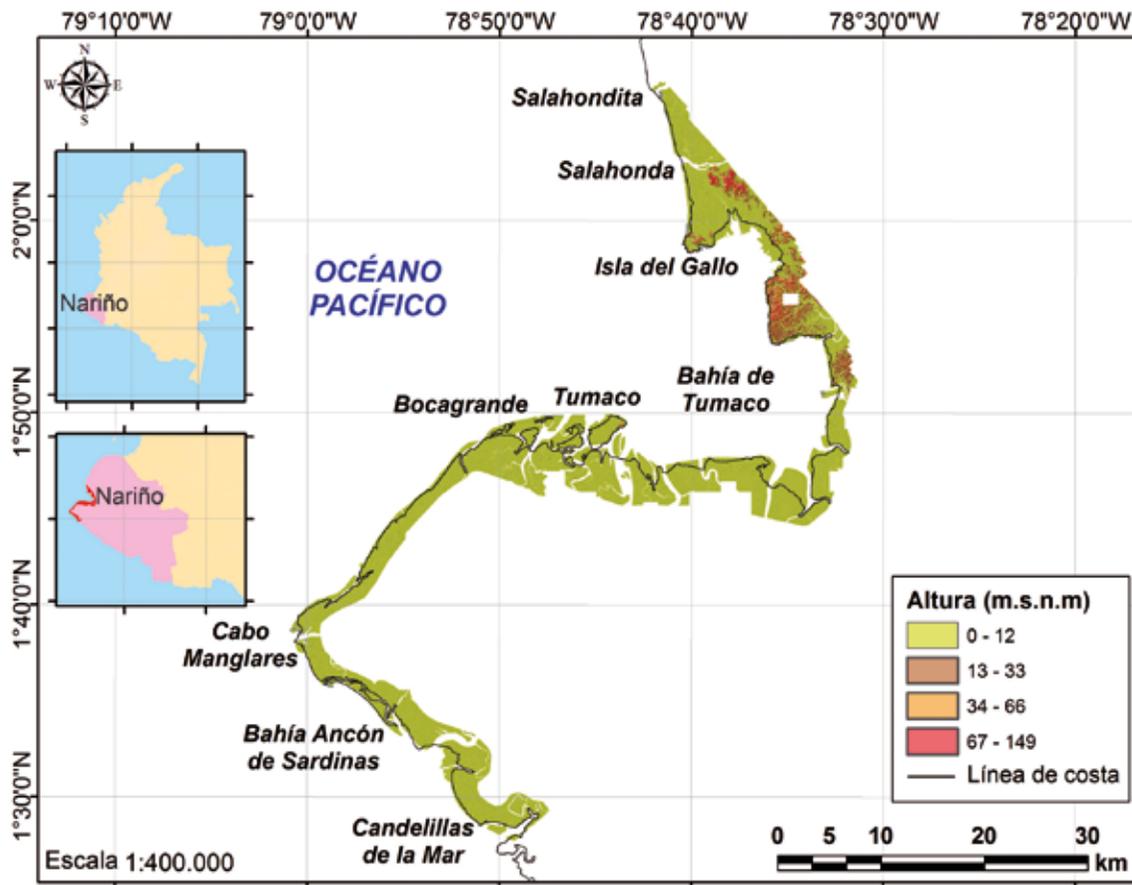


Figura 6. Modelo de elevación de terreno de la costa de Tumaco, Nariño.

### Rasgos geomorfológicos

- **Pilares.** Los pilares o islotes se encuentran generalmente cerca de la línea de costa, están sobre el nivel del mar, rodeados de agua, son rocosos, remanentes de colinas y evidencian erosión producida por el oleaje sobre fallas, diaclasas y zonas de debilidad de los acantilados. Estos rasgos se encontraron en los sectores de la bahía donde se encuentran las lomas y colinas hacia la parte norte; hacia el sur se observa El Quesillo, es un pilar remanente de la colina de la isla El Morro.
- **Cantos rodados (bloques caídos).** En la bahía de Tumaco se observaron como acumulaciones de escombros en la base de los acantilados de las colinas, producto de la desestabilización del escarpe por la acción del oleaje marino. Los tamaños de los bloques

varían entre 1 y 7 m. El diaclasamiento de las rocas facilita el desprendimiento de estos bloques dentro del proceso de socavamiento de la base de los acantilados.

- **Acantilados.** Rasgo geomorfológico apreciable desde punta Laura hasta punta de Cruz Chola, desde punta Isla del Gallo hasta punta Cascajal y en la isla El Morro, cerca al arco. Estos escarpes son producto de la erosión marina sobre las colinas que están expuestas a la acción del oleaje en la orilla del mar.
- **Cavernas.** Son cavidades que se observan en la base de los acantilados. Se forman por la acción del oleaje sobre la base rocosa de los acantilados, cuyas diaclasas, fallas o zonas de debilidad contribuyen al desarrollo rápido de las mismas. Son el primer proceso para

la formación de arcos y posteriormente la formación de pilares.

- **Arcos.** El proceso de formación de los arcos es igual al de las cavernas, pero éstos se forman principalmente en las salientes rocosas, que generalmente delimitan playas de bolsillo.
- **Plataformas de abrasión.** La desestabilización de los acantilados por la acción del oleaje genera deslizamientos de bloques de rocas de gran tamaño que se

depositan en la base de los mismos y quedan expuestos a la acción abrasiva del oleaje.

### Coberturas vegetales

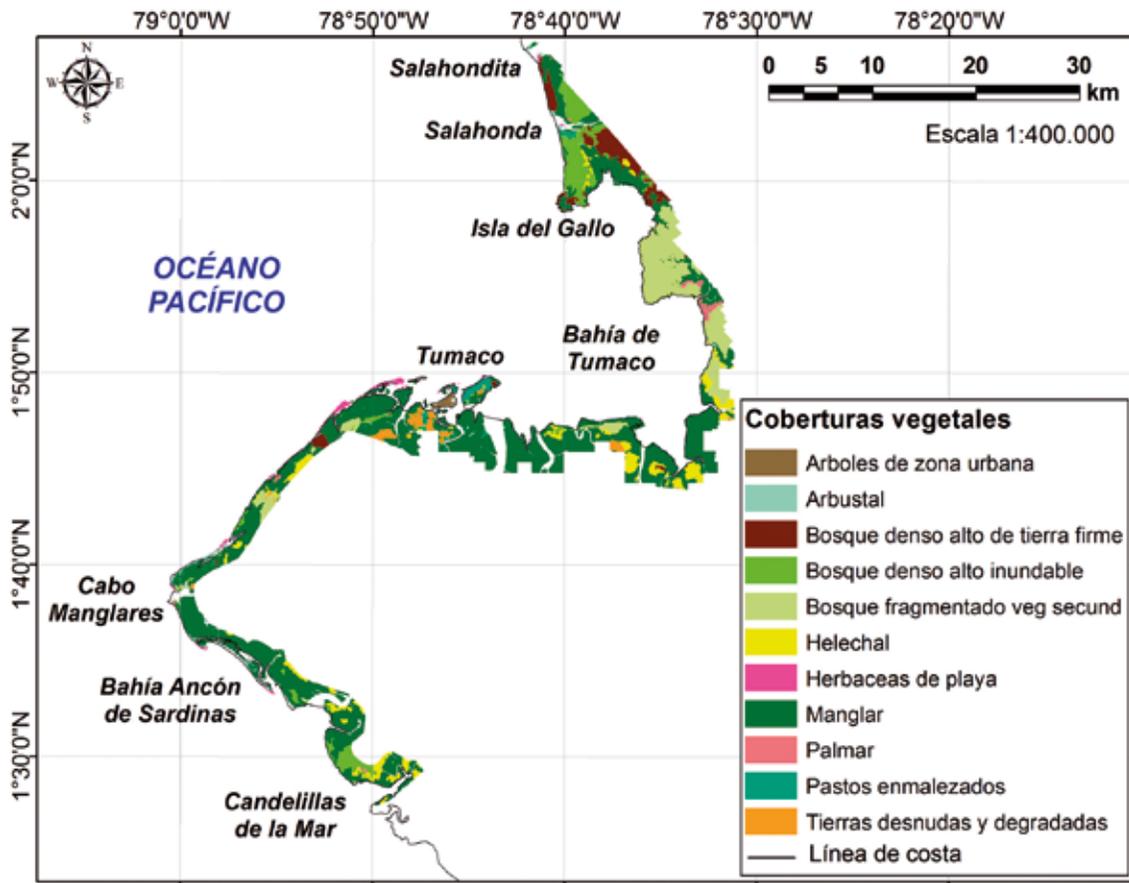
Se identificaron once (11) coberturas vegetales en una extensión total de 32063.81 ha (Tabla II), siendo la mayor extensión de las coberturas naturales sin intervención antrópica (28018.81 ha) y en menor extensión (4585.94 ha) las coberturas que presentan algún tipo de intervención antrópica.

**Tabla II.** Extensión de las coberturas vegetales encontradas en la zona de estudio.

| Cobertura Vegetal                            | Ha              | %          |
|--|-----------------|------------|
| Manglar                                      | 19603.84        | 61.14      |
| Bosque fragmentado con vegetación secundaria | 3861.94         | 12.04      |
| Bosque denso alto inundable                  | 3698.46         | 11.53      |
| Helechal                                     | 2086.84         | 6.51       |
| Bosque denso alto de tierra firme            | 1197.64         | 3.74       |
| Arbustal                                     | 302.56          | 0.94       |
| Tierras desnudas y degradadas                | 540.94          | 1.69       |
| Herbáceas de playa                           | 337.71          | 1.05       |
| Pastos enmalezados                           | 170.83          | 0.53       |
| Palmar                                       | 250.82          | 0.78       |
| Árboles de zona urbana                       | 12.23           | 0.04       |
| <b>Total</b>                                 | <b>32063.81</b> | <b>100</b> |

- **Árboles de zona urbana.** Esta fue la cobertura menos extensa de todas, solo ocupa el 0.03 % de toda la extensión de la zona de estudio. Se caracteriza por tener árboles asociados a estructuras urbanas, donde la proporción entre las áreas verdes y las áreas construidas es muy baja. En la zona de estudio esta relación se encontró en la isla de Tumaco, en la parte más densamente poblada del municipio. Esta isla sufrió un proceso de deforestación en el manglar,

ganándole posteriormente terreno al mar con rellenos para la construcción de viviendas. Las pocas zonas verdes que se encuentran en estas áreas pertenecen a plazas y parques y a algunos árboles que los pobladores siembran en las casas. Algunas especies de árboles que se observaron fueron: *Acacia bracinga* (acacia), *Persea grattisima* (aguacate), *Terminalia catappa* (almendro), *Hevea brasiliensis* (caucho), *Inga edulis* (guamo) y *Annona muricata* (guanábana).



**Figura 7.** Mapa de las coberturas vegetales de la costa de Tumaco, Nariño.

- **Arbustal.** Esta cobertura se compone de vegetación arbustiva desarrollada en forma natural en diferentes densidades y sustratos. Un arbusto es una planta perenne, con estructura de tallo leñoso y una altura entre 0.5 y 5 m, fuertemente ramificado en la base y sin una copa definida. Los arbustales naturales aparecen cerca de la línea de agua en zonas de acreción, donde la vegetación coloniza la tierra emergida que no tiene influencia de la marea. En este tipo de cobertura se identificaron especies como las *Cecropia* spp en estado juvenil, gramíneas de talla alta como las especies de *Gynerium* spp., Musaceas y Aráceas.
- **Bosque denso alto de tierra firme.** Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos arbóreos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) más o menos continuo, cuya área de

cobertura arbórea representa más del 70 % del área total de la unidad, y que en promedio presentan una altura del dosel superior a los 15 m [19]. Este tipo de bosque se encuentra en zonas no inundables, donde ni la marea ni los ríos tienen influencia, generalmente asociados a unidades geomorfológicas con relieve. Se caracteriza por ser muy diverso, con árboles de hasta 40 m de alto y un sotobosque bastante denso.

- **Bosque denso alto inundable.** Los bosques inundables o de transición son bosques que reciben una descarga de agua salina muy baja, pero ésta se disuelve con toda el agua dulce que los grandes ríos descargan en el mar, creando extensos pantanos donde estas aguas se mezclan. En estas condiciones solo algunas especies se adaptan a suelos inundados la mayor parte del año, creándose grandes rodales de una

- hasta cinco especies. En el área del Pacífico los nativos le dan el nombre de cuangarial o guandal a este tipo de bosque [3]. Este nombre viene del árbol del cangaré (*Virola* spp. y *Dialyanthera gracilipes*) (Fig. 6), el cual comparte estos pantanos con otras especies como el sajo (*Campnosperma panamensis*), tangare (*Carapa guianensis*), sande (*Brosimum utile*) machare (*Symphona globulifera*) y el peine mono (*Apeida aspera*).
- **Bosque fragmentado con vegetación secundaria.** Son bosques que han perdido parte de su cobertura y ésta ha sido reemplazada por vegetación secundaria o por pastos y cultivos. Estos bosques, generalmente, son el resultado de la deforestación para extracción maderera y originalmente eran bosques de terrenos no inundables propicios para el cultivo y la ganadería, sólo por esa característica y no porque los suelos sean aptos para estas prácticas.
  - **Helechal:** Cobertura dominada por la especie de helecho tropical *Acrostichum aureum*, que es una planta de bajo porte (hasta 2 m), con un amplio rango de tolerancia a la salinidad y soporta la inundación intermareal. Esta cobertura se refiere a vegetación típica de sucesión vegetal que invade rápidamente claros de manglar, formando poblaciones tan densas que pueden no dejar fijar nuevos embriones de mangle, dificultando su regeneración natural. También es común encontrarlo en las orillas de esteros y áreas de influencia fluvial. Este helecho es conocido como 'ranconcha' en el Caribe y 'cangrejera' en el Pacífico colombiano [3].
  - **Herbáceas de playa.** Corresponde a las áreas dominadas por vegetación natural herbácea abierta que presentan una cobertura entre el 30 y 70 % del área total de la unidad. En ningún caso presentan elementos arbóreos. Se desarrollan sobre áreas de suelos arenosos sin humedad. Por lo general, este tipo de cobertura aparece en las zonas de reciente formación, como las espigas y las barras costeras. En este tipo de terreno suelen aparecer especies que se caracterizan por ser fijadoras de nitrógeno, alterando los suelos para que otro tipo de cobertura aparezca, como los arbustales dando continuidad a la sucesión ecológica. Las especies identificadas fueron: *Cenchrus pauciflorus*, *Homolepsis aturensis*, *Ipomea pes-caprea*, *Ipomea stolonifera*, *Cannavalia marítima*, *Pectis arenaria* y *Stenotaprum secundatum*.
  - **Manglar.** Asociación vegetal caracterizada por tolerar suelos permanentemente inundados e inestables, con deficiente drenaje y con altos niveles de salinidad en el agua. Esta cobertura fue la más extensa de todas las analizadas y está asociada con los planos de inundación. Las especies que se encontraron fueron: *Rhizophora mangle*, *Rhizophora harrisonii*, *Rhizophora racemosa*, *Avicennia geminans*, *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erecta*, *Mora oleífera* y *Pellicera rhizophorae*. Cada una de estas especies presenta adaptaciones diferentes a la variedad de suelos que existen en la costa Pacífica. El mangle rojo se identifica por tener raíces en forma de zancos, que le permiten sustentarse en suelos muy inestables y característicamente anaerobios, que se presentan en la porción intermareal y submareal contigua a la costa. Este tipo de manglar se observa en los frentes costeros y en los bordes ribereños, donde el flujo de agua salina es alto.
  - **Palmar.** Cobertura compuesta por palmas de la especie *Euterpe oleracea*, las cuales resisten terrenos permanentemente inundados y agua salada.
  - **Pastos enmalezados.** Coberturas que se derivan de procesos antrópicos que se encuentran en áreas que han sido abandonadas después de haber sido utilizadas para vivienda o cultivos. En la costa de Tumaco no son muchas las hectáreas destinadas para estos objetivos.
  - **Tierras desnudas y degradadas.** Esta cobertura corresponde a las superficies de terreno desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a la ocurrencia de procesos tanto naturales como antrópicos de erosión y degradación extrema y/o condiciones climáticas extremas. Se incluyen en esta clasificación las áreas donde se presentan tierras salinizadas, en proceso de desertificación o con intensos procesos de erosión que pueden llegar hasta la formación de cárcavas. Se presenta cerca de asentamientos humanos para labores de agricultura o de construcción.

### Geomorfología costera y sus coberturas vegetales asociadas

Del total del área de la geomorfología descrita el 69.76 % se encuentra cubierto por vegetación. La geoforma con mayor cobertura vegetal es la

isla barrera, con un 99.97 %, y la menos cubierta son las plataformas intermareales no vegetadas (0.33 %).

Para la geoforma colinas y lomas se observa mayor predominancia de bosques fragmentados con vegetación secundaria con un 71.61 %; en las espigas predominan las herbáceas de playa (47.18 %); en las islas predominan los pastos

enmalezados (57.32 %); en las islas barrera los arbustales con 57.95 %; en las lagunas costeras el bosque denso alto inundable (63.30 %); en los pilares el arbustal (83.24 %); en los planos de inundación el manglar (83.75 %), y en los planos y llanuras con vegetación halófila el bosque denso alto inundable (52.25 %). Los tómbolos son la única geoforma que no está cubierta por vegetación alguna (Tabla III).

**Tabla III.** Asociación entre la geomorfología y las coberturas vegetales costeras, mostrando el porcentaje de cobertura

| Geomorfología   | Ha total de geomorfología | Ha cubierta por vegetación | % cubierto por vegetación | Cobertura vegetal                 | Ha vegetación | % vegetación |
|-----------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---------------|--------------|
| Colinas y lomas | 4252.82                   | 4171.15                    | 98.08                     | Bosque fragmentado con veg. sec.  | 2986.79       | 71.61        |
|                 |                           |                            |                           | Bosque denso alto de tierra firme | 1184.36       | 28.39        |
| Espiga          | 604.24                    | 580.04                     | 95.99                     | Herbáceas de playa                | 273.67        | 47.18        |
|                 |                           |                            |                           | Manglar                           | 171.72        | 29.60        |
|                 |                           |                            |                           | Arbustal                          | 129.28        | 22.29        |
|                 |                           |                            |                           | Bosque denso alto inundable       | 3.59          | 0.62         |
|                 |                           |                            |                           | Pastos enmalezados                | 1.26          | 0.22         |
|                 |                           |                            |                           | Bosque fragmentado con veg. sec.  | 0.52          | 0.09         |
|                 |                           |                            |                           | Pastos enmalezados                |               |              |
| Islas           | 478.16                    | 295.83                     | 61.87                     | Herbáceas de playa                |               |              |
|                 |                           |                            |                           | Arbustal                          |               |              |
|                 |                           |                            |                           | Manglar                           |               |              |
|                 |                           |                            |                           | Bosque denso alto de tierra firme |               |              |
|                 |                           |                            |                           | Arboles de zona urbana            |               |              |
|                 |                           |                            |                           | Bosque denso alto inundable       |               |              |
|                 |                           |                            |                           | Tierras desnudas y degradadas     |               |              |
| Helechal        |                           |                            |                           |                                   |               |              |

| Geomorfología                             | Ha total de geomorfología | Ha cubierta por vegetación | % cubierto por vegetación | Cobertura vegetal                | Ha vegetación | % vegetación |
|---|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------|---------------|--------------|
| Islas barrera                             | 245.91                    | 245.84                     | 99.97                     | Arbustal                         | 142.47        | 57.95        |
|   |                           |                            |                           | Manglar                          | 75.26         | 30.61        |
|   |                           |                            |                           | Herbáceas de playa               | 28.11         | 11.43        |
| Lagunas costeras                          | 15.08                     | 2.97                       | 19.69                     | Bosque denso alto inundable      | 1.88          | 63.30        |
|   |                           |                            |                           | Manglar                          | 1.09          | 36.70        |
| Pilares                                   | 0.99                      | 0.937                      | 94.65                     | Arbustal                         | 0.78          | 83.24        |
|   |                           |                            |                           | Manglar                          | 0.15          | 16.01        |
|   |                           |                            |                           | Bosque fragmentado con veg. sec. | 0.007         | 0.75         |
| Planos de inundación                      | 23432.58                  | 22396.78                   | 95.58                     | Manglar                          | 18757.14      | 83.75        |
|   |                           |                            |                           | Helechal                         | 1429.52       | 6.38         |
|   |                           |                            |                           | Bosque denso alto inundable      | 1423.92       | 6.36         |
|   |                           |                            |                           | Tierras desnudas y degradadas    | 537.81        | 2.40         |
|   |                           |                            |                           | Palmar                           | 248.39        | 1.11         |
| Planos y llanuras con vegetación halófito | 5669.16                   | 4332.89                    | 76.43                     | Bosque denso alto inundable      | 2263.96       | 52.25        |
|   |                           |                            |                           | Bosque fragmentado con veg. sec. | 874.63        | 20.19        |
|   |                           |                            |                           | Helechal                         | 656.42        | 15.15        |
|   |                           |                            |                           | Manglar                          | 535.45        | 12.36        |
|   |                           |                            |                           | Palmar                           | 2.43          | 0.06         |
| Plataformas intermareales no vegetadas    | 11261.46                  | 37.38                      | 0.33                      | Manglar                          | 37.38         | 100.00       |
| Tómbolo                                   | 0.13                      |                            |                           | Ninguna                          |               |              |

La Figura 8 presenta fotografías de campo que muestran las coberturas vegetales predominantes en cada geoforma.



**Figura 8.** Cobertura vegetal predominante en cada geoforma.

## DISCUSIÓN

El Pacífico colombiano y particularmente esta zona de estudio carecen de información de análisis geográfico a un nivel de detalle alto y una extensión de la magnitud manejada en esta investigación. Esto debido a las difíciles condiciones de acceso, movilidad, densa vegetación, tipo de terreno, aislamiento y orden público. Como respuesta a difíciles condiciones y dada la necesidad de obtención de información para el manejo costero es recomendable el uso de los sensores remotos, ya que éstos permiten capturar información desde grandes distancias y proporcionan una gran exactitud y nivel de detalle en los datos.

La combinación de los datos LiDAR con imágenes multiespectrales como las producidas por LandSat, mejoran la clasificación en términos de exactitud y automatización [21]. Los datos LiDAR son capaces de medir la altitud de los

objetos en el espacio, pero son poco eficientes para discriminar entre estos; en contraste las imágenes multiespectrales brindan una alta capacidad de clasificación, pero no proveen información sobre la altitud [21].

Una gran ventaja de los datos LiDAR es que permiten la generación de múltiples productos derivados como curvas de nivel, modelos de sombreado, pendiente, curvatura, superficie y elevación; los cuales facilitan el análisis final de la información. Los modelos de elevación de terreno con una resolución alta que se derivan de los datos LiDAR posibilitan la creación de simulaciones en 3D de la inundación mareal, que en fusión con ortofotografías brindan la capacidad de la interpretación visual, identificando de esta forma cambios en la geomorfología para determinar la magnitud de las zonas inundables, necesarias para tomar decisiones con respecto a las áreas costeras. Para el caso de las coberturas vegetales, el valor agregado de estos modelos

está en que se puede calcular información de tipo forestal, como: biomasa, altura de los bosques, densidad de los árboles, zonas libre de vegetación, entre otros; importantes reconocer en la gestión costera, debido a que muchas veces la vegetación sirve como barrera natural para mitigar el impacto de fenómenos meteorológicos eventuales o extremos.

La información generada en esta investigación, aparte de la caracterización costera, puede ser usada como herramienta para la gestión del riesgo (Ley 1523 de 2012), ya que se tiene conocimiento que las áreas de manglar ayudan a mitigar el impacto de amenazas marinas y marítimas [22]. Un manglar de 1.5 km de ancho y de unos 6 años de crecimiento puede reducir el oleaje de un tsunami entre 0.5 y 1 m [23] en un área con alta vulnerabilidad frente a este fenómeno como lo es el casco urbano de Tumaco y toda la zona costera rural [24].

El área de estudio presenta una línea de costa compuesta, debido a que tiene características de costas sumergentes (o de inmersión o de hundimiento) y emergentes. Las costas sumergentes son el resultado de las inundaciones por los altos niveles del mar o por el hundimiento de la corteza terrestre; en su lugar, las costas emergentes se deben a la elevación local de la corteza terrestre [20]. De acuerdo a su génesis marina, fluvial o continental, también pueden clasificarse como línea de costa baja o línea de costa alta [20]. Las costas bajas o depositacionales pasivas presentan geoformas como: islas barreras, tómbolos, deltas, lagunas, estuarios y playas. Las costas altas o erosionales activas presentan geoformas como colinas, lomas; y rasgos geomorfológicos como pilares, salientes, acantilados, plataformas de abrasión, cavernas, cantos rodados y arcos.

Desde la bahía Ancón de Sardinas, en el río Mataje, hasta la bocana del río Colorado y Salahondita, en la parte norte de la bahía de Tumaco, se presenta un tipo de línea de costa baja con unidades geomorfológicas que tienen una génesis marina fluvial debido a la depositación de sedimentos transportados por los ríos y por el oleaje del mar, correspondientes a una región geomorfológica o macro unidad geomorfológica llamada planicie deltaica, asociada a la desembocadura de los ríos Mira, Mataje, Tablón, Chagüí y Colorado. Ésta se caracteriza por presentar extensas planicies bajas y muy bajas con pendientes inferiores a los 10° y altura igual o un poco superior respecto al nivel del mar (aproximadamente, 5 msnm), constituidas

por depósitos cuaternarios recientes (arenas, limos). Estas unidades están representadas por islas barreras, planos y llanuras con vegetación halófila, planos de inundación, plataformas intermareales no vegetadas, espigas, lagunas costeras, estuarios y playas.

Desde la bocana del río Colorado hasta la bocana de Salahonda las unidades, además de tener características de costas bajas depositacionales, tienen características de costas altas erosivas debido a la presencia de otras macrounidades como son los lomeríos y las colinas. La evidencia de erosión en esta zona está representada por la presencia de rasgos geomorfológicos como acantilados, pilares, cantos rodados (o bloques caídos), cavernas, arcos, plataformas de abrasión y deslizamientos.

Las coberturas vegetales encontradas en este estudio son típicas de la zona de vida de bosque muy húmedo tropical, donde la mayoría de las coberturas no han sido intervenidas por procesos de deforestación y son coberturas naturales. Las planicies del sur de la zona de estudio tienen bosques con un muy bajo o casi nulo proceso de deforestación, debido a las difíciles condiciones de acceso y de asentamiento que presentan, ya que la mayoría de suelos de estas áreas son muy inestables y no permiten el aprovechamiento económico en cuanto a agricultura. Caso contrario ocurre con las colinas y los lomeríos de la parte norte de la bahía, donde se han asentado más habitantes y los pobladores aprovechan estos suelos para desarrollar una ganadería insipiente y agricultura de pan coger. Esta intervención de los pobladores transforma los bosques de tierra firme en bosque fragmentado con vegetación secundaria [19], cobertura natural que caracteriza este tipo de formación, la cual comparte muchas especies con los bosques inundables que rodean las colinas.

La asociación que se encontró entre las coberturas vegetales y la geomorfología no fue de carácter exclusivo. La mayoría de las coberturas estuvieron presentes en más de una geoforma, pero la dominancia de las coberturas sí varió entre éstas. Por ejemplo, las espigas están dominadas por herbáceas que se adaptan a suelos arenosos y con acción directa del viento; característica que presentan las extensiones de dunas que están en este tipo de formación geológica. En las planicies inundables que están influenciadas por las mareas directamente, la dominancia estuvo marcada por los bosques de manglar, característicos de estas geoformas [25]; pero además se encontraron otros tipos de

coberturas como los helechales, que constituyen una porción considerable de extensión de las planicies.

Las plataformas intermareales fueron la única geoforma que tuvo una reducida cobertura vegetal. La única vegetación asociada a esta última es el manglar, debido a que en estas plataformas los embriones de las especies de *Rhizophora* comienzan su desarrollo; sin embargo, por la acción de las olas y la erosión la mayoría de veces no culminan su crecimiento. Con el tiempo y por la acreción muchas veces los terrenos de estas plataformas se estabilizan y el manglar comienza a establecerse sobre éstas, evolucionando en planos de inundación.

## CONCLUSIONES

- La metodología empleada al combinar varios productos derivados en la obtención de la identificación de coberturas vegetales y geomorfologías, combinado con técnicas de teledetección e interpretación de imágenes, permitió tener bajos niveles de error en todo el proceso de verificación en campo; dado esto por la alta precisión de los datos LiDAR y las imágenes de sensores remotos.
- La fase de campo permitió, además de la verificación de coberturas vegetales y geomorfología, la identificación de cambios que ha sufrido el terreno en cuanto a áreas de manglar y evolución de la vegetación herbácea a arbustales. Esto se observó debido a que las ortofotografías datan de los años 2006 y 2012, y las salidas de campo efectuadas en el 2013.
- No existen asociaciones exclusivas entre las coberturas vegetales y la geomorfología costera en esta parte del Pacífico colombiano, pero sí existe dominancia de algunas de las coberturas que por lo general excede en más de la mitad de la extensión de la geoforma donde se encuentra.
- La metodología *Corine Land Cover* para Colombia se adaptó bien a este tipo de aproximación de las coberturas vegetales, y permitió utilizar hasta cuatro niveles de detalle para hacer la identificación y la cartografía de las coberturas vegetales.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias a la gestión de proyectos de esta índole que impulsan

el adecuado manejo del territorio y la toma de decisiones, adelantados por la Autoridad Marítima Colombiana (Dimar), a través de su Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCC).

Los autores hacen un especial reconocimiento a las tripulaciones del CCCP y del ARC "Gorgona", que con su labor garantizaron la seguridad y bienestar de los investigadores durante los cruceros, brindando acompañamiento en las salidas de campo y estableciendo comunicación con las tropas presentes en cada zona.

## LITERATURA CITADA

- [1] Cohen J. Population, economics, environment and culture: an introduction to human carrying capacity. *J Appl Ecol* [Internet]. 1997 [cited 2014 Sep 12];34:1325-33. Available from: <http://lab.rockefeller.edu/cohenje/PDFs/257CohenBESlectureJApliedEcol1997.pdf>
- [2] Gómez DG, Suárez C. El Pacífico Colombiano: problemática regional e intervención del Gobierno Nacional en los últimos veinte años 1987-2007. Bogotá D. C. Colombia.: Editorial Universidad del Rosario, Documentos de investigación #33; 2009.
- [3] Von Prah H, Cantera J, Contreras R. Manglares y hombres del Pacífico colombiano [Internet]. Fondo FEN Colombia; 1990 [cited 2014 Sep 11]. Available from: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Manglares+y+hombres+del+pacifico+colombiano#0>
- [4] Ojeda J, Vallejo I, Hernández L, Álvarez J. Fotogrametría Digital y LiDAR como fuentes de información en Geomorfología Litoral (marismas mareales y sistemas dunares): El potencial de su análisis espacial a través de SIG. *Boletín la Asoc Geógrafos Españoles*. 2007;44:215-33.
- [5] Olaya V. *Sistemas de Información Geográfica*. Víctor Olaya; 2011.
- [6] Melo LH, Camacho MA. Interpretación visual de imágenes de sensores remotos y su aplicación en levantamientos de cobertura y uso de la tierra. Instituto geográfico Agustín Codazzi; 2005.

- [7] Mascaro J, Detto M, Asner GP, Muller-Landau HC. Evaluating uncertainty in mapping forest carbon with airborne LiDAR. *Remote Sens Environ* [Internet]. Elsevier Inc.; 2011 Dec [cited 2014 Sep 11];115(12):3770–4. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425711002720>
- [8] Ferrer-Julià M, Iglesias J, Cerrillo A, Viscaino A, Martínez E, Ardiles L, et al. Generación de Cartografía Geomorfológica con Datos LiDAR para los Estudios de Inundabilidad. *Rev Ing del agua* [Internet]; 2004 [Consultado el 11 de septiembre de 2014]. Available from: <http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2009/fs/AO11rev.pdf>
- [9] Magdalena Mas F, Martínez Romero R. Aplicaciones de la teledetección láser (LIDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial. *Ing Civ* [Internet]; 1999 [cited 2014 Sep 11];1–15. Available from: <ftp://200.16.19.97/pub/trabajosfinales/Trabajo Final MARTINEZ GARCIA/Disco 1/09 - Bibliografia/Lidar/Ingenieria-Civil-142-2006-Aplicaciones-LiDAR.pdf>
- [10] García M, Prado E, Riaño D, Chuvieco E, Danson FM. Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo. *Rev Int Cienc y Tecnol la Inf Geográfica* 2009;9:184–208.
- [11] Janeras M, Navarro M, Ruiz A. Territoriales A. Aplicaciones del LiDAR en la valoración de la peligrosidad por acída de rocas en Valle de Núria. *Congreso de ISPRS Sensores de alta resolución y sus aplicaciones*; 2004. P. 16.
- [12] Hall RK, Watkins RL, Heggem DT, Jones KB, Kaufmann PR, Moore SB, et al. Quantifying structural physical habitat attributes using LIDAR and hyperspectral imagery. *Environ Monit Assess* [Internet]; 2009 Dec [cited 2014 Sep 11];159(1-4):63–83. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19165614>
- [13] Chust G, Galparsoro I, Borja Á, Franco J, Uriarte A. Coastal and estuarine habitat mapping, using LIDAR height and intensity and multi-spectral imagery. *Estuar Coast Shelf Sci* [Internet]; 2008 Jul [cited 2014 Aug 6];78(4):633–43. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272771408000541>
- [14] Achatz V, Finkl C, Paulus G. Semiautomatic Detection and Validation of Geomorphic Seafloor Features Using Laser Airborne Depth Sounding (LADS). *J Coast Res* [Internet]. 2009 [cited 2014 Sep 12];2009(56):1464–8. Available from: <http://www.jstor.org/stable/25738032>
- [15] Afanador Franco F, Carvajal Díaz AF, Gómez Quesada JC, Echeverry Hernández PJ. Sensoramiento remoto y análisis geomorfológico como información base para el control y administración del litoral, entre la desembocadura del río Gáira y el sur del aeropuerto Simón Bolívar, Departamento del Magdalena, Caribe Colombiano. *Bol. Cient. CIOH* 2010;28:265–99.
- [16] Rengifo Buitrago ML, Puentes Galindo MG. Penetración de la señal del sistema ALS40 LIDAR aerotransportado en la cobertura vegetal presente en las islas La Viciosa y El Morro. *Bol. Cient. CCCP* 2007;14:95–108.
- [17] División de litorales y áreas marinas. Marco conceptual para la definición técnica de la jurisdicción de Dimar; 2006. 485 pp.
- [18] ASPRS. ASPRS LiDAR Data Exchange Format Standard; 2003. Pp. 1–9.
- [19] Ideam. Leyenda nacional de coberturas de la Tierra. Metodología Corine-Land cover adaptada para Colombia escala 1:100.000. Bogotá D.C. Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales; 2010.
- [20] Posada BO, Henao W, Guzmán G. Diagnóstico de la erosión y sedimentación en la zona costera del Pacífico colombiano. Santa Marta: Invemar, Serie Publicaciones Especiales No. 17; 2009.
- [21] Alonso M, Malpica J. Satellite imagery classification with LiDAR data. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci* [Internet]; 2010 [cited 2014 Sep 11];XXXVIII(2004):730–5. Available from: [http://www.tric.u-tokai.ac.jp/isprsc8/TC8/TC8\\_CD/headline/TS-3/W08L11\\_20100309020313.pdf](http://www.tric.u-tokai.ac.jp/isprsc8/TC8/TC8_CD/headline/TS-3/W08L11_20100309020313.pdf)

- [22] Barbier EB. Natural barriers to natural disasters: replanting mangroves after the tsunami. *Front Ecol Environ* 2006;4(3):124-31.
- [23] Mazda Y, Magi M, Kogo M, Nguyen P. Mangrove on coastal protection from waves in the Tong King Delta, Vietnam. *Mangroves salt marshes* 1997;1:127-35.
- [24] Martínez Rubiano M.T. Tumaco comunidad vulnerable ante tsunami. Universidad del Cauca; 2005.
- [25] Bird E. Coastal geomorphology: An introduction. Second edi. Queensland 4064, Australia: John Wiley & Sons Inc; 2008.