



ARTÍCULO

Sensores aerotransportados y sistema de información geográfica para el establecimiento del límite de vegetación permanente en los Litorales Colombianos

Airborne sensors and geographic information system for establishing a permanent vegetation limit in Colombian Littorals

Fecha recepción: 2006-06-21 / Fecha aceptación: 2006-08-04

Mary Luz Cañón Páez

E-mail: mcanon@cioh.org.co

Fernando Afanador Franco

E-mail: fafanador@cioh.org.co

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH,
Isla Manzanillo, Cartagena de Indias D.T. y C.

Resumen

La determinación del límite de vegetación permanente en la zona superior de la playa se efectuó con datos proporcionados por el sensor LIDAR (Light Detection And Ranging), combinados con fotografías aéreas métricas digitales del sector Norte del Corregimiento de la Boquilla, Departamento de Bolívar, tomadas durante el mes de Diciembre de 2005. El objetivo de esta investigación consistió en establecer y aplicar una metodología para el establecimiento del límite de la vegetación permanente, como uno de los elementos fundamentales para la determinación del límite de la playa hacia el continente en los litorales colombianos, de conformidad con lo estipulado en el Decreto 2324 de 1984, en lo relacionado con la delimitación de la jurisdicción de la Autoridad Marítima Nacional DIMAR y el modelo conceptual para la determinación de la jurisdicción adoptado por la misma entidad. La relevancia de la investigación se centró en la utilización de la información espacial disponible de los sensores aerotransportados junto con un Sistema de Información Geográfica ArcGIS 9.0, para la generación de mapas de vegetación permanente en extensas áreas del litoral Caribe colombiano y el consiguiente control y administración de las áreas litorales nacionales.

La metodología de trabajo involucró el filtrado y la clasificación de la información cruda proporcionada por el sensor LIDAR, como base para el establecimiento de estratos de altura de vegetación en la zona de estudio; la utilización de las fotografías

CIOH
www.cioh.org.co

aéreas métricas del mismo sector como elementos de orientación, de definición y de georreferenciación de perfiles de vegetación; adopción como referencia, de la distribución de especies vegetales en las playas de las regiones tropicales planteada por UNESCO en 1997 y finalmente, la utilización de las facilidades de análisis espacial del SIG ArcGIS 9.0 para la clasificación y espacialización del límite de vegetación permanente.

La aplicación de la metodología propuesta permitió reducir los tiempos y costos de levantamiento de información de campo y de procesamiento digital de la información, ya que los volúmenes de datos proporcionados por el sensor LIDAR, frente a otros métodos convencionales de obtención de información espacial sobre estructura de la vegetación, son mucho más altos y tomados con mayor rapidez, además de proporcionar una mayor facilidad de trabajo. Además, se pudo establecer que para la región norte del área de estudio, la vegetación llega a ser permanente aproximadamente a 20 m de la línea de costa hacia el continente.

Palabras claves: Sensores aerotransportados, Sistemas de Información Geográfica (SIG), Fotografías aéreas digitales, LIDAR, vegetación permanente, Administración de litorales

Abstract

The determination of the permanent vegetation limit on the upper beach area was undertaken with data provided by the LIDAR sensor (Light Detection And Ranging), together with digital metric aerial photographs of the La Boquilla North sector, Department of Bolivar, taken during December 2005. The objective of this research was to establish and to apply a methodology for the establishment of the permanent vegetation limit, as fundamental element for determining the beach limit toward the continent in the Colombian coasts, according to Decree 2324, in connection with the delimitation of the jurisdiction of National

Maritime Authority DIMAR- and the conceptual model for determining the jurisdiction adopted by the abovementioned institution. The relevance of the investigation was focused on the use of the available spatial information from airborne sensors together with a Geographic Information System - ArcGIS 9.0, for the generation of permanent vegetation maps in extensive areas of the Colombian Caribbean coast, as an element that contributes to the technical determination of National Maritime Authority limit and to the control and administration of national coast areas.

The work methodology involved the filtering and classification of the raw data provided by the LIDAR sensor, as basis for the establishment of height strata vegetation in the study area; the use of metric aerial photographs of the same sector as orientation, definition and georeference elements; vegetation profile definition; adoption as reference, of the distribution of vegetable species in the beaches for tropical regions outlined by UNESCO in 1997 and finally, the use of the facilities of spatial analysis of ArcGIS 9.0 for the classification and mapping of permanent vegetation.

The application of the proposed methodology allowed the reduction of time and costs of field surveying and digital processing data, since the amount of LIDAR supplied data, against other conventional methods to obtain spatial information about of vegetation structure, are much higher and are taken much more quick, in addition to providing higher work facility. Also, it was possible to establish that for the north region of the study area, the vegetation of the place is about permanent approximately 20 m from the coast line toward the continent.

Key words: Airborne sensor, Geographic Information System (GIS), Digital aerial photography, LIDAR, Permanent vegetation, Littoral administration.

1. Introducción

Esta investigación se llevó a cabo con el fin de encontrar y probar experimentalmente una metodología de fácil aplicación que permitiera espacializar el límite de vegetación permanente como elemento fundamental para la delimitación de playas dentro de la determinación de la jurisdicción de la DIMAR en los litorales colombianos.

La vegetación permanente en una zona costera es aquella resultante de la actividad de los pleamares más intensos que a su paso, dejan restos de algas, moluscos, cangrejos y otros organismos que fertilizan el suelo y con el paso del tiempo, dan origen a comunidades vegetales.

Este proyecto plantea la utilización de información espacial, puntos (X,Y,Z), derivados de las mediciones con sensores aerotransportados (sensor LIDAR tipo ALS40) y la utilización, como elemento de referencia, de ortofotografías digitales para el establecimiento de la vegetación permanente en ambientes costeros del caribe colombiano. De esta forma, se ha planteado y aplicado una metodología clara y sencilla para establecer la localización espacial de la vegetación permanente por parte del personal técnico y profesional de los Centros de Investigación de la DIMAR en su labor de determinación técnica de la jurisdicción de la DIMAR.

A este respecto, uno de los primeros problemas a resolver es la disparidad de criterios y conceptos utilizados para la determinación del límite de la vegetación permanente dentro de los estudios de jurisdicción de la DIMAR. Por ello, se debe abordar el planteamiento y verificación de una metodología que permita establecer claramente el límite de la vegetación permanente, utilizando la información de altura de los estratos de vegetación proporcionada por el sensor aerotransportado LIDAR ALS40 y la

información de referencia del perfil de vegetación característico, establecido por [17] para las zonas tropicales.

Para [17], el límite inferior de la playa, está definido por el punto donde las olas ponen en movimiento el material no consolidado del fondo y corresponde a una profundidad de 20 m, la cual se conoce como la profundidad de cierre de la ola. Mientras que el límite superior, esta definido por la presencia del primer cordón de dunas, de cantiles costeros, la presencia de vegetación natural permanente o de algún tipo de infraestructura.

Partiendo de la definición anterior, en la mayoría de las áreas costeras tropicales y subtropicales, se ha establecido un perfil característico de playa. Este perfil presenta inicialmente un área de arena descubierta, seguida por una zona de dunas colonizada por vegetación costera (tipo rastro). Detrás de esta, se observa un área colonizada por plantas bajas, continuando hacia la parte posterior de la duna con un área de arbustos un poco más altos y finalizando posiblemente en un bosque. En este perfil característico, se puede establecer una clara sucesión biológica que se establece de forma natural producto, en cada zona, de un hábitat conveniente para cada tipo de vegetación, la cual es capaz de colonizar y vivir allí, bajo condiciones normales y extremas, (figura 1).

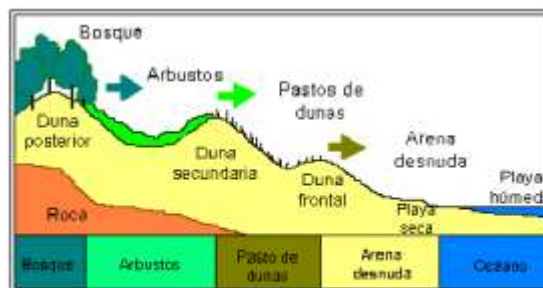


Figura 1. Sucesión vegetal en playas. Perfil característico de las áreas tropicales, modificado: <http://www.poemsinc.org/oceano/beachdun.html>.

Para estudiar la distribución de vegetación costera en la región de la playa, actualmente se emplean tecnologías satelitales que ahorran tiempo, costos y cubren mayores áreas, facilitando así la administración y control de extensas áreas como el litoral Caribe colombiano.

En Colombia, el empleo del sensor LIDAR, está en sus inicios con la generación de la base cartográfica de tres áreas de la costa Caribe colombiana. El proyecto pretende establecer el límite de la jurisdicción DIMAR en los litorales colombianos. Por lo anterior y teniendo en cuenta la resolución de la información generada por LIDAR y la fotografía aérea digital, además de las condiciones topográficas de las área a estudiar y las funciones establecidas para la DIMAR, en cuanto a gestión del litoral, esta alternativa ha sido escogida como la más adecuada para lograr la obtención de información con los niveles de precisión y exactitud posicional requeridos.

Aunque en algunos casos las dos tecnologías están compitiendo por algunas aplicaciones, éstas no son mutuamente excluyentes, sino que por el contrario, la integración de las dos tecnologías puede proporcionar aplicaciones más exactas y soluciones a problemáticas que una sola no puede resolver [2].

El LIDAR es un láser aerotransportado, compuesto por un emisor/receptor y un escáner muy potente, que se emplea para la adquisición de coordenadas de terreno en tres dimensiones (X, Y, Z). Utiliza un rayo láser emitido desde una aeronave, para medir la distancia respecto del terreno. Esta distancia, se combina con la información proporcionada por otros sistemas (GPS/IMU - Sistema de posicionamiento global /Unidad de Movimiento Inercial), para obtener en post-proceso las coordenadas X,Y,Z de los elementos del terreno [3] [4] [5] [6]. En este sentido, se considera que los actuales sistemas de altimetría láser están constituidos por la unión de tres tecnologías (LIDAR; GPS e

IMU). Es de anotar que los tres sistemas requieren de la utilización de un avión similar al empleado para la toma de fotografías aéreas.

El sistema también comparte con la fotogrametría el diseño del plan de vuelo para el éxito de la operación; sin embargo, a diferencia de esta última, el sistema de altimetría láser es capaz de capturar datos sin tener en cuenta el ángulo solar [4] [7] [8]. Los equipos mas modernos realizan un barrido de un área a ambos lados de la trayectoria del avión con lo que se pueden además obtener representaciones bidimensionales de los datos (figura 2). Puesto que las observaciones son muy puntuales, cada píxel generado resulta de la extracción de los pulsos de retorno que se hayan encontrado en la superficie que ocupan. Dependiendo del procesamiento de los datos, el valor de cada píxel corresponderá a las alturas máximas, a un promedio ó a un rango de alturas obtenidas. Si el píxel es suficientemente grande y los pulsos muy densos, algunos se reflejaran en las copas de los árboles, otros en las ramas intermedias, otros en el matorral y otros en el suelo [2].

Cabe mencionar que LIDAR tiene algunas ventajas sobre la fotogrametría, tales como el incremento en la densidad de puntos de muestreo. De esta manera, genera mayor información sobre la distribución de la vegetación en elevaciones del terreno, bajo ciertos escenarios independientemente de las condiciones de iluminación, esto porque es un sistema activo. También su bajo costo en comparación con la fotogrametría, principalmente para proyectos con cobertura de áreas grandes [9] [10], es otra ventaja clara. Por lo tanto, estas ventajas facilitan su elección a la hora de escoger la metodología más adecuada para mapeo cartográfico, ya que el costo- beneficio ofrecido frente a las tecnologías convencionales para la creación de modelos digitales de terreno (MDT) con exactitudes verticales de 15 a 100 cm es más significativo.

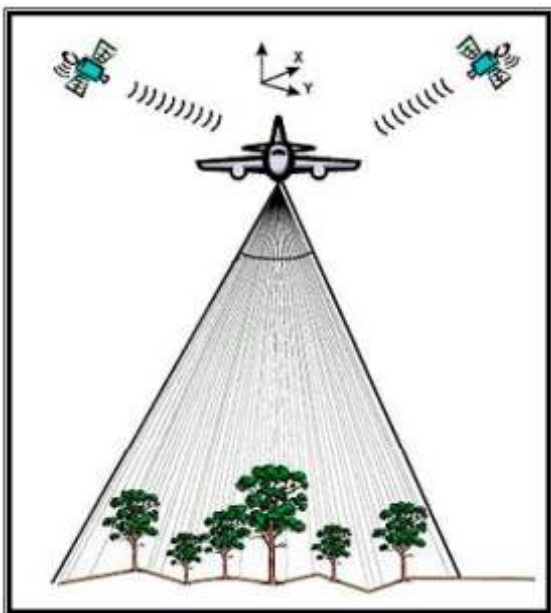


Figura 2. Modo de Operación del sensor LIDAR a bordo de una plataforma, aerotransportada.

única técnica de teledetección capaz de detectar simultáneamente el terreno y la vegetación (figura 3).

Una de las principales ventajas del LIDAR es que permite generar tanto modelos digitales del terreno como de elevación. Estos modelos, se obtienen a través de la aplicación de diferentes algoritmos que tienen en cuenta los puntos más bajos de un retorno en el caso de los MDT, y de los más altos en el caso de los MDE [6].

Por tanto, la hipótesis que se plantea en la presente investigación es la siguiente: “La información de posición (X, Y) y de alturas de puntos (Z) de vegetación muestreados con sistema LIDAR, proporciona a través de la generación de Modelos Digitales de Elevación (DEM) y la utilización de funciones de reclasificación en un SIG, intervalos de clase de alturas de estratos de vegetación que pueden ser relacionados con el perfil típico de vegetación costera establecido por [1].

La primera generación de sensores LIDAR usada en estudios de vegetación, fueron diseñados para medir el rango de la primera superficie interceptada por el láser, típicamente a lo largo de transectos singulares definidos por las líneas del vuelo [11] [10]. Este sistema proporciona información sobre cualquier objeto situado sobre el terreno, en particular sobre la vegetación. En bosques con espacios entre las hojas suficientemente grandes, algunos pulsos del láser alcanzan el suelo y con estos se pueden construir Modelos Digitales del Terreno (MDT). El LIDAR es la

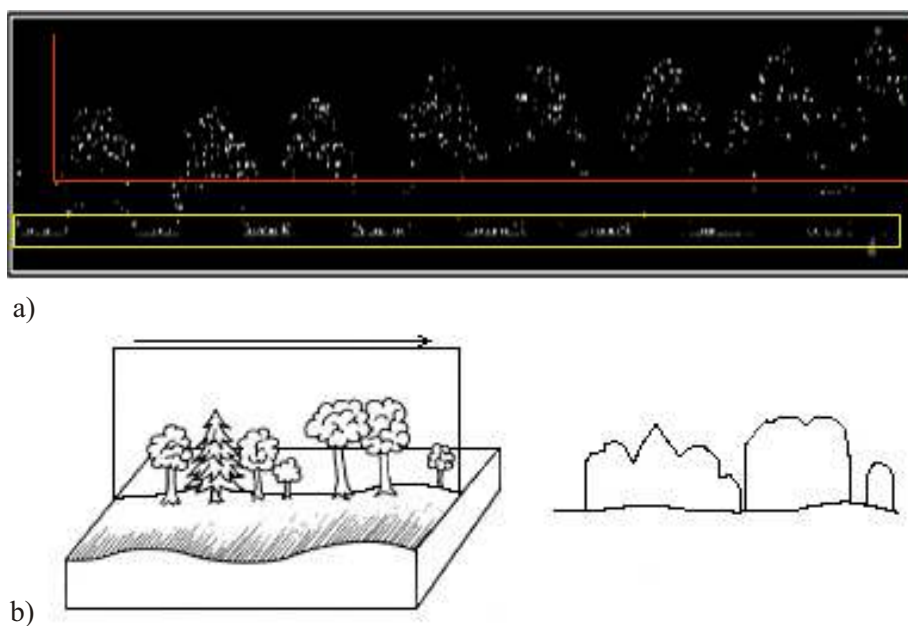


Figura 3. a) Observación de árboles individuales [6]. En color rojo los puntos LIDAR correspondientes a árboles. En color amarillo, los puntos LIDAR correspondientes al nivel del terreno. b). Perfiles de áreas vegetadas observadas con LIDAR [10].

3.1. Diseño experimental

Consistió en establecer la estructura lógica de la prueba de hipótesis. Para ello, se realizaron las siguientes actividades:

3.2. Adquisición de datos espaciales

3.2.1. Toma de fotografías aéreas y datos LIDAR

Para la toma de fotografías aéreas y datos LIDAR se contó con una cámara fotográfica marca SO CET SET, con tipo de lente Zeiss 55 mm N°2 y una distancia focal calibrada de 55,127 mm. El sensor LIDAR utilizado fue un ALS40 abordo de un avión marca Cessna, tipo 402 B. El avión realizó un recorrido sobre el área, atendiendo los requerimientos de las líneas de vuelo preestablecidas sobre el área de interés. De esta manera, se garantizó el recubrimiento total del área.

Para la orientación de la información se contó dentro del avión con un sistema de posicionamiento global (GPS), el cual proporcionó información de las coordenadas (X,Y,Z) de los puntos capturados. El sistema de navegación inercial o Unidad de Medida Inercial (UMI), generó información sobre los valores de giro del avión durante el vuelo. De este modo, el movimiento del avión pudo corregirse y las posiciones precisas del láser con la superficie de tierra pudieron ser calculadas.

Una vez verificados los requerimientos técnicos establecidos en el proyecto como: apertura del láser, Longitud de onda, divergencia mínima del rayo láser, Altura de vuelo, Laser footprint on ground, Ángulo de escaneo, Ancho de pasada (swath width), Frecuencia de escaneo (scan frequency, Scan rate) (fsc), Rata de pulsos (pulse rate), Número de puntos por línea escaneada, distancia promedio entre líneas escaneadas, espaciamento de puntos perpendicularmente a la línea de vuelo, exactitud del ángulo de

escaneo, Intensidad y Densidad de puntos (GSD Ground Sample Distance), se procedió al trabajo en campo y al tratamiento digital de la información.

3.2.2. Ortorectificación de las Fotografías aéreas

En el caso de las fotografías tomadas por la cámara digital, éstas fueron ortorectificadas mediante la utilización del software PCI Geomatica, Modulo OrthoEngine, siguiendo el procedimiento técnico establecido por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Una vez generadas las ortofotos, se procedió a la elaboración de un mosaico de éstas, que permitió visualizar el área de estudio completa (figura 5) e identificar las características del terreno asociadas a los puntos capturados por el sensor, es decir, áreas de vegetación sin intervención, áreas construidas y, cambios en la morfologías del terreno.

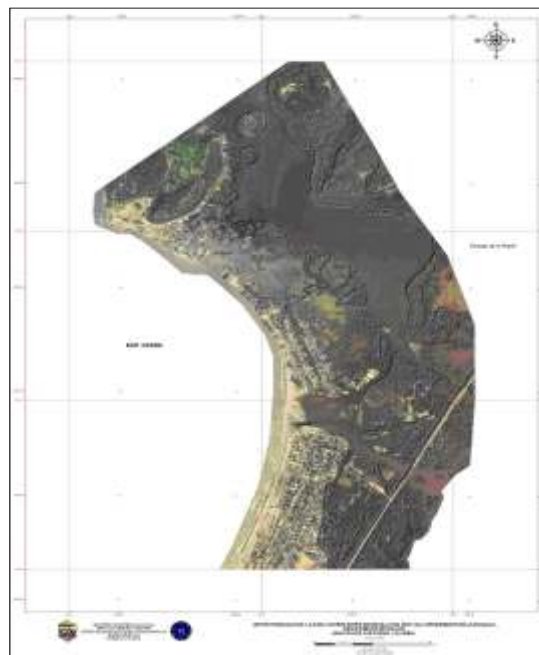


Figura 5. Fotomosaico ortorectificado del área de estudio, generado en ArcGIS 9.0 con las 6 ortofotografías que cubren el área de estudio.

3.3. trabajo en campo

3.3.1. Definición de perfiles georeferenciados y área a muestrear

Con el software MARS (software para el procesamiento de datos LIDAR), se trazaron los perfiles de verificación de campo sobre un mosaico de ortofotografías del área de estudio. De esta forma, se tuvieron en cuenta diferentes características del área (playas, áreas cenagosas, caseríos), buscando definir de la forma más exacta posible, la línea de vegetación permanente.

Para hacer esto se procedió a generar un fotomosaico georreferenciado del área de estudio. De esta manera, se pudieron preestablecer los sitios para levantar la información de campo; es decir, los perfiles de vegetación que permitieron establecer las especies de vegetación costera de la zona [16] [17] [18] [19] a las cuales pertenecen los niveles de intensidad digital y densidad de puntos reportados por el sensor LIDAR.

Para la elaboración de los perfiles se utilizó el software MARS, con que el se trazaron las líneas de perfil aproximadamente en forma perpendicular a la línea de costa, desde ésta hacia el continente. Las longitudes de los perfiles oscilaron entre 80 y 200 m, con el fin de obtener información representativa; especialmente en los sitios en los cuales se observo cambio de la cobertura vegetal. Estos perfiles fueron llevados a campo para su verificación.

3.3.2. Descripción de la Vegetación

Para la descripción de la vegetación, se empleó la metodología propuesta por [20]. Este método permite describir de forma escrita y gráfica la fisonomía de la vegetación. Sirve de marco descriptivo para que los interesados en la información se formen una idea de las características de la vegetación del área estudiada. De modo que con este método, se pretende proporcionar una idea general del tipo de vegetación en donde se desarrollaron los muestreos.

La base principal de este punto, es la descripción estructural de la vegetación desde la línea de costa hasta el punto donde se encontró vegetación con un bosque, con especies y condiciones de hábitat más estables. Para esto se consideraron diferentes estratos presentes (razante, herbáceo, arbustivo, subarbóreo, arbóreo inferior y arbóreo superior), la altura (<0.3m, 0.3-1.5m, 1.5-5 m, 5-12 m, 12-25m y >25m) y cobertura de éstos, es decir, la estimación visual de la proyección vertical sobre el suelo, de las copas de los individuos de los estratos presentes.

3.3.2.1. Levantamiento de información en campo

Una vez definidos los perfiles, el trabajo de campo consistió en el posicionamiento de los perfiles, demarcando puntos cuando se presentó el cambio de cobertura, tomando la distancia entre el punto inicial del perfil y el punto en el que se observó el cambio de vegetación establecido (d1 esta corresponde a la longitud del transecto No.1) y así sucesivamente hasta finalizar el perfil (figura 6). Se realizó el registro fotográfico de las especies vegetales encontradas a lo largo del transecto, teniendo cuidado de fotografiar el hábitat de la especie, flores, frutos, hojas, tallos y demás características que facilitaron su identificación taxonómica en el laboratorio. Este proceso se aplico para cada transecto. En los casos en los que el proceso de identificación no fue inmediato, al finalizar la jornada de campo, se procedió a preservar las muestras en una solución de Etanol al 80% acuerdo con la metodología establecida por [20], para su posterior identificación en laboratorio.

3.3.3. Perfiles de vegetación

El perfil de la vegetación es el esquema de una franja que pretende ilustrar el número de estratos, su altura y cobertura. En este caso, para la elaboración de los perfiles esquemáticos se empleó la información de los 4 transectos previamente establecidos. La información fue transferida a una gráfica de barras colocando en el eje X los individuos y, en el Y su altura. Luego, con algunos bocetos de la forma de las

copas elaboradas en campo, se reemplazaron las barras por dibujos de árboles, rastreras, hierbas, lianas o palmas. Adicionalmente, se identificaron en campo, las especies vegetales que generaron información para el sensor LIDAR. Se verificó adicionalmente si estos perfiles presentaban el patrón de sucesión de las áreas tropicales, descrito en la introducción.

correspondiente a vegetación, los factores de corrección aproximados de alturas elipsoidales a geoidales de acuerdo con el Modelo Geoidal-GEOCOL 2004. De esta manera, se pudo comparar la información proporcionada por el sensor y la tomada en campo, en términos de altura de la vegetación muestreada.



Figura 6. Diagrama explicativo de toma de información en los transectos a lo largo de un perfil de vegetación.

Para ello, se utilizaron los archivos LIDAR.txt, correspondientes a la vegetación filtrada, a los cuales se les aplicó un factor de corrección aproximado a las alturas elipsoidales para convertirlas en geoidales, con base en el Modelo Geoidal establecido para Colombia [21]. Para la realización de dicha corrección, se tuvo en cuenta la relación:

$$H = h - N$$

Donde; h corresponde a la altura elipsoidal registrada por el sensor LIDAR del área de estudio, H es la cota o altura real medida en campo en cada perfil y N es la separación geoidal obtenida del modelo GEOCOL2004. En el caso específico del área de estudio, este valor fue de -4.75 . Por tanto, para la zona de trabajo, la altura geoidal a trabajar fue:

$$H = h - (-4.75); \text{ ó } H = h + 4.75;$$

La aplicación de esta corrección aproximada, se trabajó con un software de manejo de datos como *Excel* (para archivos pequeños con menos de 65000 datos), ó *Surfer* ó *Minitab*, para archivos con gran cantidad de datos (mayores a 65000 datos).

3.4.2. Generación del MDE

Para generar el modelo digital de elevación (alturas de estratos de vegetación), se efectuó el siguiente procedimiento:

3.4. Procesamiento digital de la información

3.4.1. Filtrado de la información LIDAR

Previo a la elaboración de los perfiles de vegetación, con la información obtenida del sensor LIDAR debidamente calculada y corregida por condiciones atmosféricas, giro, cabeceo y ladeo de la aeronave, se realizó el filtrado de los datos capturados por el sensor, a través de macros ejecutados con el software de procesamiento MARS y elaborados para ese fin. De esta manera, se pudo obtener la clasificación de los puntos capturados por el sensor y discriminados en la representación del terreno por un lado y de la cobertura vegetal por otro.

3.4.1. Ajuste de alturas

Realizado el filtrado de la información LIDAR, se procedió a aplicar, a la información

A. En el paso anterior se generaron archivos *.dbf*, los cuales fueron importados al ArcGis 9.0, específicamente en ArcMap a través de la utilización de la opción *Add X,Y data* asignando el nuevo sistema de coordenadas de Colombia, el sistema MAGNA-SIRGAS con origen central.

B. Importados los archivos *.dbf*, se procedió a la generación de archivos *.tin* utilizando la opción *3D Analyst* de ArcMap.

C. Se utilizó la opción *Convert TIN to Raster* de *3D Analyst* en ArcMap para convertir el archivo *.tin* en un archivo tipo raster con tamaño de celda de 5 m y poder de esta manera, utilizar las ventajas de este formato para análisis espacial.

3.4.3. Clasificación y reclasificación del archivo raster

Con el fin de efectuar una reclasificación de los valores de cada celda o píxel en el archivo raster, se efectuó inicialmente una clasificación por valores de celda, utilizando la opción *Properties/Symbology/Classified* de ArcMap.

Posteriormente se utilizó la opción *Reclassify* del módulo *Spatial Analyst* utilizando la técnica de intervalos de igual tamaño. Luego, se asignaron valores de 1 a 4 a los diferentes intervalos de clase, dependiendo de las alturas de estratos de vegetación a la que correspondían (obtenidas según la metodología propuesta por [20], de la siguiente manera:

Estrato herbáceo: entre 0 y 1.5m. Se le asignó valor 1 y color verde.

Estrato arbustivo: entre 1.5 y 5 m. Se le asignó valor 2 y color verde.

Estrato subarbóreo: entre 5 y 12m. Se le asignó valor 3 y color café.

Estrato arbóreo inferior: entre 12 y 25 m. Se le asignó valor 4 y color café.

3.4.4. Elaboración del mapa de línea de vegetación permanente

Finalmente, con los modelos de elevación generados para cada subárea (en total 6), en

ArcMap se digitalizó la línea de vegetación permanente, teniendo en cuenta la clasificación efectuada en la etapa anterior. En áreas de difícil demarcación, es decir donde la reclasificación de los puntos no fue clara, el trabajo se apoyó en el fotomosaico u ortofotografía del sector.

Resultados y Discusión

La aplicación del diseño experimental alrededor de la hipótesis planteada, produjo los siguientes resultados:

Retirados los puntos tomados por el sensor y correspondientes a suelo desnudo y construcciones, fueron tenidos en cuenta únicamente los puntos filtrados como vegetación para la generación del modelo digital de elevación de vegetación. De esta manera, se buscó generar un modelo que permitiera definir la distribución sucesional de especies vegetales tanto a lo largo de las playas, como a lo largo del cuerpo de aguas estuarino presente en el área de estudio (figura 7). El modelo mostró una mayor densidad de puntos, es decir mayor número de árboles, en la región central y sur a pesar del alto grado de intervención humana, del que ya se ha comentado. Es de anotar que la discontinuidad en las alturas de los estratos que se presenta en la parte Norte de la figura 7, puede deberse a errores en el filtrado y clasificación de la información de vegetación proveniente del sensor LIDAR. Como trabajo posterior a los resultados de esta investigación, se recomienda revisar cuidadosamente la información filtrada de este sector.

En la región norte del área de estudio, se observó la correspondencia de la distribución de la vegetación con la forma del terreno, de manera que a diferencia de las otras dos regiones, en la norte, el cambio fisiográfico del terreno es un punto adicional para facilitar la delimitación de la línea de vegetación permanente. Por el contrario, en las regiones central y sur, difícilmente se pudo establecer un

límite de vegetación, se estableció más bien, la demarcación de unas áreas de transición, dado que estas regiones están conformadas en su mayoría, por un ecosistema de manglar, el cual presenta una distribución diferente a la vegetación de las playas. Adicionalmente, en estas dos regiones el grado de intervención antrópica, dificultó aun más esta tarea, primero por la degradación de los estados de vegetación nativo y, segundo, por la introducción de otras especies y la alteración significativa del paisaje.

Pese a la dificultad para establecer la línea de vegetación permanente de los sectores central y sur, fue posible establecer una clasificación de los estratos de vegetación presentes en el área. De esta manera, en el área norte fue evidente la presencia de un bosque seco tropical, mientras que en el área central y sur, el bosque de manglar, con alturas de los árboles entre 6 y 20 m fue dominante. Cabe mencionar, que predominó hacia la zona de transición o hacia la costa en el centro y sur del área de estudio, el estrato arbustivo de especies de manglar.

De los cuatro perfiles levantados en campo, ninguno presento de forma exacta, la distribución sucesional de vegetación referida en el perfil característico, por cuanto no pudo ser ubicada una zona sin intervención antrópica, situación que de algún modo pudo ser la causa para que en los perfiles estudiados se registraran cambios con relación a este.

Cabe mencionar además, que la distribución o zonificación de la vegetación en cuerpos de agua (ciénagas o estuarios) aledaños a la zona costera es diferente a la de las playas. Se hace referencia a este tema, teniendo en cuenta que sobre estas áreas también la DIMAR, ejerce su control y administración. Por esta razón, fueron levantados dos perfiles sobre éste sector, ya que la mayor parte del área de estudio esta ubicada sobre uno de los ambientes estuarinos mas importantes del departamento y de la región, (Ciénaga de La Virgen).

En relación con el perfil No. 1, éste fue extractado de la ortofoto N° 126 de Cartagena, con una longitud aproximada de 87.5 m. Inició en la coordenada 844173.0 m. Este y 1653244.9m. Norte y finalizó en la coordenada 844259.6m. Este y 1653255.7m. Norte. En este perfil fueron observados dos cambios de vegetación, con la presencia de 14 especies, de las cuales 7 fueron identificadas de hábitos herbáceos, 1 de hábito parásita y 6 de hábitos arbóreos. Con la fotografía, aparentemente en el área no se observa intervención de ningún tipo, sin embargo, en campo se corroboró la ocupación del terreno y por tanto la modificación de la vegetación nativa propia del lugar.

En este perfil también se observó que la distribución de la vegetación siguió el patrón establecido en el perfil característico adoptado (figura 9), sin embargo se observaron especies implantadas, producto de las comunidades allí establecidas que tienden a alterar la sucesión establecida en el mencionado perfil. En el transecto numero dos, del perfil N°1 generado con el software MARS, se observo un árbol de aproximadamente 6 metros de altura. En campo se pudo establecer que la especie en mención correspondía a *Hippomane mancinella* L., la cual es conocida como “manzanillo” en la región (figura 10). De esta manera, se pudo comprobar que la resolución del sensor LIDAR, facilita el trabajo en campo y adicionalmente se confirma que éste posee la capacidad para discriminar árboles individuales como lo documentan [22] [23] [24] [25].

Continuando con la distribución sucesional de vegetación a lo largo del perfil uno, en el transecto 3, no se evidenció la presencia de vegetación arbustiva como es característico del perfil de referencia adoptado, sino de vegetación de un estrato superior, con hábitos arbóreos que sobrepasan los 8 metros de altura. En este transecto y hasta el final del perfil no se observaron cambios de la vegetación. El sustrato fue más estable y se observó un mayor de aporte de materia orgánica. Predominaron

en este transecto las familias, Cactacea, Mimosaceae, Fabaceae, Bombacaceae y Anacardiaceae.

En el perfil N°1, se puede considerar que el límite de vegetación permanente esta aproximadamente a los 20 metros de la línea de costa hacia el continente, donde inicia el transecto tres. Lo anterior, debido a que las especies identificadas a esta distancia conformaron una unidad vegetal más estable con relación a las identificadas en los dos transectos iniciales. Asimismo, se pudo observar un cambio en el tipo de material constitutivo y un cambio fisiográfico, es decir, en la forma de un transecto plano a uno con una inclinación o elevación (escarpe) iniciando el transecto 3, (figura 11), características que facilitan la demarcación del límite superior de la playa en este sector del área de estudio.

El perfil No. 2, inició en la coordenada 844889.1m. Este y 1653232.8m. Norte y finalizó en 844730.9m. Este y 1653306.1. Norte, también estuvo ubicado en la ortofoto N° 126 de Cartagena, con una longitud aproximada de 174.7 m (figura 12). A lo largo de todo el transecto 1 predominaron dos especies de manglar, características de la costa Caribe colombiana. Estas fueron *Rhizophora mangle L.* y *Avicennia germinans (L.) L.* conocidas como mangle rojo y negro respectivamente en la región. Teniendo en cuenta que sobre las ciénagas la DIMAR también ejerce su jurisdicción, este perfil fue trazado, con el fin de establecer también alrededor de la ciénaga, la delimitación del estrato sucesional de vegetación que permitiera, junto con los otros criterios técnicos contemplados en el Modelo Conceptual de jurisdicción, establecer la competencia de la autoridad marítima.

En el transecto uno de este perfil, también se observó bastante intervenido por la acción

antrópica. Dicha intervención se vio reflejada en la tala y cercado de áreas importantes de manglar para la construcción de pozas que permiten a los nativos del lugar, cultivar especies de peces como el sábalo.

En este caso la estratificación o estado sucesional vegetal del perfil se ajusta al propuesto para las zonas de manglar, observándose así en la zonas mas cercana a la ciénaga, el dominio de *R. mangle*, luego de *A. germinans* y a medida que se llega al continente donde el sustrato es más estable y poco inundado, algunos parches de *C. erectus*.

Iniciando el transecto 2, el cambio de vegetación es evidente, predominando las familias Crasulacea y Mimosáceas, características de ambiente mas continentales que cenagosos (figura 13). La primera de hábito herbáceo y la segunda arbórea, con sustratos más estables de grano fino y poco aporte de materia orgánica.

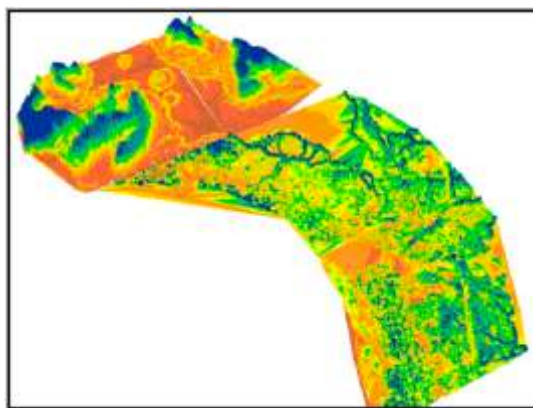


Figura 7. Modelo digital de elevación de estratos, generado con puntos de alturas de vegetación capturadas por el Sensor LIDAR del área de estudio, Cartagena - Colombia. Los tonos naranja corresponden a los estratos más bajos, mientras que los tonos de azul oscuro corresponden a los estratos más altos.

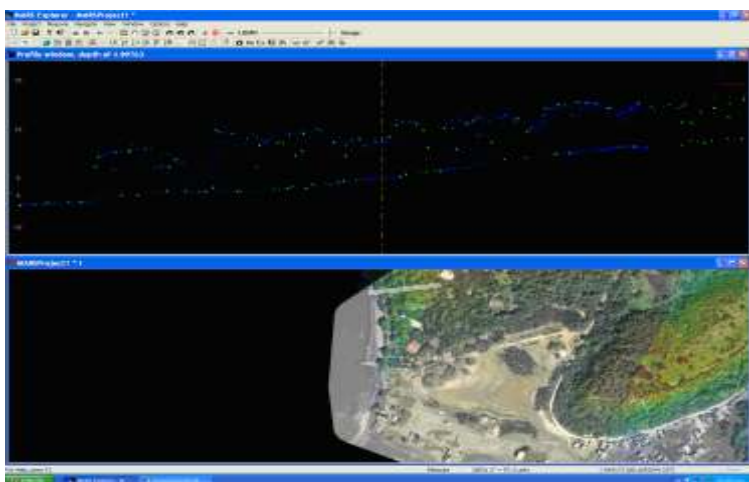


Figura 8. Localización perfil N°1. Sector los Morros. Extractado de datos LIDAR y de la ortofotografía para ubicación del sector.

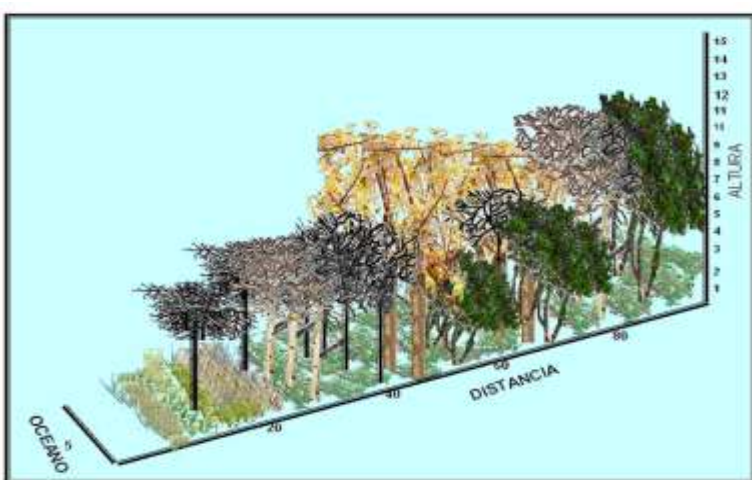


Figura 9. Distribución de la vegetación de la línea de costa hacia el continente. Perfil N° 1, ortofoto 126.

Iniciando el transepto 3, hacia el continente se observó una transición de especies herbáceas y arbustivas a estratos con características arbóreas típicas de la región. En este predominaron las familias Convolvulaceae, Boraginaceae, Poaceae, Cactaceae. Al igual que en el transepto anterior, el cambio de material constitutivo donde se establecen estas familias es de tamaño mas grueso, característica que igualmente influye en el tipo de vegetación que sobre éste se establece, (figura 14) y que por tanto permiten trazar una límite entre la transición de la vegetación del

manglar y la de características más continentales. De esta manera, iniciando el transepto se considera para este sector, que esta la delimitación de la línea de vegetación permanente.

En lo que respecta al perfil N° 3, se caracterizó por una asociación de *Rhizophora mangle* L., *Laguncularia racemosa* y *Avicennia germinans*. Dicho perfil estuvo localizado en la coordenada 844880.0m. Este con 1652871.5m. Norte y finalizó en 845127.5 m. Este con 1652989,1m. Norte. La longitud que alcanzo fue de aproximadamente 274 m., (figura 15).

El perfil fue generado en una región donde tanto la influencia marina como de la ciénaga fueron evidentes. Por esta razón, se quiso verificar la identificación de algún patrón característico de distribución en los estratos de vegetación que pudieran allí encontrarse y proporcionaran algún tipo de elemento técnico para definir el límite de vegetación permanente. Sin embargo, no se pudo encontrar evidencia de ningún rasgo característico que definiera el

límite, ya que en la transición de la Ciénaga hacia el océano, la presencia de especies de manglar como *L. racemosa* hace parte de los dos tipo de ambientes y por tanto, definir un limite no es adecuado.

En el área de este perfil se observó una distribución importante de *R. mangle*, ocupando áreas cercanas al cuerpo de agua, mientras que a medida que se alejaba de la orilla empezó a predominar *A. germinans*, seguida por *L. racemosa*, la cual se presentó en pequeños parches asociada tanto a *R. mangle* como a *A. germinanan*, (figura 16).

La distribución antes mencionada alcanza el océano, por lo cual definir el límite de vegetación permanente no es posible. Lo anterior, teniendo en cuenta que esta asociación de manglar hace parte de ambientes marinos y estuarinos, característica de la costa del Caribe colombiano. De este modo, se considera que estos sistemas hacen parte en su totalidad de la jurisdicción de la autoridad competente y no son factibles de ser delimitados.

El perfil generado con MARS, muestra una distribución similar a la representada en la figura 16, y uniforme a lo largo de todo este, (figura 17). Cabe mencionar que fisiográficamente el terreno es plano y no se observó marcado cambio de material constitutivo, razones por las cuales no es viable establecer la delimitación de la vegetación permanente.

En relación con el último perfil, el No. 4, fue ubicado en una zona donde la ocupación humana del territorio es significativa. En este perfil, los asentamientos humanos son numerosos, lo que fue tenido en cuenta para el desarrollo de este estudio, de manera que se pudo observar su influencia sobre el litoral; la cual se refleja en la gran cantidad de especies implantadas y la alteración total del ecosistema por actividades de relleno y construcción. El perfil inició en la coordenada 845226.9 m. Este con 1651742,8 m. Norte y finalizó en la 845418.5 m. Este con 1651746.4m. Norte. La longitud aproximada fue de 190 m. El sector corresponde al corregimiento de la Boquilla y fue extractado de la ortofoto 131 (figura 18).



Figura 10. Perfil N° 1 Generado con software MARS, en donde: a) manzanillo; b) estrato herbáceo; c) a d) vegetación mixta de hábito arbóreo.



Figura 11. Inicio del transecto 3, perfil N°1 del área de estudio. Sector Los Morros, Cartagena- Colombia. La línea azul define el "marcado cambio Fisiográfico" en el sector.

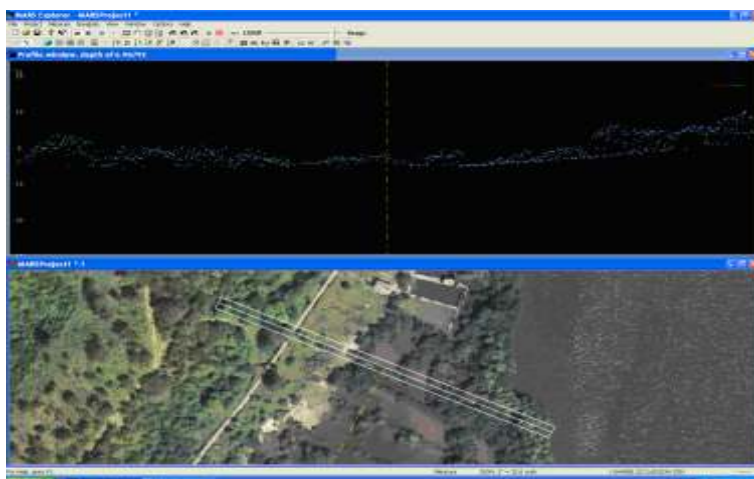


Figura 12. Perfil N° 2, del área de estudio. Sector Media Tapa, Cartagena- Colombia.

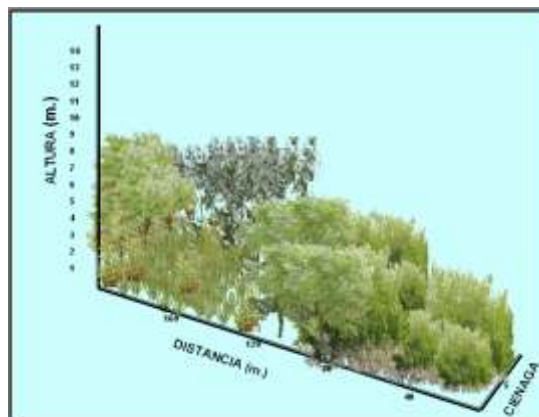


Figura 13. Distribución de la vegetación en el sector de Media Tapa, de la Ciénaga hacia el Continente. Perfil N° 2, ortofoto 126.



Figura 14. Perfil N° 2 Generado en MARS, con diferenciación clara de estratos de vegetación, de acuerdo con el tipo de sustrato donde se establecen.

Como se puede observar en la figura 18, al igual que en el perfil anterior, este sector no evidencia un cambio significativo de vegetación que se relacione con el perfil de referencia adoptado. Adicionalmente, la mayoría de especies identificadas, obedecen a plantas allí implantadas (figura 19), que no generan ningún tipo de información válida, para poder establecer el criterio técnico de delimitación, puesto que la transformación del terreno ha sido evidente y creciente a lo largo de los últimos años.

A lo largo de todo el perfil predominaron especies de plantas pertenecientes a las familias Bignoniaceae, Combretaceae, Papilionaceae y Poaceae, (figura 19). También, fue posible observar que fisiográficamente el terreno es plano, aunque con transformaciones producto de las actividades de relleno realizadas. Asimismo se observó que el tipo de material constitutivo se mantiene a lo largo de todo el perfil, de manera que en este lugar tampoco se puede establecer la delimitación de la vegetación permanente, ya que todo el lugar formaría parte de la jurisdicción de la autoridad marítima.

Con el perfil generado en MARS, se pudo observar el alto grado de ocupación humana en la zona (construcciones), que de algún modo han cambiado totalmente la distribución de la vegetación nativa, generando la transformación del área y por tanto, la imposibilidad de encontrar un patrón de vegetación comparable con el perfil de referencia adoptado, (figura 20).

Por otra parte, con el levantamiento de información en campo, el procesamiento de la información proporcionada por los sensores (LIDAR y la cámara digital) y la revisión bibliográfica de la zona, fue posible trazar el límite “aproximado” de vegetación en el área de estudio. Se

adjetiva como “aproximado”, debido a que en el sector central y sur, el alto grado de ocupación, humana y de transformación de estos, han influido en el cambio de las condiciones de la región.

En la región Noroeste, donde se ubico el perfil N° 1, con un grado de ocupación menor que en los demás, el límite de vegetación permanente fue trazado de acuerdo con la distribución de los estados sucesionales de la vegetación de playa allí presentes. Se tuvo como referencia de dicho límite al estrato arbustivo, el cual por referencias bibliográficas, desarrolla vegetación más estable. Este estrato arbustivo, dentro de la clasificación del modelo alcanza una altura máxima de 5 m. Cabe mencionar que en este lugar, se observó el patrón de distribución característico propuesto en el perfil de referencia adoptado, por lo tanto en esta área la delimitación del límite superior de la playa, se pudo determinar teniendo en cuenta no solo la identificación de vegetación permanente, sino la fisiografía del terreno y el tipo de material constitutivo.

Tomando como referencia el mismo estrato arbustivo, en las demás regiones del área de estudio se intentó trazar dicho límite. De la línea de costa hacia la ciénaga esta referencia funcionó para establecer una delimitación. Por el contrario, de la ciénaga hacia el mar, esta alternativa no fue la más adecuada, por cuanto el desarrollo del estado sucesional de las especies vegetales en un ecosistema de manglar obedece a otro tipo de características diferente a las de las zonas de playas. Adicionalmente todas las especies, incluidas las de la transición hacia el mar están consideradas dentro de la jurisdicción de la autoridad marítima (figura 21).

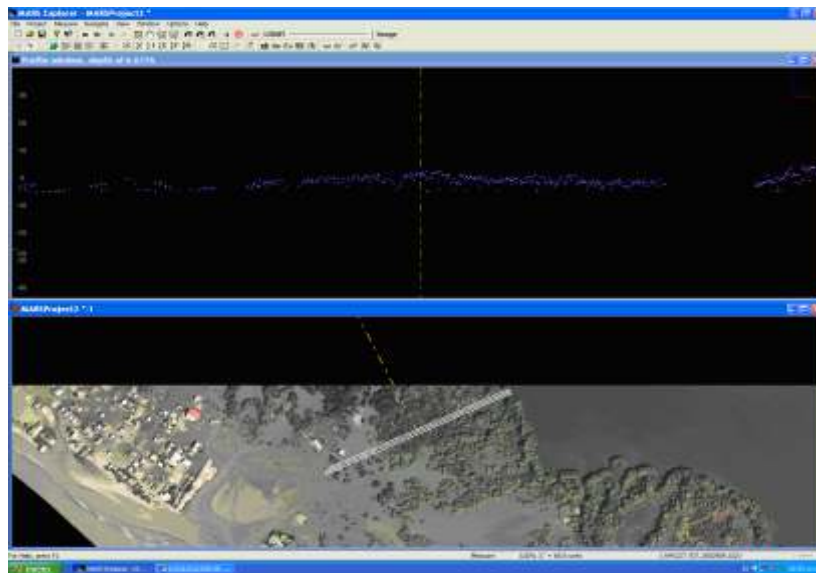


Figura 15. Perfil N° 3 del área de estudio. Sector Villa Gloria, Cartagena- Colombia.

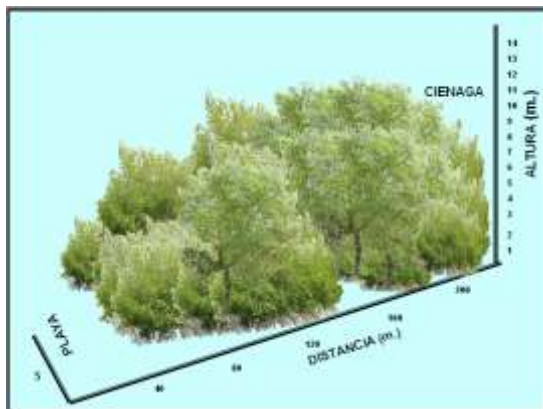


Figura 16. Distribución de la vegetación en el perfil N° 3, tanto del mar hacia la Ciénaga como de la Ciénaga hacia el mar. Ortofotos 128 y 129.



Figura 17. Perfil N° 3. Generado con software MARS, con un único estrato de vegetación.

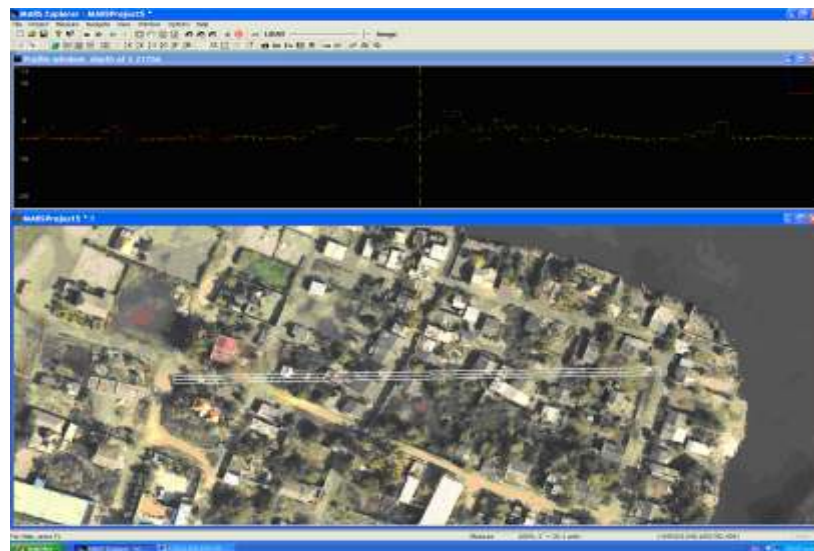


Figura 18. Perfil N° 4, del área de estudio. Sector La Boquilla, Cartagena- Colombia.

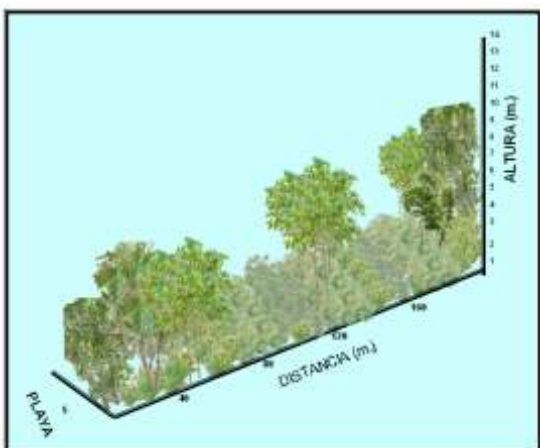


Figura 19. Distribución de la vegetación en el perfil N° 4. Ortofoto 131.



Figura 20. Perfil N° 4. Generado con el software MARS, en donde:
a) son construcciones con vegetación;
b) construcciones;
c) vegetación mixta.

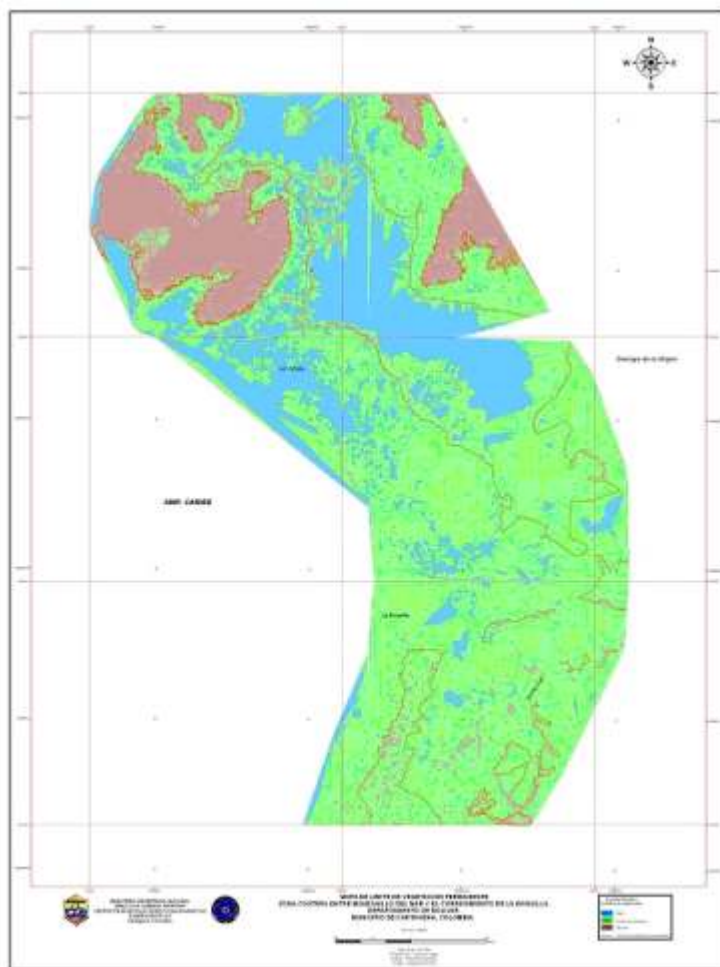


Figura 21. Mapa de delimitación de la línea de vegetación permanente para el sector entre los Morros y la Boquilla. Cartagena - Colombia.

Conclusiones

Fue posible generar un documento escrito y en formato digital correspondiente al procedimiento técnico, que permite paso a paso y de forma ordenada, trabajar la información proporcionada por los puntos del láser aerotransportado y, generar el mapa de vegetación permanente en una región costera determinada del Caribe colombiano. Lo anterior es importante si se tiene en cuenta que actualmente en todos los sectores se habla de la implementación de sistemas que faciliten las actividades de las empresas, mejoren su imagen, sean competitivas y sobre todo, que esté soportado en una evidencia no solo práctica sino documental y demostrable. De este modo, este estudio se constituye en una herramienta no solo desde del punto de vista

práctico del manejo de datos, sino en el soporte documental inicial de los procesos que desarrolla el área de manejo integrado de la zona costera del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas.

Con información proporcionada con el sensor aerotransportado LIDAR fue posible la generación de un mapa de vegetación permanente de playas para un sector costero del departamento de Bolívar, el cual junto con los

criterios definidos en el modelo conceptual permiten definir la jurisdicción de la Autoridad Marítima Nacional en esta región del litoral colombiano. Dicho mapa adicionalmente suministra información sobre el desarrollo sucesional de la vegetación de playas y ecosistemas de manglar, permitiendo establecer, por ejemplo, especies de transición entre dos sistemas de diferentes características (estuarino y de playas)

También fue posible la generación del modelo digital de terreno, que permite visualizar cambios en las condiciones fisiográficas del terreno, de manera que a partir de éste se puede obtener información sobre los lugares donde se identifiquen marcados cambios fisiográficos, soporte importante, enmarcado dentro del modelo conceptual para la definición de la Jurisdicción de DIMAR

Así mismo se generó el modelo de altura de la vegetación (DEM), con el cual se obtuvo información, acerca del grado actual de intervención antrópica en el sector estudiado. Esta herramienta en estudios o proyectos sobre gestión del litoral puede ser el soporte, para evitar que otras áreas de manglar y vegetación de playas en la región se sigan impactando.

Finalmente, los resultados obtenidos en la presente investigación permiten afirmar que la utilización simultánea de sensores remotos (LIDAR y cámara métrica digital), los conocimientos específicos de biología y la toma de datos de campo, conforman una herramienta de apoyo técnico que puede ser utilizada dentro del proceso de toma de decisiones sobre el control y administración de los litorales colombianos; no sólo por parte de la Autoridad Marítima Nacional, sino por parte de otras instituciones de diverso nivel, que tengan algún tipo de requerimiento de información técnica para el desarrollo de funciones relacionadas con los ambientes costeros colombianos.

Agradecimientos

Los autores expresan de manera muy sincera sus agradecimientos al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas CIOH y al TN Juan Carlos Gómez López, al S1 Alvaro Licona Marrugo y al S2 Nixon Javier Torres Otálvaro, quienes con su apoyo decidido, contribuyeron al buen logro de la presente investigación.

Referencias bibliográficas

- [1] Sánchez H, Álvarez R, Pinto F, Sánchez A, Pino J, García I, Acosta M. 1997. Diagnostico y zonificación preliminar de los manglares del Caribe de Colombia. Proyecto PD 171-91 Rev 2 (f) Fase 1. Colombia: Ministerio del Medio Ambiente- Organización Internacional de Maderas Tropicales; 1997.
- [2] Gueudet P, Maidment D, Neuenschwander A, Wells G. Influence of the post- spacing density of the lidar derived DEM on flood modeling. ASPRS Annual Conference Proceedings; 2004. Denver, USA.
- [3] Bettina Petzold, Peter Reiss, Wolfgang Stossel. Laser scanning - Surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 1999;54:95104.
- [4] Popescu Sorin C. Estimating Plot-Level Forest Biophysical Parameters Using small-footprint Airborne Lidar Measurements [PhD Thesis] Virginia: Virginia Tech; 2002.
- [5] Arias F. Colombia patria de tres mares. Condiciones oceanográficas del Caribe colombiano. ExpoLisboa/98; 1998; Lisboa, Portugal.
- [6] Douglas T, Evans D, Belli K, Roberts S. Classification of Pine and hardwood by the density and intensity of lidar canopy returns. ASPRS Annual Conference Proceedings; 2004; Denver, USA.
- [7] CIOH-CARDIQUE. Informe final proyecto "Caracterización y diagnostico de la zona costera desde Galerazamba hasta Bahía de Barbacoas y Censo franja Litoral". Convenio de cooperación entre el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas y la Corporación Autónoma regional del Canal del Dique. Cartagena: 1998.
- [8] Molina A., A. Pelgrain, J. Suzunaga y L. Giraldo. Comportamiento de la dinámica marina del sector Costero entre Galerazamba y Cartagena. Boletín Científico CIOH. 1996; 17: 73-78.

- [9] Friker P, Gervais F, Roth R, Lliren P, Delgado J, Cardenal J. Utilización de sensores aerotransportados para la generación de MDT y ortofotografías LHADS40 y LH ASLS40. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Grafica; 2002; Jun 5-7; Santander, España.
- [10] Villarreal H, Álvarez M, Córdoba S, Escobar F, Fagua G, Gast F, Mendoza H, Ospina M, Umaña A. Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. Colombia: Instituto de investigaciones de recursos Biológicos Alexander von Humboldt; 2004.
- [11] Romero R. Flora del Centro de Bolívar. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Instituto de Ciencias Naturales; 1965.
- [12] Komar Paul. Beach Processes and Sedimentation. Prentice Hall; 1998.
- [13] Chuvieco Emilio. Teledetección Ambiental: La observación de la tierra desde el espacio. Barcelona: Editorial Ariel; 2002.
- [14] Ruiz A, Kornus W. Experiencias y aplicaciones de LIDAR. Publicaciones Instituto Cartográfico de Cataluña. 2004.
- [15] Romero R. Plantas del Magdalena. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Instituto de Ciencias Naturales; 1966.
- [16] Andrade C. The circulation and variability of the Colombian Basin in the Caribbean Sea [PhD Thesis]. Wales: University of Wales; 2000.
- [17] IGAC. Adopción del marco geocéntrico nacional de referencia MAGNA SIRGAS como datum oficial de Colombia. Bogota: 2004.
- [18] Carson W, Andersen H, Reutebuch S, McGaughey R. LIDAR Applications in forestry an Overview. ASPRS Annual Conference Proceedings; 2004; Denver, USA.
- [19] David L A, Gaceau and Ross A. Hill. Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small footprint airborne laser scanning data. Canadian Journal of Remote Sensing. 2003;29(5):650-657.
- [20] Fujisaki I, Evans D. Forest stand classification using airborne lidar and landsat data: comparison of supervised classification and rule based classification using logist regression. ASPRS Annual Conference Proceedings; 2004; Denver, USA.
- [21] González F, Díaz J, Lowy P. Flora ilustrada de San Andrés y Providencia, con énfasis en las plantas útiles. Bogotá; 1995.
- [22] Gómez A, Delgado J, Pérez N. Obtención de DTM y DSM mediante Tecnología LIDAR, Aplicación al Río Ebro. 2004.
- [23] Hiratama, Y. The effects of footprint size and sampling density in airborne laser scanning to extract individual trees in Mountainous terrain. Japan: Kluber Academic Publishers; 2003.
- [24] Bryan J, David L, Rabine B, Michelle A Hofton. The Laser Vegetation Imaging Sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 1999:115122.
- [25] Kornus W, Ruiz A, Boran A, Tayala J. Strip Adjustment of LIDAR Data. V semana Geomatica; 2003. Barcelona, España.