

Estimación de biomasa con métodos no destructivos en bosque de *Quercus humboldtii* Bonpl.

Cesar Gerardo Correa Millán, Marly Yesenia Estupiñan Suárez

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Forestal

Director

Sandra Milena Díaz López

M.Sc en Manejo uso y conservación del bosque

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED

Programa de Ingeniería Forestal

Bucaramanga

2020

### **Agradecimientos**

A Dios por permitirnos culminar nuestro proceso educativo, acompañarnos y brindarnos su protección en cada momento de nuestras vidas.

Nuestros agradecimientos a la familia Ortiz López, por permitirnos realizar nuestro proyecto en su predio, y brindarnos el apoyo en la fase de campo.

A nuestros padres, Ana Clovis Millán Flórez y Vicente Correa, Betty Yamile Suárez Pinto y Hermes Estupiñan Lozano, y nuestros hermanos, por brindarnos el apoyo y la formación moral y en cada uno de nuestros procesos académicos, para ser personas que le contribuyan a la sociedad desde el ámbito personal y profesional.

A la Universidad Industrial de Santander, sede Málaga, por recibirnos y permitirnos realizar nuestro proceso de formación como Ingenieros Forestales y brindarnos las herramientas que requeríamos durante el mismo.

A nuestra directora M.Sc en Manejo uso y conservación del bosque Sandra Milena Díaz López por asesorarnos, brindarnos orientación y acompañarnos durante todas las fases de nuestro proyecto, su tiempo, dedicación y sobre todo sus aportes a nuestro conocimiento.

Al Ingeniero Electrónico Arnold Guarín Ramírez por permitirnos desarrollar parte de nuestro proyecto en conjunto con el suyo para obtener el título de M.Sc en Ingeniería de Telecomunicaciones.

A nuestros compañeros Adriana Herrera, Diego Rojas, Karol Duarte, Yorman Hernández, y al señor Hermes Estupiñan Lozano, por el acompañamiento y colaboración en la fase de campo.

## Tabla de Contenido

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Introducción .....                                         | 11 |
| 1. Objetivos .....                                         | 12 |
| 1.2. Objetivo General .....                                | 12 |
| 1.2. Objetivos Específicos.....                            | 12 |
| 2. Marco referencial .....                                 | 13 |
| 2.1. Marco histórico .....                                 | 13 |
| 2.2. Marco teórico .....                                   | 14 |
| 2.2.1. Bosques de roble. ....                              | 14 |
| 2.2.2 Biomasa y captura de carbono. ....                   | 15 |
| 2.2.3. Modelo de Auto semejanza. ....                      | 15 |
| 2.2.4. Ecuaciones Alométricas. ....                        | 16 |
| 2.2.5. Teledetección. ....                                 | 17 |
| 2.2.6. Funciones protectoras de los bosques de roble. .... | 20 |
| 2.3. Marco conceptual .....                                | 21 |
| 2.3.1. Quercus humboldtii Bonpl. ....                      | 21 |
| 2.3.2. Bosque.....                                         | 22 |
| 2.3.3. Robledal .....                                      | 22 |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.4. Biomasa.....                                             | 22 |
| 2.3.5. Dióxido de carbono.....                                  | 22 |
| 2.3.6. Volumen.....                                             | 23 |
| 2.3.7. Densidad.....                                            | 23 |
| 2.3.8. DAP .....                                                | 23 |
| 2.3.9. Alometría.....                                           | 23 |
| 2.3.11. Vehículos aéreos no tripulados VANTs.....               | 23 |
| 2.3.12. Imagen multi-espectral.....                             | 24 |
| 3. Metodología.....                                             | 24 |
| 3.1. Área de estudio.....                                       | 24 |
| 3.2. Cálculo del número de muestreo.....                        | 26 |
| 3.3. Establecimiento de parcelas .....                          | 27 |
| 3.4. Toma de datos .....                                        | 28 |
| 3.5. Calculo de densidad de la madera .....                     | 28 |
| 3.6. Análisis de composición florística del robledal .....      | 29 |
| 3.6.1. Índice de Valor de Importancia.....                      | 29 |
| 3.7. Estimación de la biomasa aérea en fustales .....           | 30 |
| 3.8. Conversión de biomasa aérea a carbono .....                | 32 |
| 3.9. Conversión del carbono a CO <sub>2</sub> equivalente ..... | 32 |
| 3.10. Método de auto semejanza.....                             | 32 |

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.10.1 Volumen inicial.....                                                       | 32 |
| 3.10.2. Nivel de repetición de la auto semejanza y nivel de ramificación.....     | 35 |
| 5.9.3 Volumen en cada nivel de ramificación.....                                  | 35 |
| 3.10.3 Cálculo de la masa.....                                                    | 36 |
| 3.11. Obtención se imágenes.....                                                  | 36 |
| 3.11.1. Cálculo del índice de vegetación.....                                     | 37 |
| 3.11.2. Relación entre biomasa y NDVI .....                                       | 37 |
| 4. Resultados .....                                                               | 38 |
| 4.1. Unidades muestrales.....                                                     | 38 |
| 4.2. Composición florística .....                                                 | 38 |
| 4.2.1. Índice de valor de importancia.....                                        | 39 |
| 4.2.2. Distribución por clase diamétrica.....                                     | 39 |
| 4.3. Estimación de la biomasa.....                                                | 40 |
| 4.4. Cálculo de carbono y carbono equivalente a partir de la biomasa .....        | 41 |
| 4.5 Autosemejanza.....                                                            | 42 |
| 4.6. Biomasa aérea en bosque de roble a partir de imágenes multi espectrales..... | 45 |
| 4.6.1. Índice de Vegetación Normalizada NDVI.....                                 | 45 |
| 4.6.2. Análisis de correlación de Pearson.....                                    | 46 |
| 5. Discusión.....                                                                 | 47 |
| 6. Conclusiones .....                                                             | 51 |
| 7. Recomendaciones.....                                                           | 51 |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| Referencias bibliográficas ..... | 53 |
|----------------------------------|----|

Apéndices (Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)

**Lista de Tablas**

|                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Ecuaciones alométricas obtenidas de la literatura y en la base de datos GlobAllomeTree para la especie <i>Quercus humboldtii</i> .....                                  | 30 |
| Tabla 2. Ecuaciones alométricas obtenidas de la literatura y en la base de datos GlobAllomeTree para Bosques dominados por <i>Quercus humboldtii</i> . ....                      | 31 |
| Tabla 3. Ecuaciones alométricas obtenidas de la literatura y en la base de datos GlobAllomeTree para las demás especies asociadas a bosques de <i>Weinmannia tomentosa</i> ..... | 31 |
| Tabla 4. Composición florística fustal .....                                                                                                                                     | 38 |
| Tabla 5. Carbono almacenado y carbono equivalente el área de estudio .....                                                                                                       | 42 |
| Tabla 6. Datos tomados en campo para el modelo de auto semejanza .....                                                                                                           | 42 |
| Tabla 7. Volúmenes por sección y ramificación.....                                                                                                                               | 43 |

### Lista de Figuras

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Esquema de autosemejanza en el árbol. ....                                   | 16 |
| Figura 2. Mapa localización bosque de roble en el municipio de Molagavita .....        | 25 |
| Figura 3. Ubicación geográfica municipio de Molagavita, Santander.....                 | 26 |
| Figura 4. Reconstrucción del volumen del árbol a partir de conos truncados. ....       | 33 |
| Figura 5. Ejemplo de la analogía de la semejanza entre triángulos rectángulos. ....    | 34 |
| Figura 6: Índice de Valor de Importancia .....                                         | 39 |
| Figura 7: Gráfica de frecuencias frente a clases diamétrica .....                      | 40 |
| Figura 8. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para el área de estudio. .... | 45 |
| Figura 9. Biomasa vs NDVI por parcela.....                                             | 46 |
| Figura 10. Biomasa vs NDVI por árbol.....                                              | 47 |

## RESUMEN

**Título:** Estimación de biomasa con métodos no destructivos en bosque de *Quercus humboldtii* Bonpl.

**Autor:** Cesar Gerardo Correa Millán, Marly Yesenia Estupiñan Suarez

**Palabras clave:** Carbono, Ecuaciones alométricas, Modelo de auto semejanza, Imágenes Espectrales, Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT), Índices de Vegetación, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

### Descripción:

Los robledales son bosques de gran importancia ya que ayudan a la mitigación del cambio climático con su captación de carbono, sirven como refugio de especies de fauna y flora, además prestan servicios ecosistémicos muy importantes. En este trabajo se hace referencia a la captación de carbono que tiene un bosque de roble en el Municipio de Molagavita, Santander, a través de un modelo no destructivo el cual se basa en ecuaciones alométricas para el bosque altoandino y para la especie *Quercus humboldtii*, como especie dominante de este ecosistema. Para conocer la biomasa aérea del bosque y de esta especie, se tomaron datos en campo como diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total del árbol, diámetro de copas y altura de la primera ramificación, también se estimó la biomasa por medio del método de auto semejanza propuesto por Meine van Noordwijk y Rachmat Muliapara en el 2002 y se realizó una comparación con los resultados del método de ecuaciones alométricas. La biomasa estimada con las ecuaciones alométricas se comparó con índices de vegetación hallados con imágenes de un vehículo aéreo no tripulado (VANT) a través del procesamiento de estas, por medio del programa QGIS. Mediante las ecuaciones alométricas se obtuvo una biomasa total del bosque de 224,76 Ton/ha y una biomasa de 4978.30 kg/Árbol para un roble, al compararla con el método de autosemejanza se obtuvo un valor de 953668.438 kg/Árbol, indicando que este método hace una sobreestimación de la biomasa y por ende no se recomienda usarlo, al realizar la comparación de los valores del índice de vegetación NDVI con las ecuaciones alométricas se observó que no hay una relación entre las dos variables.

---

\* Trabajo de Grado.

\*\* Instituto de proyección Regional y Educación a Distancia (IPRED). Programa de Ingeniería Forestal. Director: Sandra Milena Díaz López M. Sc en Manejo, uso y conservación del bosque.

## ABSTRACT

**Title:** ESTIMATION OF BIOMASS WITH NON-DESTRUCTIVE METHODS IN FOREST OF *Quercus humboldtii* Bonpl.

**Author:** Cesar Gerardo Correa Millán, Marly Yesenia Estupiñan Suarez

**Key Words:** Carbono, Ecuaciones alométricas, Modelo de auto semejanza, Imágenes Espectrales, Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT), Índices de Vegetación, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

## Description

The oak forests are of great importance since they help mitigate climate change with their carbon sequestration, serve as a refuge for species of fauna and flora, and provide very important ecosystem services. This paper refers to the carbon sequestration of an oak forest in the Municipality of Molagavita, Santander, through a non-destructive model which is based on allometric equations for the High Andean forest and for the *Quercus humboldtii* species, as the dominant species of this ecosystem. To know the aerial biomass of the forest and of this species, data were taken in the field such as diameter at breast height (DBH), total tree height, canopy diameter and height of the first branch, the biomass was also estimated by means of the self-similarity method proposed by Meine van Noordwijk and Rachmat Muliapara in 2002 and a comparison was made with the results of the method of allometric equations. The biomass estimated with the allometric equations was compared with vegetation indices found with images of an unmanned aerial vehicle (UAV) through their processing, with the QGIS program. Through the allometric equations a total forest biomass of 224.76 Ton / ha and a biomass of 4978.30 kg / Tree for an oak was obtained, when compared with the self-similarity method a value of 953668.438 kg / Tree was obtained, indicating that this method overestimates the biomass and therefore it is not recommended to use it, when comparing the values of the NDVI vegetation index with the allometric equations it was observed that there is no relationship between the two variables.

---

\* Brachelor Thesis.

\*\* Instituto de proyección Regional y Educación a Distancia (IPRED). Programa de Ingeniería Forestal. Director: Sandra Milena Díaz López M. Sc en Manejo, uso y conservación del bosque.

## Introducción

Teniendo en cuenta el creciente aumento de las concentraciones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmosfera, causada por las grandes emisiones de gases de efecto invernadero, ligado a la problemática de cambio en el uso del suelo, deforestación y degradación de los bosques en el mundo, resulta prioritario orientar esfuerzos hacia la generación de información para que la comunidad y las autoridades ambientales puedan generar acciones que contribuyan a la conservación de los bosques y a la recuperación de sus bienes y servicios ecosistémicas como son la captura y almacenamiento de carbono (C) (Cárdenas, 2014).

Una alternativa biótica para reducir la cantidad de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera es el ciclo del C, ya que este gas es absorbido por la vegetación mediante el proceso de la fotosíntesis, y que además las plantas funcionen como almacén de C en forma de biomasa vegetal que después se convierte parcialmente en materia orgánica. Conocer la cantidad de biomasa de las especies arbóreas es necesario para estimar la cantidad de C que captura un bosque, proceso que representa actualmente un servicio ambiental y, por tanto, constituye una alternativa para el manejo de recursos naturales encaminada al desarrollo sustentable, y también para la obtención de algún bien para los propietarios de tales recursos (Avendaño, Acosta, Carrillo, & Etchevers, 2009).

Por esta razón el presente trabajo se realizó con el fin de estimar la biomasa aérea que se encuentra en el bosque de roble y C almacenado por este bosque, a su vez se evaluó la posibilidad de usar un vehículo aéreo no tripulado, el cual nos permite tomar imágenes multiespectrales de un lugar para posteriormente hacer un estudio del mismo, además estimar la biomasa con imágenes multiespectrales usando índices de vegetación que permitan facilitar el estudio de los bosques para la conservación y uso sostenible.

## **1. Objetivos**

### **1.2. Objetivo General**

Estimar la biomasa aérea y el carbono almacenado por bosques de *Quercus humboldtii* usando métodos no destructivos.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Conocer la composición florística del área de estudio.

Estimar la biomasa aérea del robledal mediante el método de autosemejanza y ecuaciones alométricas.

Analizar las imágenes multiespectrales de un vehículo aéreo no tripulado para calcular un índice de vegetación y estimar la biomasa aérea.

Comparar la biomasa estimada mediante ecuaciones alométricas con los valores del índice de vegetación.

## 2. Marco referencial

### 2.1. Marco histórico

(Pérez & Díaz, 2010) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas del programa de Ingeniería Forestal en su trabajo titulado “*Estimación del carbono contenido en la biomasa forestal aérea de dos bosques andinos en los departamentos de Santander y Cundinamarca*” realizan la estimación de biomasa aérea y carbono en dos bosques, uno dominado por *Quercus humboldtii* y el otro por *Weinmannia tomentosa*, mediante un método indirecto basado en la cubicación en pie del árbol con base en medidas euclidianas y la proyección de las ramas mediante la validación de un modelo de auto semejanza, de las cuales obtuvieron 20 ecuaciones alométricas y fueron ajustadas para el cálculo de biomasa, con base en la biomasa estimada estimaron el carbono con la metodología propuesta por Orrego et al (2003). Concluyen afirmando que este método es más acertado que los métodos existentes en las diferentes literaturas, además de ser este el cual reduce el impacto en un 100% provocado por los métodos directos.

Meine van Noordwijk,, Rachmat Mulia del ICRAF South East Asia Regional Research Program, en su trabajo titulado “Functional branch analysis as tool for fractal scaling above- and belowground trees for their additive and non-additive properties” en este estudio proponen la metodología de estimar el volumen de un árbol por la medida de sus ramificaciones tanto superiores como inferiores, utilizaron cincuenta fracciones de ramificación para estimar la escala general de la ramificación donde toman la mediciones de los diámetros y el largo de las ramas, concluyen que este método es un método asertivo para esas estimaciones pero recomienda que se tomen cien ramificaciones para menos efecto de un error al general las ecuaciones.

C. Aguas (2016) de la Universidad Nacional de Colombia de la escuela de Geo ciencias y Medio Ambiente mediante su trabajo titulado “*Estimación de biomasa aérea forestal en bosque de robledales del altiplano norte de Antioquia, utilizando teledetección*” realiza la estimación de biomasa forestal de un bosque muy húmedo montano bajo en Antioquia, mediante la estimación en campo con ecuaciones alométricas y también con imágenes satelitales con diferentes índices de vegetación, el en su estudio concluye que puede llegar a ser complicado llegar a establecer una relación entre las dos formas de estimar biomasa pero que este sería un buen referente para futuros trabajos los cuales apunte a esta línea.

## 2.2. Marco teórico

**2.2.1. Bosques de roble.** Los robledales dominados por *Quercus humboldtii* son uno de los ecosistemas más singulares de los bosques andinos de Colombia y se encuentran distribuidos en 18 departamentos entre los 750 y los 3450 m de altitud, lo cual les confiere alta importancia desde el punto de vista natural, ya que ofrece una amplia variedad de servicios ecosistémicos con posibilidades de restauración, manejo y uso sostenible de los bienes y servicios ambientales. Con el precedente de la veda sobre el roble establecida por el INDERENA en 1974, el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), declaró en todo el territorio nacional la veda para su aprovechamiento forestal (Resolución 096 de 2006). Al mismo tiempo, se considera el uso sostenible como un mecanismo para su conservación, para lo cual se designó a las autoridades ambientales regionales, realizar estudios técnicos que evalúen las posibilidades de su uso sostenible (Avella & Cárdenas, 2010).

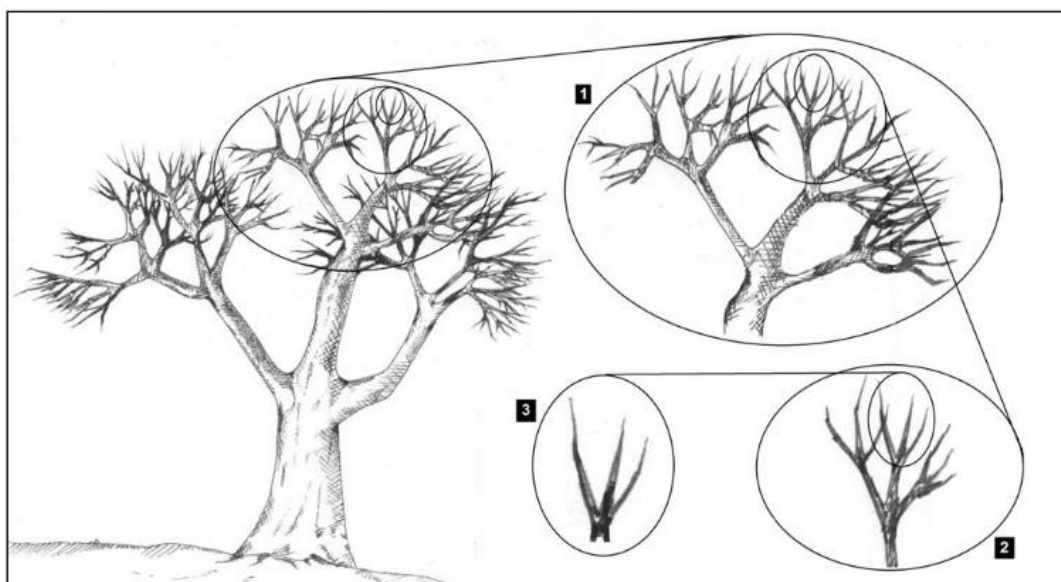
**2.2.2 Biomasa y captura de carbono.** La acumulación de carbono es influenciada principalmente por factores físicos, edáficos y por patrones de disturbio que afectan la estructura comunitaria y las reservas de biomasa y carbono en los bosques tropicales (Vásquez & Arellano, 2012). La variación de la estructura y de los patrones de distribución de biomasa en los bosques tropicales se asocian principalmente con gradientes latitudinales y altitudinales que se relacionan con las diferencias climáticas, con las características físicas y químicas de los suelos, las condiciones topográficas y con las condiciones de humedad del suelo.

Aunque los métodos directos son los más comunes ya que tradicionalmente se han usado para la determinación de la biomasa de árboles, no se adecuan al medio ambiente natural pues llevan implícita la tala de muchos árboles y mayores requerimientos de tiempo y laboriosidad para su procedimiento (Pérez & Díaz, 2010).

**2.2.3. Modelo de Auto semejanza.** Los árboles presentan hasta cierta altura un fuste definido, sin embargo, esto se pierde a medida que va teniendo una ramificación, el modelo de auto semejanza propone que un árbol va a tener la misma forma de ramificarse en cada una de estas, lo que quiere decir que el árbol se verá como una representación a escala mayor de una rama, ésta siempre va a llevar el mismo patrón de ramificación desde la primera ramificación hasta llegar al compartimiento de las hojas.(Pérez & Díaz, 2010) (Figura 1)

Los árboles presentan un comportamiento donde mientras va aumentando el número de ramificaciones va disminuyendo la escala de manera exponencial. Dentro del árbol no solo las ramificaciones presentan esta autosemejanza así mismo con el volumen y la biomasa de un árbol (Jauregui Valarezo, 2016).

Este principio de autosemejanza indica que se conoce el volumen que tiene una parte de árbol, se puede estimar el volumen restante, esto se conoce con tan solo unas medidas de las ramificaciones principales de un árbol y conocer la escala que determina el tamaño de las ramificaciones (Van Noordwijk & Mulia, 2002).



*Figura 1.* Esquema de autosemejanza en el árbol. Adaptada de Pérez, M., & Díaz, J. (2010). Estimación del carbono contenido en la biomasa forestal aérea de dos bosques andinos en los departamentos de Santander y Cundinamarca. (Tesis de pregrado) Universidad distrital Francisco Jose de Caldas, Bogotá, Colombia.

**2.2.4. Ecuaciones Alométricas.** La estimación de la biomasa mediante ecuaciones alométricas es el paso intermedio para llegar a la estimación de la cantidad de carbono almacenado por un bosque, este método se realiza generando ecuaciones ajustadas a los diferentes datos tomados en los inventarios forestales, los cuales ayudan a predecir el volumen del árbol, y eso conlleva a evaluar la biomasa de un determinado bosque.

**2.2.5. Teledetección.** La Teledetección de recursos naturales se basa en un sistema de adquisición de datos a distancia sobre la biósfera, que está basado en las propiedades de la radiación electromagnética y en su interacción con los materiales de la superficie terrestre (Sacristán Romero, 2006). Todos los elementos de la naturaleza tienen una respuesta espectral propia que se denomina “signatura espectral”. La Teledetección estudia las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas, y pone de manifiesto las correlaciones existentes entre éstas y las características de los diferentes materiales terrestres. Su objetivo esencial se centra en la identificación de los materiales de la superficie terrestre y los fenómenos que en ella se operan a través de su signatura espectral (Sacristán Romero, 2006).

Al analizar los referentes de este estudio se encuentran diferentes investigaciones que tienen como característica principal el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la teledetección aplicada al funcionamiento y monitoreo de los bosques basados en estimación de biomasa aérea, resaltando que la medición de la biomasa es necesaria para estimar la reserva de carbono presente en las plantas (Aguas, 2016).

**2.2.5.1. Sensores remotos.** Las imágenes satelitales capturan información espacial de forma indirecta, los datos son almacenados en matrices, cada elemento de imagen (píxel) tiene un valor proporcional a la reflectancia de cobertura del suelo.

El píxel es la unidad visual más pequeña que se puede representar en una imagen de satélite. El sensor detecta la radiación media de un objeto sobre la superficie equivalente al tamaño del píxel. Este valor se traduce a un dato numérico (nivel digital), el cual se representa con un valor de color en la pantalla (nivel visual). El arreglo de varios píxeles genera la imagen que se puede interpretar como una matriz con coordenadas de fila y columna.

El procedimiento digital se define como un conjunto de tecnologías orientadas a la recopilación y tratamiento de información espacial con un objeto específico. Se basa en que cada objeto o tipo de cobertura emite un espectro electromagnético específico, en función de su propia naturaleza y de la radiación que recibe. La reflectancia de un objeto o tipo de cobertura a lo largo de todo el espectro electromagnético se denomina firma espectral, se supone que cada objeto está caracterizado por una firma espectral concreta, que lo distingue de los demás.

A medida que la vegetación crece sobre un tipo de suelo determinado, disminuye la reflectividad en el rojo y aumenta en el infrarrojo cercano, por lo que podemos separar los sitios con cubierta vegetal de los sitios con suelo expuesto.

La reflectividad de las cubiertas vegetales es influenciada por factores externos, como características ópticas y distribución espacial de sus componentes, por ejemplo, el suelo y sus proporciones. La teledetección tiene el reto de medir la reflectividad de la vegetación, con independencia de otros factores que perturban la señal radiométrica. Es necesario derivar un parámetro a partir de la reflectividad, que normalice la influencia de los factores perturbadores. La solución a este problema se ha abordado por medio de los índices de vegetación (Soto, 2011).

**2.2.5.2. Índices de vegetación.** La cobertura vegetal fue uno de los primeros focos de la investigación, evaluación y manejo de recursos naturales, usando imágenes de satélite, especialmente a partir del lanzamiento de la serie LANDSAT en 1972. Los sistemas satelitales de observación de la Tierra, LANDSAT, SPOT y NOAA entre otros, ofrecen imágenes multi temporales que son usadas ampliamente, para evaluar y monitorear el estado de la vegetación, en los niveles global, regional, nacional y local. Para lograr esto, la información satelital entregada a través de una imagen multi banda que debe ser categorizada y agrupada, para permitir discriminar

un área con características particulares de otra. Una forma de expresar esta categorización o agrupamiento es mediante la elaboración de índices (Muñoz, 2013a).

Un índice de vegetación se define como un parámetro calculado a partir de operaciones matemáticas entre los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Gilabert, Gonzalez-Piqueras, & Garcia-Haro, 1997).

Corresponde a un número generado por alguna combinación de bandas espectrales y que puede tener alguna relación con la cantidad de la vegetación presente en un píxel dado. Estos índices, son utilizados para mejorar la discriminación entre el suelo y la vegetación, reduciendo el efecto del relieve en la caracterización espectral de las diferentes cubiertas (Muñoz, 2013b).

*2.2.5.2.1. Índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI).* El NDVI es el más conocido y utilizado para todo tipo de aplicaciones. La razón fundamental su sencillez de cálculo y disponer de un rango de variación fijo (entre  $-1$  y  $+1$ ), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes.

Valores muy bajos de 0,1, corresponden a suelos desnudos, áreas arenosas o nevadas, zonas urbanas, carreteras. Valores de 0,2 a 0,3 pueden corresponder a áreas pobres con arbustos o pasturas naturales y valores mayores a 0,3 corresponden a praderas, cultivos, forestaciones, bosques, etc, dependiendo el valor alcanzado. Sin embargo, tiene el inconveniente de ser sensible a la reflectividad del suelo sobre el que se sitúa la planta, lo que limita su potencial de discriminación.

El NDVI integra el comportamiento espectral de los tejidos fotosintéticos: la baja reflectancia en longitudes de onda correspondientes al rojo (debido a la absorción por parte de la clorofila) y

la alta reflectancia en la porción del infrarrojo cercano (debido a la estructura del mesófilo de las hojas). El NDVI se calcula como:

$$\text{NDVI} = (\text{IR} - \text{R}) / (\text{IR} + \text{R})$$

En donde R: Banda del Rojo.

IR: Banda del Infrarrojo cercano.

El NDVI tiene una fuerte relación con la biomasa, el índice de área foliar (IAF) o la productividad primaria neta aérea. El NDVI se usa en estudios de ecología regional, que en Iberoamérica incluyen clasificaciones de tipos de cobertura, definición de Tipos Funcionales de Ecosistemas, evapotranspiración, estimaciones de densidad de herbívoros o de sus parámetros demográficos. (Paruelo, 2008).

**2.2.6. Funciones protectoras de los bosques de roble.** De acuerdo con FAO (2004), los objetivos del manejo forestal en América Latina varían de país a país, pero generalmente en los bosques naturales los principales objetivos de manejo y ordenación son la conservación de la biodiversidad, de las cuencas hidrográficas y la producción de madera (Avella & Cárdenas, 2010). El recurso hídrico es un factor el cual es muy importante en la sociedad, se establece que los bosques alto andinos son aquellos que constantemente presentan nubes o niebla en constante movimientos, son estos bosques los encargados de extraer la humedad la cual hace parte las precipitaciones, el volumen de agua que captura oscila entre un 5% y 20% aunque es claro que puede variar dependiendo la época del año en la que se encuentre, es por estas razones que el bosque alto Andino de Roble es de gran importancia ya que se le atribuyen varios factores principales como la regulación hídrica, protección de suelos y biodiversidad (Avella, 2016).

## 2.3. Marco conceptual

**2.3.1. *Quercus humboldtii* Bonpl.** Es un árbol de lento crecimiento y gran porte que alcanza alturas de 40 m. Su fuste es recto y cilíndrico, con diámetro a la altura del pecho (DAP) entre 40 a 70 cm, su corteza de color negruzca, en estado juvenil es lisa y en estado adulto exfoliable (Fernandez, 2014).

La madera es dura y pesada, duramen de color amarillo oscuro o grisáceo, los radios conspicuos, en los cortes longitudinales son de color marrón claro, olor y sabor no distintivos, grano recto, textura gruesa, veteado acentuado por los radios conspicuos, lustre bajo, resistente a la pudrición en contacto con el suelo (Fernandez, 2014).

Su copa es globosa y densa, y presenta yemas vegetativas de posición lateral, protegidas por catafilos o escamas ciliadas. Las hojas son simples, alternas, enteras, lanceoladas, coriáceas y delgadas, ápice agudo, base cuneada 10 a 20 cm de largo. El haz glabro y un poco lustroso y la base de la nervadura central algo tomentosa. Las flores son de color crema, presenta inflorescencias masculinas amentoides, con estambres numerosos, cada uno con dos sacos polínicos. Las flores femeninas tienen el cáliz cuculiforme, que una vez formado el fruto lo recubre en forma parcial (Nieto & Rodríguez 2004).

Los frutos tienen forma de cápsula (bellota), leñosa blanquecina de 2 a 4 cm. de largo y 2,0 a 2,5 cm de ancho, redondeada u ovada y está incluida dentro de una cúpula escamosa, su periodo de fructificación es anual (Mahecha, Ovalle, Camelo, Rozo, & Delfiin, 2012).

**2.3.2. Bosque.** Terreno de extensión superior a 0,5 hectáreas con árboles de altura superior a 5 metros y una cubierta de copas de más del 10 por ciento, o árboles capaces de alcanzar estos umbrales *in situ* (FAO).

**2.3.3. Robledal.** Nombre que se le asigna a un área de bosque el cual se encuentra dominado por la especie roble *Quercus humboldtii*.

**2.3.4. Biomasa.** Cantidad o masa de materia orgánica procedente de organismos vivos que se puede encontrar en un lugar. Es importante conocer la biomasa forestal para elaborar previsiones sobre el ciclo del C, que es un elemento de importancia en los estudios sobre el cambio climático. (FAO).

La biomasa forestal se define como el peso (o estimación equivalente) de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima o por debajo del suelo. Normalmente se cuantifica en toneladas por hectárea de peso verde o seco. Es frecuente separarla en componentes, donde los más típicos corresponden a la masa del fuste, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta (Schlegel, Gayoso, & Guerra, 2000)

**2.3.5. Dióxido de carbono.** Gas incoloro, inodoro e incombustible que se encuentra en baja concentración en el aire que respiramos (en torno a un 0,03% en volumen). La atmósfera contiene dióxido de carbono en cantidades variables, aunque normalmente es de 3 a 4 partes por 10.000, y aumenta un 0,4% al año. Es utilizado por las plantas verdes en el proceso conocido como fotosíntesis, por el cual se fabrican los carbohidratos, dentro del ciclo del carbono.

**2.3.6. Volumen.** Es el espacio ocupado por la madera de un individuo arbóreo dentro de un ambiente o ecosistema. El volumen total se define como la cantidad de madera estimada en metros cúbicos a partir del tocón hasta el ápice del árbol. (Gutiérrez, Moreno, & Villota, 2013).

**2.3.7. Densidad.** La densidad es la relación entre la masa y el volumen. La masa y el volumen de la madera están muy relacionadas con el contenido de agua, por lo que es imprescindible medir siempre la densidad en condiciones concretas. Normalmente, se mide con una humedad del 12%. La densidad es una característica propia de cada tipo de árbol.

**2.3.8. DAP.** El Diámetro Normal (d) o DAP del árbol se mide a 1,30 metros sobre el nivel del suelo y su medición depende del tipo de terreno y la forma del fuste. Como instrumentos de medida se utiliza la forcípula, la cinta diamétrica o la cinta métrica (Gutiérrez et al., 2013).

**2.3.9. Alometría.** Relación estadística, a escala de una población, entre dos características de tamaño de los individuos de dicha población. Esta relación suele ser una forma de potencia (Picard, Saint-André, & Henry, 2012).

**2.3.11. Vehículos aéreos no tripulados VANTs.** Un vehículo aéreo no tripulado (VANT), UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o comúnmente dron, también se denomina RPA (Remotely Piloted Aircraft) es una aeronave que vuela sin tripulación. Un VANT es un vehículo sin tripulación reutilizable, capaz de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado y sostenido, y propulsado por un motor de explosión, eléctrico o de reacción.

**2.3.12. Imagen multi-espectral.** Una imagen multi-espectral es la que captura datos de imágenes dentro de rangos de longitud de onda específicos a través del espectro electromagnético. Las longitudes de onda pueden estar separadas por filtros o mediante el uso de instrumentos sensibles a longitudes de onda particulares, incluida la luz de frecuencias más allá del rango de luz visible, como infrarrojo y ultravioleta. La obtención de imágenes espectrales puede permitir la extracción de información adicional que el ojo humano no captura con sus receptores rojo, verde y azul.

### **3. Metodología**

Este estudio se realizó bajo la metodología analítico-cuantitativa.

#### **3.1. Área de estudio**

El bosque de roble a estudiar se encuentra localizado en el departamento de Santander, Ubicado en la república de Colombia en jurisdicción del municipio de Molagavita, vereda Potrero de Rodríguez entre las coordenadas  $6^{\circ}39'45,05''$  –  $6^{\circ}39'58,51''$  sentido SN y  $72^{\circ}46'24,00''$  –  $72^{\circ}46'53,69''$  sentido EW. Con un área de 17,5 ha y un perímetro de 2,60 km. El bosque está localizado en la finca los Cinchos (Figura 2). Cuenta con una temperatura promedio de  $13^{\circ}\text{C}$  y una precipitación promedio de 1550 mm anuales (Ortiz & Salazar, 2018) con altitudes desde 2650 hasta 2869 msnm. De acuerdo con la clasificación de zonas de vida según Holdridge (1987) corresponde a un bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB) (ver apéndice A).

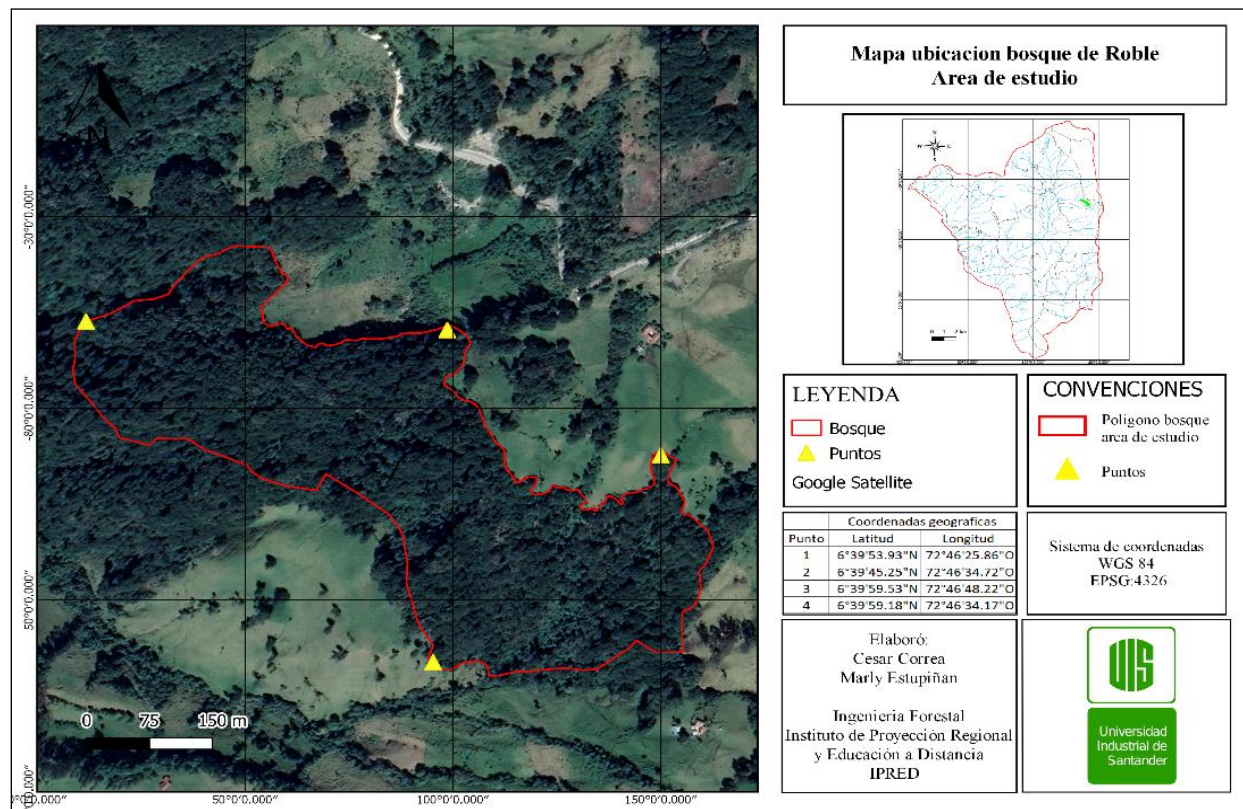


Figura 2. Mapa localización bosque de roble en el municipio de Molagavita

El municipio de Molagavita se encuentra ubicado en el departamento de Santander, provincia de García Rovira (Figura 3). Limita al norte con el municipio de San Andrés, al este con Málaga y San José de Miranda, al sur con el municipio de Covarachia departamento de Boyacá, y al oeste con Curiti, Mogotes, San Joaquín y Onzaga. La cabecera municipal se encuentra localizada a los 6°40'25"N 72°48'33"O.

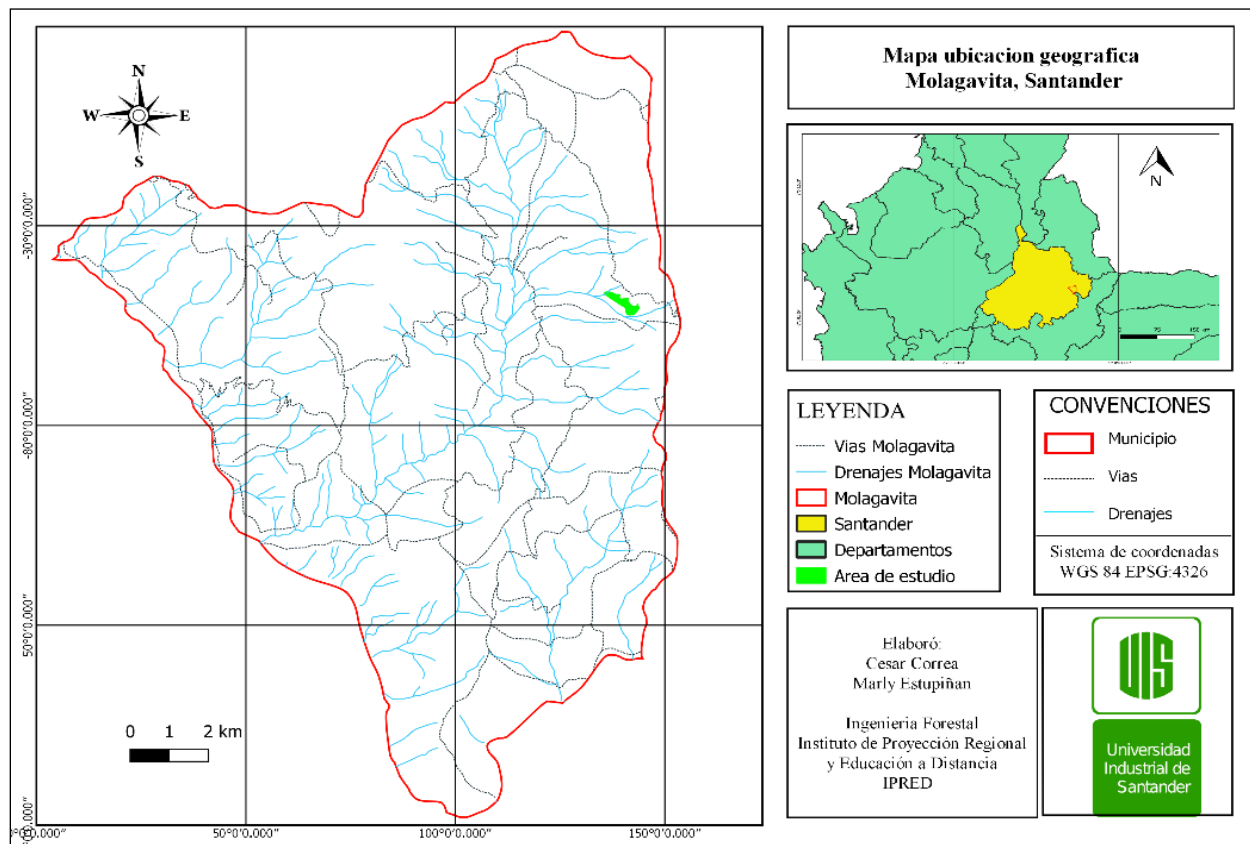


Figura 3. Ubicación geográfica municipio de Molagavita, Santander.

### 3.2. Cálculo del número de muestreo

Para determinar el número de unidades de muestreo se conoció el sitio, viendo las condiciones del lugar, se toma la decisión de establecer parcelas cuadradas de 25 x 25 m las cuales permitieran un fácil establecimiento por su tamaño teniendo en cuenta la pendiente que presenta el bosque.

Teniendo en cuenta el área del bosque a estudiar, se realizó el cálculo de muestreo propuesto por (Ferreira, 2005) en el cual conociendo el área total (AT), el tamaño de parcela (tp) y la intensidad de muestreo de un 10%, se efectuó el cálculo para conocer la cantidad de parcelas a establecer, lo cual arrojó como resultado 28 parcelas. Esto coincide con lo propuesto por (Yepes

et al., 2011) donde hace una recopilación de datos a nivel nacional para la estimación de biomasa e indica que se debe tener en cuenta para una estimación de biomasa a nivel local un error de muestreo máximo de un 10%, donde se encontró en este caso para las 28 parcelas de 625 m<sup>2</sup> un error de muestreo de 8,737 el cual es inferior al recomendado (ver apéndice B).

$$Am = I * AT$$

$$n = \frac{Am}{Tp}$$

### 3.3. Establecimiento de parcelas

Se establecieron 28 parcelas temporales con un tamaño de 25 x 25 m (625m<sup>2</sup>). Para conocer la ubicación de cada parcela se realizó un muestreo aleatorio con la ayuda del software Qgis, el cual arrojó las coordenadas donde debían quedar ubicadas las parcelas dentro del área de estudio (ver apéndice C). Durante el montaje de las parcelas, debido a la pendiente que presentaba el terreno, hubo la necesidad de realizar la corrección por pendiente mediante el método indirecto, este se basa en la diferencia de alturas existente entre dos puntos y la distancia horizontal requerida, para calcular la distancia diagonal que al ser proyectada en el plano horizontal sea de 25 m (Vallejo-Joya et al., 2005).

Para el levantamiento de las parcelas se utilizaron, estacas de un metro de altura, cabuya de fibra, brújula, cinta métrica. No se establecieron subcuadrantes dentro de las parcelas ya que únicamente se midió la clase fustal.

### 3.4. Toma de datos

Se realizó la numeración de los individuos que se encontraban dentro de las parcelas, a los cuales se les tomo la información correspondiente: especie, DAP, diámetro de copa, altura total, altura a la primera ramificación, y coordenadas geográficas de cada individuo, todo esto quedó plasmado en las carteras de campo (ver apéndice F).

DAP: Se registró el DAP, este se realizó con la ayuda de una cinta diamétrica, en el caso de árboles muy grandes se midió el CAP con una cinta métrica y luego se realizó la respetiva conversión (Yepes et al., 2011). Según las características de cada árbol como: malformaciones a la altura del pecho, bifurcaciones antes de 1,30 m, inclinación del terreo, se realizó la medición de acuerdo a cada situación (Gutiérrez et al., 2013).

Altura total: Se realizó con ayuda de un hipsómetro Suunto. Además, se tomó en cuenta la medida del diámetro de la copa para cada árbol y se estimó la altura que tiene desde el suelo hasta su primera ramificación (ver apéndice G).

### 3.5. Calculo de densidad de la madera

Para determinar la densidad de la madera de la especie *Quercus humboldtti*, se procedió a tomar muestras con el barreno (tarugos) de tres árboles en diferentes parcelas, luego se llevaron al laboratorio para su respectivo análisis. El volumen de cada tarugo se halló asumiendo que estos son de forma cilíndrica y se aplica la fórmula del volumen de un cilindro, el peso en seco se determinó introduciendo los tarugos al horno por 24 hr a una temperatura de 103°C para obtener un peso estable de las muestras.

Para el análisis de la densidad se dividió el peso medido en seco de todos los tarugos en el volumen medido en verde de estos.

$$d = \frac{\text{peso seco}}{\text{volumen verde}}$$

### 3.6. Análisis de composición florística del robledal

Comprende el análisis de la composición florística del robledal referente al Índice de Valor de Importancia (IVI).

**3.6.1. Índice de Valor de Importancia.** De acuerdo con (Cottam & Curtis, 1956) el IVI permite determinar cuál es la ocurrencia o dominancia de las especies presentes en un ecosistema así como el grado de heterogeneidad del mismo. El IVI se obtiene de la sumatoria de la Frecuencia relativa, Abundancia Relativa y Dominancia Relativa

$$IVI = Fr + Ar + Dr$$

Donde:

Fr = Frecuencia relativa

$$Fr = \frac{\text{Frecuencia de la especie}}{\text{Frecuencia de todas las especies}} \times 100$$

Ar = Abundancia relativa

$$Ar = \frac{\text{Número de individuos de la especie}}{\text{Número total de individuos}} \times 100$$

Dr = Dominancia relativa

$$Dr = \frac{\text{Dominancia de la especie}}{\text{Dominancia de todas las especies}} \times 100$$

### 3.7. Estimación de la biomasa aérea en fustales

Luego de haber realizado la toma de datos en campo, se aplicaron las ecuaciones alométricas encontradas en la literatura que cumplieran con las condiciones del sitio y de las especies presentes en el bosque y teniendo en cuenta que éstas brindaran un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) alto.

Para la validación de las ecuaciones de biomasa existente o reportadas por la literatura, y posteriormente poder estimar la biomasa aérea de las parcelas muestreadas mediante una ecuación alométrica seleccionada, se realizó la consulta de la base de datos de GlobAllomeTree (disponible en la página web <http://www.globallometree.org/>) en la cual se realizó la búsqueda por diferentes filtros como las variables independientes a utilizar, la ubicación geográfica, zona de vida según la clasificación de Holdridge, entre otras, finalmente se encontraron acordes a la zona de estudio 11 ecuaciones. *Las ecuaciones alométricas encontradas para Quercus humboldtii se muestran en la (Tabla 1).*

Tabla 1.

*Ecuaciones alométricas obtenidas de la literatura y en la base de datos GlobAllomeTree para la especie Quercus humboldtii*

| MODELO                                                | $R^2$  | UBICACIÓN                                       | ZONA DE VIDA                   | AUTOR                  |
|-------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| $B = (-5,864 + 0,906 \cdot DAP)^2$<br>Raíz cuadrada-Y | 96,79% | Reserva natural de Cachalu, Santander, Colombia | Bosque muy húmedo montano bajo | Pérez M, Díaz J.(2010) |
| $B = -765,618 + 47,861 \cdot DAP$<br>Lineal           | 92,87% | Reserva natural de Cachalu, Santander, Colombia | Bosque muy húmedo montano bajo | Pérez M, Díaz J.(2010) |
| $B = 0,067 \cdot Dap^{2,486}$<br>Exponencial          | 91,67% | Reserva natural de Cachalu, Santander, Colombia | Bosque muy húmedo montano bajo | Pérez M, Díaz J.(2010) |
| $B = 0,071 \cdot Dap^{2,539}$<br>Multiplicativo       | 91,64% | Reserva natural de Cachalu, Santander, Colombia | Bosque muy húmedo montano bajo | Pérez M, Díaz J.(2010) |
| $B = 0,073 \cdot DAP^{2,373}$                         | 95,40% | Este de los Andes, Santander Colombia           | Bosque muy húmedo montano bajo | Álvarez et al. (2012). |

En la (Tabla 2) se muestran las ecuaciones alométricas para bosques dominados por *Quercus humboldtii* y para la zona de vida bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB).

Tabla 2.

*Ecuaciones alométricas obtenidas de la literatura y en la base de datos GlobAllomeTree para Bosques dominados por Quercus humboldtii.*

| MODELO                                                   | R <sup>2</sup> | UBICACIÓN                                       | ZONA DE VIDA                   | AUTOR                  |
|----------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| B = (-1,934 + 0,676*DAP) <sup>2</sup><br>Raíz cuadrada-Y | 92,87%         | Reserva natural de Cachalu, Santander, Colombia | Bosque muy húmedo montano bajo | Pérez M, Díaz J.(2010) |
| B= 0,147*Dap <sup>2,25428</sup><br>Multiplicativo        | 91,85%         | Reserva natural de Cachalu, Santander, Colombia | Bosque muy húmedo montano bajo | Pérez M, Díaz J.(2010) |
| B = exp (2,470 + 0,108*DAP)<br>Exponencial               | 89,87%         | Reserva natural de Cachalu, Santander, Colombia | Bosque muy húmedo montano bajo | Pérez M, Díaz J.(2010) |
| B= 0,305*Dap <sup>1,949</sup><br>Curva-S                 | 86,82%         | Reserva natural de Cachalu, Santander, Colombia | Bosque muy húmedo montano bajo | Pérez M, Díaz J.(2010) |
| B= 4,98508*G <sup>1,00154</sup>                          |                |                                                 |                                | Aristizabal (2011)     |

Las ecuaciones para las demás especies asociadas al bosque de roble, para las cuales únicamente se encontró una ecuación alométrica que cumpliera con las condiciones para la especie *Weinmannia tomentosa*, para las demás especies no se encontró registros de ecuaciones alométricas (Tabla 3).

Tabla 3.

*Ecuaciones alométricas obtenidas de la literatura y en la base de datos GlobAllomeTree para las demás especies asociadas a bosques de Weinmannia tomentosa*

| ESPECIE                     | MODELO                                                        | R <sup>2</sup> | AUTOR                |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|
| <i>Weinmannia tomentosa</i> | B = (-1,03383 + 0,594234*DAP) <sup>2</sup><br>Raíz cuadrada-Y | 99%            | (Pérez & Díaz, 2010) |

### 3.8. Conversión de biomasa aérea a carbono

La mayoría de los estudios realizados en bosques tropicales asumen que el carbono está relacionado con la biomasa presente en estos, sugiriendo que la biomasa contiene el 50 % de carbono en los individuos vivos de un bosque, teniendo en cuenta que esto puede variar dependiendo la especie (Yepes et al., 2011).

### 3.9. Conversión del carbono a CO<sub>2</sub> equivalente

El dióxido de carbono equivalente corresponde a la medida que se utiliza para comparar las emisiones de gases del efecto invernadero. El dióxido de carbono equivalente es el resultado de la multiplicación del carbono presente en t/h por su potencial de calentamiento global, este último esta propuesto por el IPCC (2006) como 3,67 el cual resulta de la división del peso atómico de una molécula de dióxido de carbono por el peso específico de el mismo ( $44/12=3,67$ ).

### 3.10. Método de auto semejanza.

**3.10.1 Volumen inicial.** El volumen inicial del árbol (V1), se determinó tomando diámetros a diferentes alturas a partir de la base a ras del suelo y de las ramas principales (siempre perpendicular a la pendiente de la rama), anotando la altura de cada ramificación correspondiente, estos datos permiten reconstruir el volumen entendiendo cada sección medida como un cono

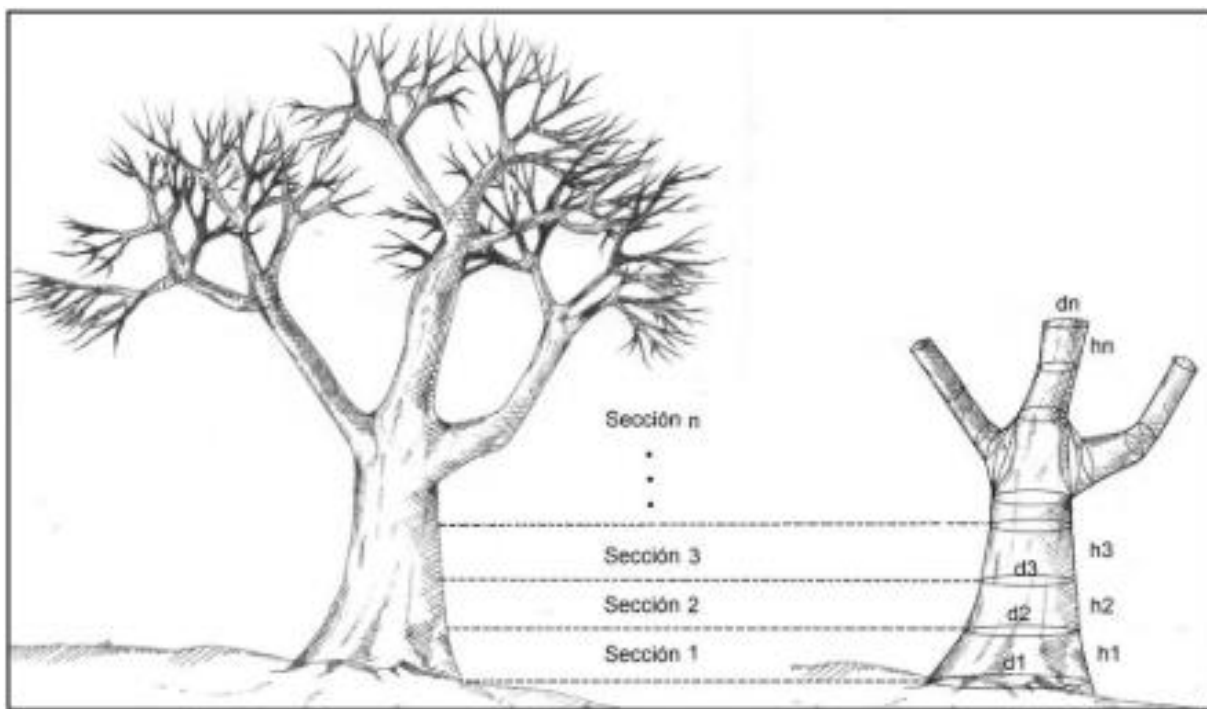
truncado. Así el inicio y fin de cada sección está determinado por la arquitectura del árbol, donde se buscan medir secciones homogéneas. (Figura 4).

$$V1 = \frac{\pi * hi}{3} \left[ \left( \frac{di^2}{4} + \frac{df^2}{4} \right) + \left( \frac{di^2}{4} * \frac{df^2}{4} \right) \right]$$

Donde:

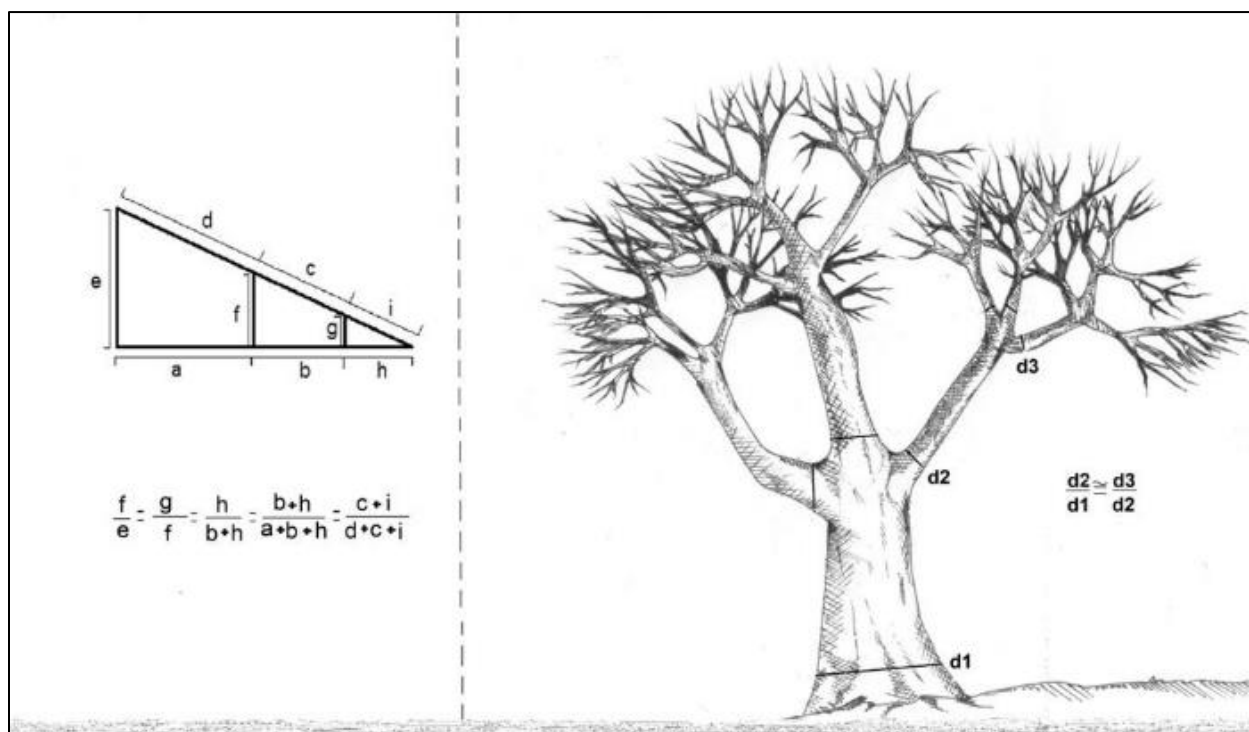
V1: volumen inicial de la sección, *hi*: altura ramificación de la sección, *di*: diámetro inicial de la sección, *df*: diámetro final de la sección.

El volumen total (VT) es la suma de los volúmenes de todas las secciones.



*Figura 4.* Reconstrucción del volumen del árbol a partir de conos truncados. Adaptada de Pérez, M., & Díaz, J. (2010). Estimación del carbono contenido en la biomasa forestal aérea de dos bosques andinos en los departamentos de Santander y Cundinamarca. (Tesis de pregrado) Universidad distrital Francisco Jose de Caldas, Bogotá, Colombia.

Para estimar el volumen de cada rama se procedió a utilizar el modelo de auto semejanza, el cual dice que si se conoce el volumen de una parte considerable del árbol que contengan las ramas principales, se puede inferir en el volumen restante del árbol. Para este efecto, se requiere encontrar la escala que determina el tamaño de las ramas a modelar. Como se asume que la escala se aplica de manera uniforme en todas las posibles dimensiones del árbol, bastará con tomar cualquier par de medidas correspondientes, cuyo cociente establecerá la escala operando igual que en la semejanza de figuras euclidianas como los triángulos. En este caso la escala se halla con el promedio de los diámetros basales de las ramas dividido en el diámetro basal de árbol (Figura 5).



*Figura 5.* Ejemplo de la analogía de la semejanza entre triángulos rectángulos. Adaptada de Pérez, M., & Díaz, J. (2010). Estimación del carbono contenido en la biomasa forestal aérea de dos bosques andinos en los departamentos de Santander y Cundinamarca. (Tesis de pregrado) Universidad distrital Francisco Jose de Caldas, Bogotá, Colombia.

**3.10.2. Nivel de repetición de la auto semejanza y nivel de ramificación.** El nivel de repetición de la auto semejanza (x), se calcula hasta que las ramas tengan un diámetro deseado (un centímetro), con el comportamiento de los diámetros se identificó que este disminuye en cualquier medida de la escala inicial a razón de la escala, así para el segundo nivel de ramificación el diámetro de cierre será:

$$\phi_{x-1} = d_1 * c^x$$

Donde:  $\phi_{x-1}$ : es el diámetro de cierre de x-1, d1: diámetro basal del árbol, c: escala resultado del promedio de los diámetros, X: nivel de ramificación.

Despejar x:

$$x = \frac{\log \phi_{x-1} - \log d_1}{\log C}$$

Se necesita conocer el valor de x cuando  $\phi_{x-1} = 1$ , donde se asume que empieza el compartimento de hojas, entonces:

$$x = \frac{-\log d_1}{\log C}$$

Dónde:  $0 < C < 1$

**5.9.3 Volumen en cada nivel de ramificación.** El número de ramas aumenta de manera exponencial y se determina con el número de ramas inicial ( $R_{inicial}$ ) elevado al nivel de ramificación (x) de cada nivel de ramificación, por lo tanto, el número de ramas apicales ( $R_{final}$ ) será:

$$R_{inicial}^x = R_{final}$$

El volumen da cada nivel de ramificación será:

$$V_i = C_v^i * V_1 * (R_{inicial}^i)$$

El volumen final es la sumatoria de todos los niveles de ramificación hasta el nivel deseado, la forma potencial  $i - 1$ , garantiza que el comportamiento de la escala y el número de ramas modelado no afecte el volumen inicial medido ( $V_1$ ):

$$Vt = \sum_{i=1}^x (C^{i-1}) * V_1 * (R_{inicial}^{i-1})$$

Dónde:  $Vt$ : volumen total,  $C$ : escala de los diámetros,  $V_1$ : sumatoria de los volúmenes de los niveles de ramificación,  $R_{inicial}$ : número de ramas inicial (Pérez & Díaz, 2010).

**3.10.3 Cálculo de la masa.** Para el cálculo de la masa se usó la densidad de la madera hallada en el laboratorio con los tarugos, y el total de volumen hallado por secciones, despejando la masa de la fórmula de densidad se obtiene:

$$d = \frac{m}{v}$$

$$m = d * v$$

**3.11. Obtención se imágenes.** Las imágenes fueron obtenidas de una misión realizada el 21 de julio del año 2019 por un vehículo aéreo no tripulado (MATRICE 600 PRO), llevando a cabo dos vuelos, el primero con la cámara RGB abordo y el segundo con la cámara BGNIR. Luego de esto, se realizó el mosaico de las imágenes para obtener una orto foto de la zona de estudio, (trabajo

realizado y suministrado por el ingeniero electrónico y estudiante de maestría en ingeniería de telecomunicaciones Arnold Guarín Ramírez, de la Universidad Industrial de Santander)

**3.11.1. Cálculo del índice de vegetación.** Teniendo la imagen con composición de bandas rojo, verde azul e infrarrojo cercano (RGBNIR) se realizó el cálculo del Índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI con la ayuda del software Monteverdi bajo la librería Orfeo Toolbox (OTB), luego de esto se realizó una extracción por capa de mascara para evaluar este índice únicamente en nuestra zona de estudio. En seguida se procedió a superponer una capa vector que contenía los polígonos de las 28 parcelas establecidas y otra con los puntos de cada árbol inventariado, con el fin de realizar las estadísticas de zona a cada uno de los polígonos definidos en el shape en base a los valores del raster NDVI.

**3.11.2. Relación entre biomasa y NDVI.** Para la construcción y validación de un modelo estadístico que pudiera predecir la biomasa en términos de reflectancia, se determinó el valor del índice para los polígonos de las parcelas y para cada uno de los pixeles donde se encontraban los árboles y estos se relacionaron con la biomasa obtenida en campo bajo la ecuación alométrica. La relación existente entre estas dos variables se calculó mediante el coeficiente de correlación de Pearson con ayuda del software estadístico Infostat. Para la prueba de los parámetros se ajustaron modelos de regresión lineal y exponencial. Para la evaluación de estos se tuvo en cuenta principalmente el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), error medio cuadrático (RMSE) y error medio estándar (S%).

## 4. Resultados

### 4.1. Unidades muestrales

Durante la etapa de muestreo en campo a las correspondientes parcelas establecidas, se midieron 904 árboles pertenecientes a la clase fustal, donde se logró muestrear 1,75 hectáreas.

### 4.2. Composición florística

Dentro de las 1.75 hectáreas muestreadas del bosque de roble se lograron medir 904 individuos vivos para la clase fustal los cuales se encuentran representados por 11 familias, 12 géneros, 13 especies (Tabla 4).

Tabla 4.  
*Composición florística fustal*

| FAMILIA       | NOMBRE CIENTÍFICO              | NOMBRE COMÚN   | N° ARBOLES |
|---------------|--------------------------------|----------------|------------|
| FAGACEAE      | <i>Quercus humboldtii</i>      | Roble          | 728        |
| PRIMULACEAE   | <i>Myrsine coriácea</i>        | Cucharo rojo   | 57         |
| CUNONIACEAE   | <i>Weinmannia tomentosa</i>    | Encenillo      | 24         |
| CLUSIACEAE    | <i>Clusia multiflora</i>       | Gaque          | 23         |
| PROTEACEAE    | <i>Panopsis yolombo</i>        | Mango de monte | 18         |
| ADOXACEAE     | <i>Viburnum triphyllum</i>     | Garrocho       | 11         |
| SAXIFRAGACEAE | <i>Escallonia paniculata</i>   | Tobo           | 11         |
| BRUNELLIACEAE | <i>Brunellia propinqua</i>     | Arracacho      | 5          |
| PROTEACEAE    | <i>Roupala monosperma</i>      | Carne fiambre  | 5          |
| PRIMULACEAE   | <i>Myrsine guianensis</i>      | Cucharo        | 4          |
| LAURACEAE     | <i>Ocotea aurantiodora</i>     | Laurel         | 2          |
| CHLORANTACEAE | <i>Hedyosmum bonplandianum</i> | Silvo silvo    | 1          |
| MELIACEAE     | <i>Cedrela montana</i>         | Cedro          | 1          |

**4.2.1. Índice de valor de importancia.** Se calculó el Índice de Valor de Importancia con base a la abundancia, frecuencia y dominancia, en los cuales se encontró que las especies con mayor abundancia fueron *Quercus humboldtii*, *Myrsine coriacea* y *Weinmannia tomentosa* (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Los resultados permiten determinar una alta presencia de la especie *Quercus humboldtii* con un valor de 201,51, seguido de *Myrsine coriacea* como la segunda especie con mayor valor de importancia, resaltando que existe una amplia diferencia en el valor entre ambas especies siendo las dos con mayor abundancia en el bosque.

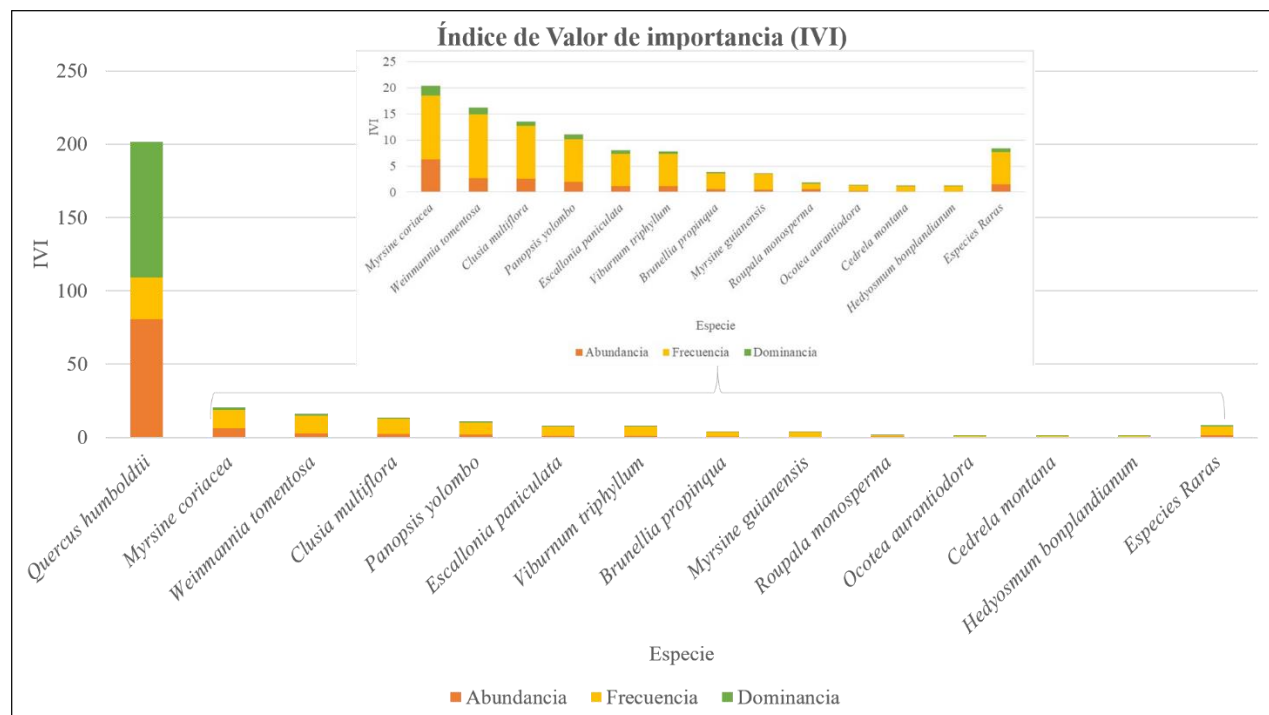


Figura 6: Índice de Valor de Importancia

**4.2.2. Distribución por clase diamétrica.** En la (Figura 7) se puede observar la relación existente entre las frecuencias absolutas y relativas por clases diamétrica, donde se puede determinar que la clase con mayor frecuencia es la de individuos con un DAP entre 10 y 20,

seguido de los DAP entre 20 y 30, representando estos el 59,51% y 19,25%, respectivamente del total inventariado.

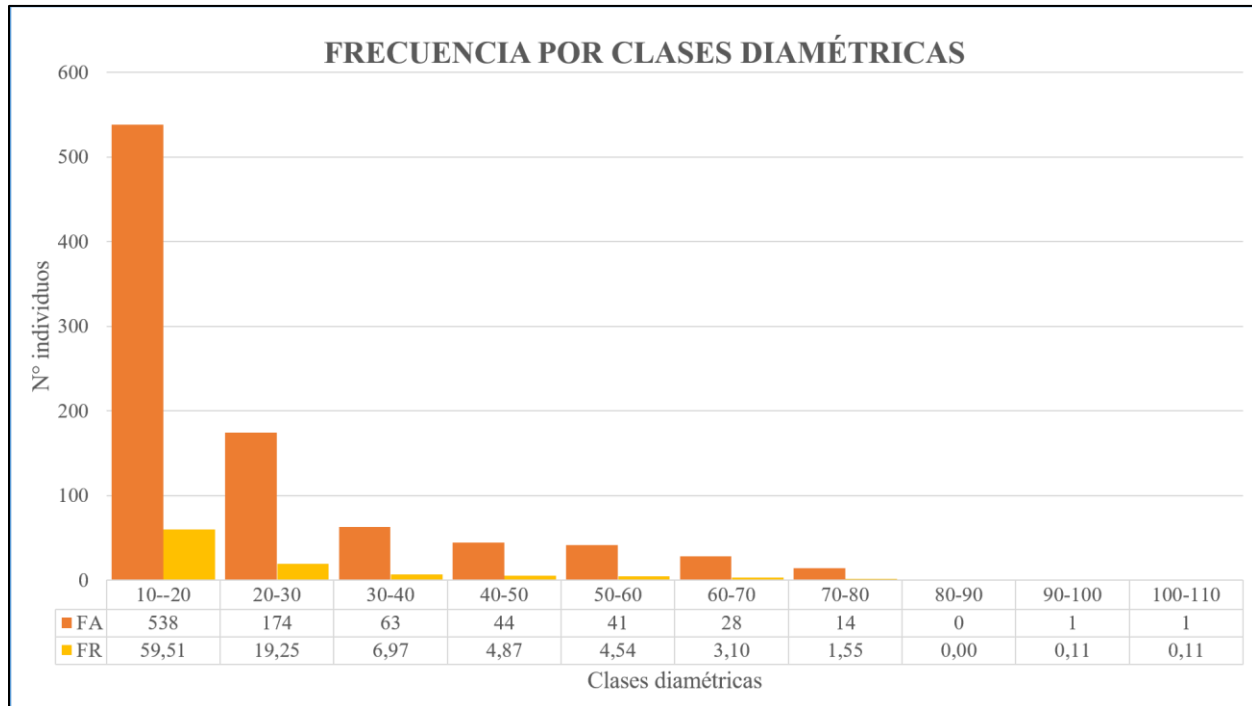


Figura 7: Gráfica de frecuencias frente a clases diamétrica

### 4.3. Estimación de la biomasa

Para la estimación de la biomasa se aplicaron las ecuaciones seleccionadas a las parcelas muestreadas, pero se toman como ecuaciones principales las ecuaciones suministradas por (Pérez & Díaz, 2010) de los modelos Raíz cuadrada -Y tanto para el *Quercus humboldtii* como la ecuación general para bosques dominados por *Quercus humboldtii*, se escogieron estas ecuaciones dado que cumplen con la mayoría de las similitudes a el área de estudio, además de esto son las ecuaciones que mayor coeficiente de determinación presentan, lo que da una mayor confiabilidad a la hora de

estimar la biomasa presente en las parcelas estudiadas. En el caso de las demás especies asociadas al bosque de *Quercus humboldtii* se utilizó para el *Weinmannia tomentosa* la ecuación suministrada por (Pérez & Díaz, 2010) y para las demás especies presentes se utilizó la ecuación general del bosque dado que no se encontró en la literatura ecuaciones alométricas para estas especies bajo las condiciones en las que se encuentran y en algunos casos no cuentan con un coeficiente de determinación que nos garantice una estimación verdadera.

Luego de calculada la biomasa aérea por árbol (BA) y la biomasa aérea total (BAT) de cada parcela, la cual es la sumatoria de la biomasa de todos los árboles que la conforman expresada en kg/parcela, se realizó la conversión para obtener la biomasa en unidades de (t/h), esta se obtiene mediante la multiplicación de la biomasa de cada parcela por un factor de conversión según el tamaño de las parcelas (ver apéndice I) y dividiendo en 1000 para llevar el resultado a toneladas (Yepes et al., 2011)

$$BA \text{ (t/h)} = BA \text{ (kg/par)} * (1 \text{ t}/1000 \text{ kg}) * FC$$

Donde, BA es la biomasa aérea; y FC es el factor de conversión que se debe emplear según el tamaño de parcela utilizado.

La BAT calculada con los dos modelos alométricos seleccionados fueron de 224,76 (t/h) para roble únicamente y aplicando la ecuación general del bosque a las demás especies y 157,99 (t/h) con la ecuación general del bosque sin que ninguna especie tenga una importancia particular.

#### **4.4. Cálculo de carbono y carbono equivalente a partir de la biomasa**

Se realizó el respectivo cálculo para carbono almacenado y para el carbono equivalente, teniendo como resultado lo siguiente (Tabla 5) (ver apéndice K).

Tabla 5.

*Carbono almacenado y carbono equivalente el área de estudio*

| <b>C</b>                       | <b>Biomasa (t/h)</b> | <b>C almacenado (t/h)</b> | <b>CO<sub>2</sub> equivalente(t/h)</b> |
|--------------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------------------|
| Para <i>Quercus humboldtii</i> | 224,76               | 112,38                    | 412,44                                 |
| General del bosque             | 157,99               | 78,99                     | 289,91                                 |

#### 4.5 Autosemejanza.

Se realizó el modelo de auto semejanza para la especie *Quercus humboldtii* la cual es más representativa, haciendo la respectiva medición de diámetros del tronco y de las ramas y alturas de estos.

Se obtuvo la siguiente tabla correspondiente a los datos de diámetros y alturas.

Tabla 6.

*Datos tomados en campo para el modelo de auto semejanza*

| <b>Rama</b> | <b>Diámetro (cm)</b> | <b>Altura</b> |
|-------------|----------------------|---------------|
|             | <b>(cm)</b>          |               |
| D1T         | 84,35                | 550           |
| D2T         | 78,62                |               |
| DR1         | 73,52                | 410           |
| DR2         | 5,10                 |               |
| DR3         | 3,80                 | 28.3          |
| DR4         | 1,60                 |               |
| DR5         | 1,15                 | 22            |
| DR6         | 1,00                 |               |

Dónde: D1T; diámetro de la base del tronco, D1T; diámetro donde sale la primera ramificación del tronco, DR1; diámetro de la base de la rama, DR2; diámetro donde sale la segunda ramificación, DR3; diámetro de la base de la rama, DR4; diámetro donde sale la tercera rama, DR5; diámetro de la base de la rama, DR6; diámetro del ultimo nivel de ramificación (se toma como 1 porque es donde comienza el compartimiento de las hojas).

Con los datos de esta tabla se procede a calcular la escala, la cual es el promedio de los diámetros de las bases de las ramas dividido en el diámetro de la base del árbol y para esta se obtuvo un valor de 0,48257261, el valor obtenido para el nivel de ramificación fue 6,08678218 y el número de ramas finales fue de 67,9679251, con estos datos podemos obtener el volumen por secciones o niveles de ramificación y su volumen total para así determinar la biomasa total del árbol por este método.

Tabla 7.

*Volúmenes por sección y ramificación*

| <b>Sección de ramificación</b> | <b>Volumen por sección (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Volumen por ramificación (m<sup>3</sup>)</b> |
|--------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1                              | 1585,011679                                | 1529,76646                                      |
| 2                              | 4,355599586                                | 8,40757231                                      |
| 3                              | 0,000194422                                | 0,00075058                                      |
| 4                              | 1,52809E-05                                | 0,00011799                                      |

Luego se halló el volumen total de las secciones haciendo su respectiva sumatoria, la cual dio 1538,1749 m<sup>3</sup>.

Para el cálculo de la masa se usó la densidad de la madera hallada con los tarugos, la cual dio un valor de 0,62 g/cm<sup>3</sup> y se hizo la conversión de unidades a kg/m<sup>3</sup> dando un valor de 620kg/m<sup>3</sup> y

el total de volumen hallado por secciones cuyo valor es  $1538.1749\text{m}^3$ , despejando la masa de la fórmula de densidad se obtuvo un valor de  $953668.438\text{ kg}$  por árbol.

#### 4.6. Biomasa aérea en bosque de roble a partir de imágenes multi espectrales

4.6.1. *Índice de Vegetación Normalizada NDVI*. En la (Figura 8) se muestra el cálculo del NDVI realizado en el software Qgis.

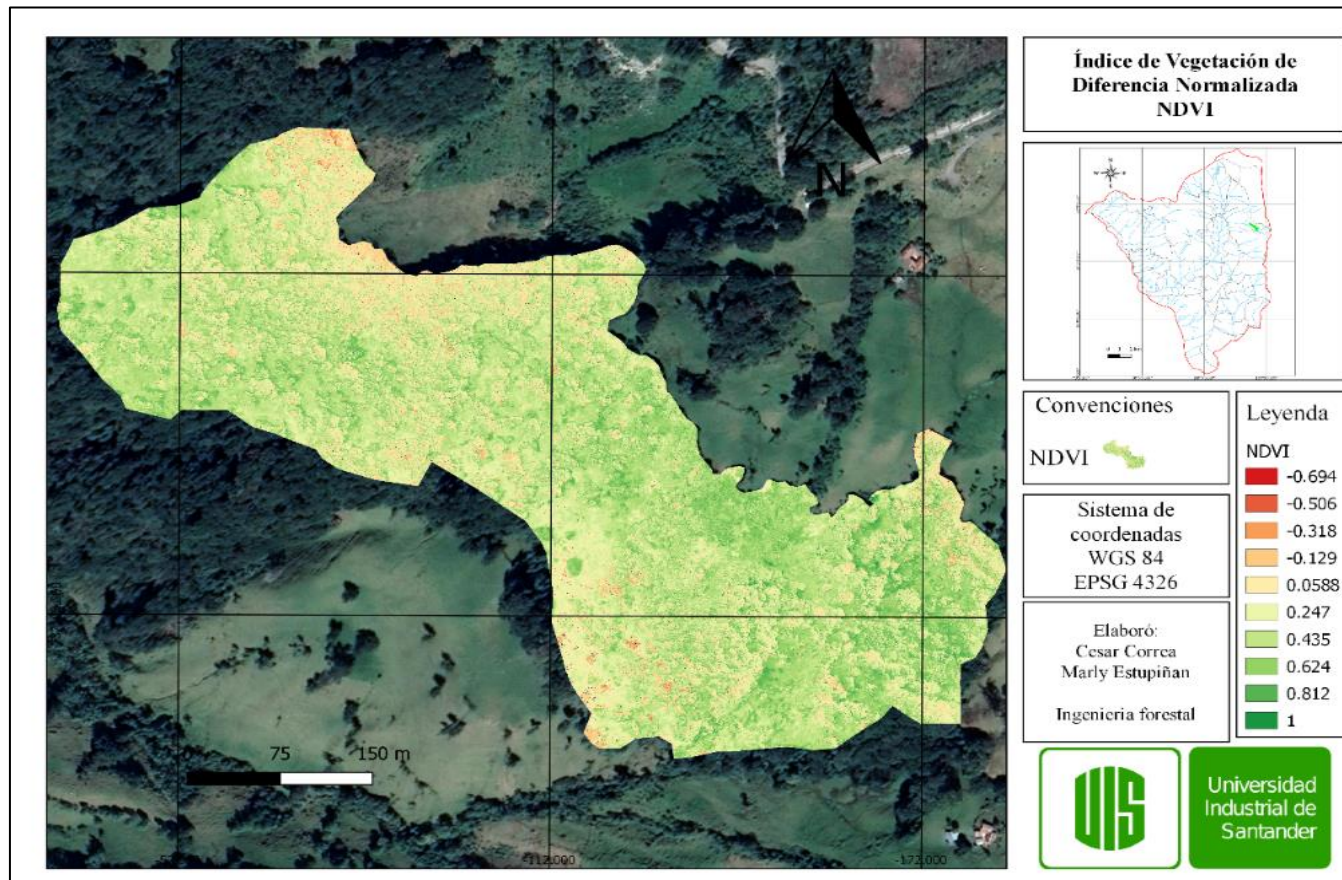


Figura 8. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para el área de estudio.

**4.6.2. Análisis de correlación de Pearson.** Al realizar la correlación entre las dos variables en este caso Biomasa y el NDVI se obtuvo una correlación muy baja existente tanto para los arboles individualmente como para los polígonos representativos de las parcelas. Se encontró que en ambos casos presentaron una correlación negativa lo que quiere decir que mientras una variable aumenta la otra disminuye. Para la correlación entre biomasa y NDVI por parcelas (Figura 9), se encontró una correlación de -0,40 y para la correlación entre biomasa y NDVI por árbol (Figura 10), una correlación de -0,09. Lo que quiere decir que no existe una correlación significativa entre las dos variables.

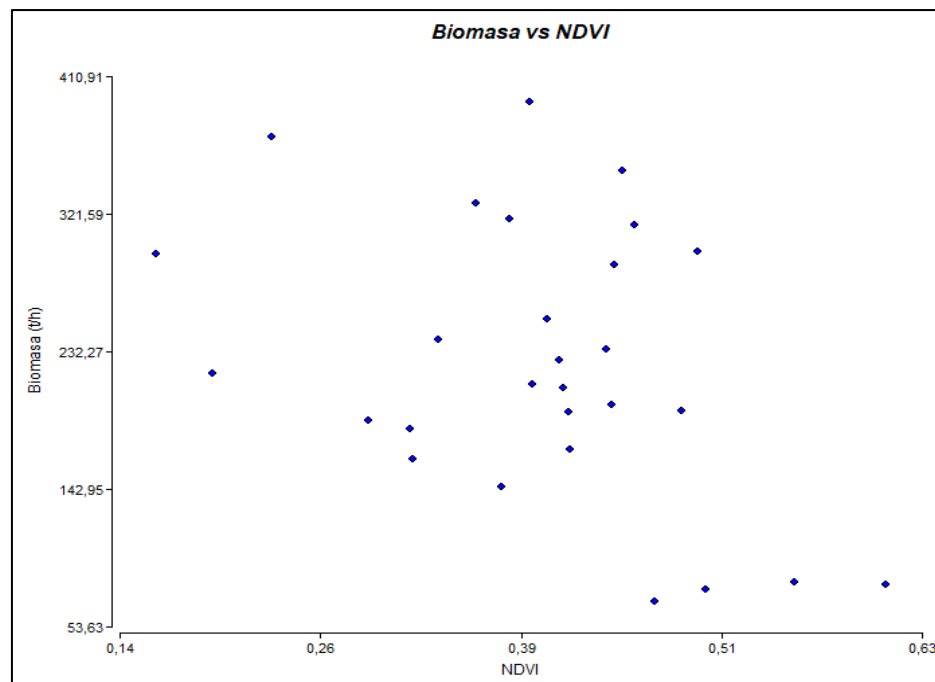


Figura 9. Biomasa vs NDVI por parcela

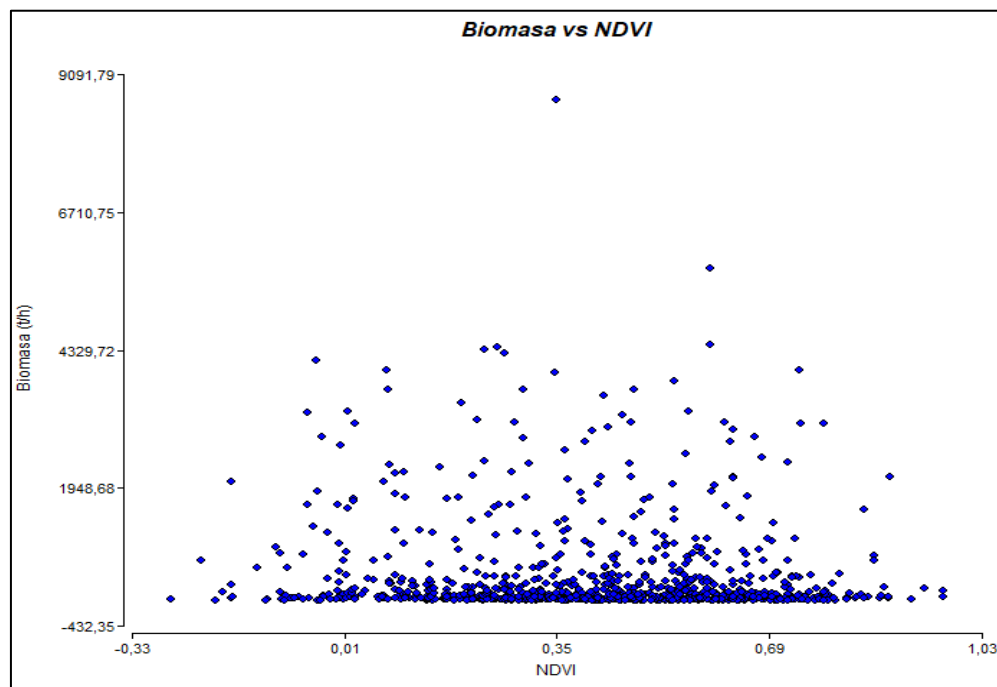


Figura 10. Biomasa vs NDVI por árbol

## 5. Discusión.

La biomasa calculada por el método de ecuaciones alométricas, utilizando las ecuaciones de (Pérez & Díaz, 2010) tanto para la especie de roble como para la ecuación general del bosque propuesta por estos autores, representó una estimación de biomasa aproximada. En nuestro estudio encontramos una biomasa de 224,76 (t/h) aplicando la ecuación para el *Quercus humboldtii* y 157,99 (t/h) para la ecuación general del bosque las cuales están por encima de la biomasa calculada por (Pérez & Díaz, 2010) que fue de 125,36 (t/h).

(Pérez & Díaz, 2010) en su estudio, elaboró ecuaciones alométricas con base al modelo de autosemejanza, lo cual arrojó resultados óptimos al momento de implementar estas ecuaciones, ya que uno de sus resultados fue que las ecuaciones reportadas en literatura estaban subestimando la

biomasa del bosque y las ecuaciones generadas estaban aportando un valor más cercano a la biomasa presente en un área.

En este estudio logramos identificar que por el modelo de autosemejanza se subestima la biomasa presente en un árbol, ya que este modelo presenta un enfoque en sumatorias de volúmenes por secciones y solo está usando datos de diámetros y alturas, lo cual podría indicar que faltan datos de otras variables dentro de este modelo que permita aproximar a un valor más real la biomasa contenida en un árbol, se hizo una comparación con las ecuaciones alométricas usadas y los resultados obtenidos fueron mucho menores a los de las ecuaciones elegidas de la literatura.

Por otro lado, en el estudio realizado por (Aguas, 2016) quien también trabajó en un bosque de robles ubicado en Antioquia, y realizando la revisión de literatura obtuvo como una de las ecuaciones elegidas la ecuación que se usó en el presente estudio también teniendo en cuenta la zona de vida y el coeficiente de determinación, logro estimar la biomasa de dicho bosque en cantidades de 230 (t/h) un valor que es muy similar al resultado de nuestro estudio, además teniendo en cuenta que (Aguas, 2016) también trabajó un amplio rango de DAP.

En un estudio realizado en el sur de los Andes de Colombia por (Yepes et al., 2016) aplicando la ecuación alométrica para bosque húmedo pre montano, propuesta por (Alvarez et al., 2012) en robledales, tuvieron como resultado una biomasa de 272,9 (t/h) del cual corresponde un 72,5% a la biomasa aérea lo que vendría siendo aproximadamente 265,66 (t/h) estando este valor por encima.

En otro estudio titulado “Dinámica de la densidad de árboles y la biomasa aérea en bosques andinos del departamento de Antioquia, Colombia,”(Peña, López, Yépes, & Cardona, 2015) realizaron la remediación de 8 parcelas distribuidas por el departamento, usando la ecuación alométrica propuesta por (Chave et al., 2014), en la cual utilizan variables como el DAP la

densidad de la madera y la altura total del árbol, lograron encontrar una biomasa de 219,70 (t/h) siendo un resultado aproximado al nuestro, lo cual indica que nos encontramos dentro de un rango de biomasa estimada adecuado para bosques de roble en el país.

Por otra parte, en la correlación existente entre la biomasa estimada en campo por ecuaciones alométricas y los valores arrojados por el índice de vegetación NDVI, se encontró que no existe una alta correlación entre las dos variables, resultado que sabemos no se ajusta a lo que deseábamos encontrar, debido a que el índice nos muestra valores altos de reflectancia de la vegetación, lo que quiere decir que a mayor presencia de vegetación, mayor valor del índice y por lo tanto una mayor estimación de biomasa presente en el área.

Aguas, (2016) en su estudio utilizó imágenes satelitales para estimar la relación existente entre la biomasa calculada por ecuaciones y el valor arrojado por el índice de vegetación, en este estudio realizan una metodología similar y de la cual concluyen que es muy difícil poder estimar una relación entre estas dos variables, aportando algunos puntos de vista por los cuales debido a defectos de las imágenes puede influir en el error del estudio. Este nos da un punto de referencia debido a la toma de las imágenes ya que se recomienda para una mayor reflectividad de la vegetación trabajar con imágenes tomadas en época de verano, lo cual para nuestro estudio no se cumplió ya que la fecha en la que se efectuó la misión para obtener las imágenes aéreas del bosque se realizó en época de lluvias y además de esto con presencia de viento, lo cual dificulta el procesamiento de las imágenes para lograr obtener unos resultados óptimos.

En otro orden, en un estudio realizado en Chiapas, México por (Escandon, Jong, Ochoa, March, & Castillo, 1999) donde utilizaron dos métodos para estimar la biomasa presente en tres especies forestales mediante el uso de sensores remotos del cual dedujo que sí es posible calcular la biomasa aérea de un bosque, ya que las dos variables presentaron un amplio valor de correlación y con lo

cual pudo calcular una regresión que pudiera acercarse a una estimación de biomasa de un bosque mediante sensores remotos y los valores del índice de vegetación.

Al hacer una comparación con estos estudios y al tener en cuenta que en nuestro caso fueron imágenes tomadas de aeronave no tripulada, esta pudo haberse visto más afectada por diversos cambios climáticos, la temporada de invierno, y los fuertes vientos presentados a la hora de realizar la misión y además es poca la literatura existente para calcular índices de vegetación con imágenes tomadas con aeronaves no tripuladas para el sector forestal.

Según (FAO, 2004) América latina ha presentado una alta explotación de los recursos forestales, ya que se ha usado de manera excesiva el bosque y los principios de manejo y ordenación forestal sostenible han sido incorporados hasta hace poco tiempo. Se ha venido estableciendo una normativa de protección cada vez más estricta con el fin de preservar la fauna silvestre, aguas, suelos forestales y los bosques, teniendo como objetivo la conservación de la biodiversidad, las cuencas hidrográficas y la producción de madera.

Los bosques de roble han sido afectados ampliamente por la alta demanda de madera para suplir necesidades de empresas y de las comunidades locales, esto se dio hasta el establecimiento de la veda (1974).

Para nuestro estudio, el bosque de roble tiene gran importancia desde el punto de vista de regulación de gases del efecto invernadero, ya que está acumulando una cantidad considerable de carbono y a su vez está liberando oxígeno, representado en 112,8 (t/h) de carbono almacenado, que se puede evidenciar en hojas, frutos, tallos.

## 6. Conclusiones

El uso de ecuaciones alométricas para el cálculo de la biomasa presente en el bosque fue de gran importancia ya que nos permitió estimar la biomasa en una aproximación muy verdadera a lo contenido, además nos sirvió para correlacionar estos resultados con uno de nuestros objetivos planteados.

El método indirecto para estimar la biomasa de un bosque, es de gran importancia ya que ayuda a mitigar el impacto que genera la tala de una muestra considerada de árboles.

Lograr estimar o correlacionar la biomasa de un bosque con los valores arrojados por un índice de vegetación es un trabajo muy riguroso en el cual se deben tener en cuenta diferentes aspectos a la hora de utilizar las imágenes multiespectrales, para poder llegar a un resultado óptimo.

Con esta información es necesario informar a los propietarios del predio, por medio de charlas en las cuales se les dé a conocer la importancia que tienen estos bosques en cuanto a los servicios ambientales que brindan y la necesidad de conservarlos, haciendo un uso responsable de ellos.

## 7. Recomendaciones

Para el modelo de auto semejanza se recomienda realizar un análisis más enfocado a la estructura del árbol, ya que si se tienen en cuenta otras variables podrían obtener una correlación más acertada para la estimación de la biomasa a partir del volumen.

Para la estimación de biomasa por imágenes multi espectrales se recomienda que al momento de hacer el vuelo la plataforma tenga una cámara con todas las bandas a utilizar, para evitar tener que repetirlo, y la condición climática cambie influyendo en la reflectancia de la vegetación.

Teniendo en cuenta la baja presencia de estudios en la parte forestal con el uso de imágenes tomadas a través de Vehículos Aéreos No Tripulados, se recomienda enfocar este tipo de estudios a la parte forestal, y lograr adecuar los índices de vegetación a los niveles de reflectancia que ofrecen este tipo de imágenes.

### Referencias bibliográficas

- Aguas, C. (2016). *Estimación de biomasa aérea forestal en bosque de robledales del altiplano norte de antioquia, utilizando teledetección* (Tesis de maestría) Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/57516/1/1128387218.2017.pdf>
- Alvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., de las Salas, G., del Valle, I., ... Rodríguez, L. (2012). Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management*, V.267, 297–308. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112711007444>  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.013>
- Avella, A. (2016). *Los bosques devroble (Fagaceas) en Colombia: composicion florística, estructura diversidad y conservacion* (Tesis doctoral) Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/55121/>
- Avella, A., & Cárdenas, L. (2010). Conservación y uso sostenible de los bosques de roble en el corredor de conservación guantiva - la Rusia - Iguaque, departamentos de santander y Boyacá, Colombia. *Colombia Forestal*, 13(1), 5–25. Recuperado de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/view/3424>  
<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2010.1.a01>
- Avendaño, D., Acosta, M., Carrillo, F., & Etchevers, J. (2009). Estimacion de biomasa y carbono en un bosque de Abies religiosa. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 32(3), 233–238. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61011739008>
- Barrero Barrero, D., Camelo Salamanca, D., Ovalle Escobar, A., Rozo Fernández, A., & Mahecha Vega, G. E. (2012). *Vegetación del territorio CAR: 450 especies de sus llanuras y montañas*. Recuperado de <http://sie.car.gov.co/handle/20.500.11786/34055>
- Cárdenas, L. M. (2014). *Biomasa y crecimiento de especies forestales nativas*. Recuperado de <http://www.natura.org.co/publicaciones/cartilla-biomasa-crecimiento-especies-forestales-nativas/>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177–3190. Recuperado de:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.12629>  
<https://doi.org/10.1111/gcb.12629>

Cottam, G., & Curtis, J. T. (1956). The Use of Distance Measures in Phytosociological Sampling. *Ecology*, 37(3), 451–460. Recuperado de <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2307/1930167>  
<https://doi.org/10.2307/1930167>

Escandón Calderón, J., de Jong, B. H., Ochoa Gaona, S., March Mifsut, I., & Castillo, M. A. (1999). Evaluación de dos métodos para la estimación de biomasa arbórea a través de datos Landsat TM en Jusnajib La Laguna, Chiapas, México: estudio de caso. *Investigaciones geográficas*, V.40 71-84. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46111999000300006](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111999000300006)

Fernandez, E. (2014). *Producción y viabilidad en semillas de roble blanco (Quercus humnoldtii) en bosques del macizo colombiano, sur del departamento del Huila* (Tesis de pregrado) Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Pitalito, Colombia. Recuperado de <http://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/2468/1/12232598.pdf>

Ferreira, O. (2005). *Inventario Forestal, herramientas para el manejo de bosques*. Recuperado de [https://es.scribd.com/doc/89913492/Manual-de-Invent-a-Rio-Forestal-PDF?fbclid=IwAR1DW25tjYmyZsyvgig\\_CsE5wHd7GIy92mS4C9LrMixjQ4GQMM\\_J7yvrkSg](https://es.scribd.com/doc/89913492/Manual-de-Invent-a-Rio-Forestal-PDF?fbclid=IwAR1DW25tjYmyZsyvgig_CsE5wHd7GIy92mS4C9LrMixjQ4GQMM_J7yvrkSg)

Fundacion Natura Colombia. (2015). Diversidad, dinamica y productividad de los bosques de Antioquia. (2) Recuperado de <https://www.coursehero.com/file/45650506/Informe-Final-UNALMED-ADpdf/>

Gilabert, M. A., Gonzalez-Piqueras, J., & Garcia-Haro. (1997). Acerca de los índices de vegetación. España : Universidad de Valencia. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/39195330\\_Acerca\\_de\\_los\\_indices\\_de\\_vegetacion](https://www.researchgate.net/publication/39195330_Acerca_de_los_indices_de_vegetacion)

Gutiérrez, E., Moreno, R., & Villota, N. (2013). *Guia de cubicación de madera*. Recuperado de [http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Gobernanza\\_forestal\\_2/10\\_Guía\\_de\\_Cubicación\\_de\\_Madera.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Gobernanza_forestal_2/10_Guía_de_Cubicación_de_Madera.pdf)

Jauregui Valarezo, K. F. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar volumen y biomasa aérea de *Enterolobium cyclocarpum* y *Ceiba pentandra* en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras (Tesis de pregrado) Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano,

- Honduras. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Ecuaciones-alom%C3%A9tricas-para-estimar-volumen-y-a%C3%A9rea-Jauregui-K%C3%A9vin/38cbcfa5a0c07148ff765789a69a748511c181fb>
- Muñoz, P. (2013). *Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación*. Recuperado de [http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema Indices de vegetación%2C Pedro Muñoz A.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indice%20de%20vegetacion%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Ortiz, J., & Salazar, R. (2018). *Estudio de distribución y abundancia del Stigmatococcus asper en Quercus Humboldtii en el municipio de Molagavita Santander*. (Tesis de pregrado) Universidad Industrial De Santander, Malaga, Colombia. Recuperado de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/172502.pdf>
- Paruelo, J. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas: Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 17(3), 4-22. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/26595670\\_La\\_caracterizacion\\_funcional\\_de\\_ecosistemas\\_mediante\\_sensores\\_remotos](https://www.researchgate.net/publication/26595670_La_caracterizacion_funcional_de_ecosistemas_mediante_sensores_remotos)
- Pérez, M., & Díaz, J. (2010). *Estimación del carbono contenido en la biomasa forestal aérea de dos bosques andinos en los departamentos de Santander y Cundinamarca*. (Tesis de pregrado) Universidad distrital Francisco Jose de Caldas, Bogotá, Colombia. Recuperado de [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30161498/Tesis Martin Camilo Perez.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DESTIMACION\\_DEL\\_CARBONO\\_CONTENIDO\\_EN\\_LA\\_B.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20200312%2Fus-east-1%2Ffs3%2Faws4\\_request&X-Amz-Date=20200312T154737Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=f0b7012a15a8388ba886b1d0662040d59cc0d52bbbcc7b016bc36be451ebabf6](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30161498/Tesis_Martin_Camilo_Perez.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DESTIMACION_DEL_CARBONO_CONTENIDO_EN_LA_B.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20200312%2Fus-east-1%2Ffs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20200312T154737Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=f0b7012a15a8388ba886b1d0662040d59cc0d52bbbcc7b016bc36be451ebabf6)
- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles*. Montpellier, Francia: In Cirad - FAO. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/018/i3058s/i3058s.pdf>
- Romero, F. S. (2016). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*, V.24, 13-41. <https://doi.org/10.22518/16578953.701> Recuperado de <http://revistaaquatic.com/ojs/index.php/aquatic/article/view/212/200>
- Schlegel, B., Gayoso, J., & Guerra, J. (2000). *Manual de procedimientos muestreos de biomasa*

forestal. Recuperado de [https://www.uach.cl/procarbono/pdf/manuales/guia\\_destructivo.pdf](https://www.uach.cl/procarbono/pdf/manuales/guia_destructivo.pdf)

Soto, C. (2011). *Uso de sensores remotos para estimar biomasa arriba del suelo en bosques de la península de Osa*. (Tesis de pregrado), Instituto tecnologico de Costa rica, Cartago, Costa Rica. Recuperado de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/5739>.

Vallejo-Joyas M.I., Londoño-Vega A.C. López- Camacho R., Galeano G., Álvarez-Dávila E. & Devia-Álvarez W. (2005). Establecimiento de parcelas permanentes en bosques de Colombia. Bogotá D. C. Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 310 p. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/db44/64abb57ed47a46d44cc1a9b8a560eee520dc.pdf>

Van Noordwijk, M., & Mulia, R. (2002). Functional branch analysis as tool for fractal scaling above-and belowground trees for their additive and non-additive properties. *Ecological Modelling*, 149(1-2), 41-51. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00513-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00513-0) Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380001005130>

Vásquez, A., & Arellano, H. (2012). Estructura, Biomasa Aérea y Carbono Almacenado en Los Bosques del Sur y Noroccidente de Córdoba. *Colombia Diversidad Biótica V.12*, 923–962. Recuperado de <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1208/1208.0248.pdf>

Yepes A.P., Navarrete D.A., Duque A.J., Phillips J.F., Cabrera K.R., Álvarez, E., García, M.C., Ordoñez, M.F. 2011. Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono en Colombia. Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/13257/13548/Protocolo+para+la+estimaci%C3%B3n+nacional+y+subnacional+1.pdf/11c9d26b-5a03-4d13-957e-0bcc1af8f108>

Yepes, A., Sierra, A., Niño, L. M., López, M., Garay, C., Vargas, D., ... Barbosa, A. (2016). Biomasa y carbono total almacenado en robledales del sur de los Andes Colombianos: Aportes para el enfoque REDD+ a escala de proyectos. *Revista de Biología Tropical*, 64(1), 399–412. Recuperado de [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-77442016000100399](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442016000100399), <https://doi.org/10.15517/rbt.v64i1.18221>.