



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**TEMA: ANÁLISIS DASOMÉTRICO APLICANDO TECNOLOGÍA  
ESCÁNER LÁSER TERRESTRE Y TÉCNICAS CONVENCIONALES  
PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA AÉREA EN EL BOSQUE LA  
ARMENIA.**

**AUTOR: BASANTES RODRÍGUEZ, JHOSELINNE KLARIBEL**

**DIRECTOR: DR. PADILLA ALMEIDA, OSWALDO VINICIO**

**SANGOLQUÍ**

**2018**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN**

**INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación “ANÁLISIS DASOMÉTRICO APLICANDO TECNOLOGÍA ESCÁNER LÁSER TERRESTRE Y TÉCNICAS CONVENCIONALES PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA AÉREA EN EL BOSQUE LA ARMENIA” fue realizado por la señorita: *Basantes Rodríguez Jhoselinne Klaribel* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangoquí, 26 de julio del 2018

Firma:

**Dr. Oswaldo Padilla**

**Director del trabajo de Titulación**  
170977 66J-0

*Autorizado,*

*Amparito Ing. Santiago Rojas, Decano Operativo.*  
  
27. 07. 2018



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN  
INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, *Basantes Rodríguez Jhoselinne Klaribel*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Análisis dasométrico aplicando tecnología escáner láser terrestre y técnicas convencionales para la estimación de biomasa aérea en el bosque La Armenia*, es de mi autoría y de mi responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos y metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 09 de agosto del 2018

Firma:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Basantes Rodríguez Jhoselinne Klaribel', written over a set of horizontal lines.

**Basantes Rodríguez Jhoselinne Klaribel**

C.C.: 2100640867



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN  
INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**AUTORIZACIÓN**

*Yo, Basantes Rodríguez Jhoselinne Klaribel autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: Análisis dasométrico aplicando tecnología escáner láser terrestre y técnicas convencionales para la estimación de biomasa aérea en el bosque La Armenia en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.*

Sangolquí, 09 de agosto del 2018

Firma

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Klaribel Basantes Rodríguez', written over a horizontal line.

**Basantes Rodríguez Jhoselinne Klaribel**

C.C.: 2100640867

## DEDICATORIA

*Primeramente, este trabajo se lo dedico de manera especial a Dios, por estar conmigo en todos los momentos de mi vida bendiciéndome y dándome la fuerza y la sabiduría para cumplir con mis metas*

*A mis padres Dolis y Joselito, a mi hermano Jhoan, porque ellos son el motor de mi vida, la razón de mi inspiración en cualquier decisión emprendida, gracias a los consejos, el apoyo y la paciencia, todos mis logros son por ellos y para ellos.*

***Klaribel***

## AGRADECIMIENTO

Principalmente a Dios, por hacer posible el cumplimiento de una meta más en mi vida.

A mis padres y a mi hermano, por la paciencia, la confianza, al apoyo y el amor en cada momento de mi vida.

A mis compañeros y amigos que compartieron conocimientos, alegrías y tristezas durante el recorrido de la carrera.

También es importante para mí, agradecer de manera especial a las personas e instituciones que colaboraron de forma directa e indirecta en la realización del presente trabajo:

A mis estimados docentes: Dr. Oswaldo Padilla, Dr. Theofilos Toulkeridis e Ing. Santiago Rojas por el tiempo, la asesoría y la orientación que me brindaron en el desarrollo de mi tesis.

A mi querida Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE y a los docentes pertenecientes a la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente quienes transmitieron sus conocimientos y experiencias para poder forjarme como una profesional de excelencia.

Al Instituto Espacial Ecuatoriano por el auspicio de los equipos y las licencias geoespaciales utilizadas en el desarrollo de la tesis, especialmente al Ing. Eduardo Ordoñez, Ing. Judith Zapata y al Ing. Víctor Erazo por la guía, el acompañamiento técnico, la amistad y el tiempo brindado desde el inicio hasta el final del proyecto.

Con este trabajo, culmina una etapa muy difícil y especial de mi vida, llena de altos y bajos que significaron sacrificios pero también valiosas experiencias que marcan el inicio de nuevas metas por cumplir.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....</b>	<b>i</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>ii</b>
<b>AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN POR PARTE DE LA ESPE.....</b>	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iv</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xiii</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>2</b>
<b>GENERALIDADES .....</b>	<b>2</b>
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Planteamiento del problema .....	4
1.3 Justificación e importancia.....	5
1.4 Área de influencia .....	8
1.5 Objetivos .....	9
1.6 Metas .....	9
1.7 Variables de la investigación.....	10
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>12</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
2.1 Estimación de biomasa.....	12
2.1.1 Bosque .....	12
2.1.2 Biomasa .....	13
2.1.3 Biomasa forestal aérea.....	14
2.1.4 Ecuaciones alométricas de estimación de biomasa aérea.....	16
2.2 Medición de variables dasométricas.....	18
2.2.1 Dasometría .....	18

2.2.2 Mediciones forestales .....	21
2.2.3 Medición del diámetro normal .....	28
2.2.4 Medición de la altura .....	31
2.3 Análisis estadístico .....	33
2.3.3 Conceptos básicos .....	34
2.3.4 Estadística descriptiva .....	37
2.3.5 Estadística inferencial.....	43
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>48</b>
<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>48</b>
3.1 Definición de parcelas de estudio.....	50
3.2 Trabajo de campo .....	52
3.2.1 Sistema escáner láser terrestre - Captura de datos LIDAR terrestre .....	52
3.2.2 Medición convencional del diámetro normal de los árboles .....	57
3.2.3 Georreferenciación .....	59
3.3 Trabajo de gabinete .....	60
3.3.1 Procesamiento de datos LIDAR .....	60
3.3.2 Medición digital del diámetro normal de los árboles .....	69
3.3.3 Análisis estadístico .....	78
3.3.4 Estimación de biomasa aérea .....	82
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>83</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>83</b>
4.1 Modelo tridimensional de las parcelas de estudio.....	83
4.2 Informe estadístico .....	89
4.3 Mapa de Estimación de biomasa aérea.....	97
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>102</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>102</b>
5.1 Conclusiones .....	102
5.2 Recomendaciones.....	103
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>105</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Operacionalización de variables</i> .....	11
<b>Tabla 2</b> <i>Medidas de tendencia central</i> .....	38
<b>Tabla 3</b> <i>Medidas de dispersión</i> .....	39
<b>Tabla 4</b> <i>Medidas de posición</i> .....	40
<b>Tabla 5</b> <i>Estadísticos de pruebas de hipótesis</i> .....	45
<b>Tabla 6</b> <i>Insumos del proyecto</i> .....	49
<b>Tabla 7</b> <i>Comandos en Rstudio para análisis descriptivo</i> .....	79
<b>Tabla 8</b> <i>Localización parcela A</i> .....	84
<b>Tabla 9</b> <i>Localización parcela B</i> .....	84
<b>Tabla 10</b> <i>Diámetro normal de los árboles – Mediciones digitales y de campo</i> .....	89
<b>Tabla 11</b> <i>Parámetros de centralización – DAP</i> .....	90
<b>Tabla 12</b> <i>Parámetros de dispersión – DAP</i> .....	91
<b>Tabla 13</b> <i>Parámetros de posición – DAP</i> .....	92
<b>Tabla 14</b> <i>Parámetros de forma – DAP</i> .....	92
<b>Tabla 15</b> <i>Frecuencia de datos agrupados – DAP mediciones en campo</i> .....	95
<b>Tabla 16</b> <i>Frecuencia de datos agrupados – DAP mediciones en digital</i> .....	95
<b>Tabla 17</b> <i>Estimación de biomasa aérea del área de aplicación del proyecto</i> .....	98
<b>Tabla 18</b> <i>Puntos de control</i> .....	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Ubicación bosque La Armenia .....	8
<b>Figura 2</b> Definición de bosque .....	13
<b>Figura 3</b> Tipos de composición de biomasa .....	14
<b>Figura 4</b> Biomasa forestal aérea .....	15
<b>Figura 5</b> Relación diámetro versus altura.....	17
<b>Figura 6</b> Concepto de dasimetría.....	19
<b>Figura 7</b> Partes de un árbol.....	20
<b>Figura 8</b> Resumen de variables dasométricas .....	21
<b>Figura 9</b> Crecimiento de una masa forestal .....	22
<b>Figura 10</b> Herramientas de mediciones directas .....	23
<b>Figura 11</b> Equipos de mediciones indirectas.....	25
<b>Figura 12</b> Espectro de radiación electromagnética .....	26
<b>Figura 13</b> Escáner láser terrestre .....	27
<b>Figura 14</b> Nube de puntos .....	28
<b>Figura 15</b> Altura normal en terrenos llanos e inclinados .....	29
<b>Figura 16</b> Altura normal de un árbol inclinado y diámetro normal de árboles contiguos.....	30
<b>Figura 17</b> Altura normal de árboles bifurcados por abajo y por encima de 1.30 m.....	30
<b>Figura 18</b> Altura normal de un árbol con raíces sobre la superficie y de un árbol caído.....	31
<b>Figura 19</b> Tipos de alturas forestales .....	32

<i>Figura 20</i> Altura de árboles bifurcados e inclinados.....	33
<i>Figura 21</i> Altura de árboles caídos.....	33
<i>Figura 22</i> Estimación estadística.....	35
<i>Figura 23</i> Estimación puntual e intervalos de confianza .....	36
<i>Figura 24</i> Medidas de tendencia central.....	38
<i>Figura 25</i> Asimetría o sesgo.....	41
<i>Figura 26</i> Curtosis o apuntamiento .....	42
<i>Figura 27</i> Procedimiento prueba de hipótesis .....	43
<i>Figura 28</i> Tipos de errores al aceptar o rechazar hipótesis nula o alternativa .....	44
<i>Figura 29</i> Zona de aceptación y rechazo de la hipótesis nula .....	46
<i>Figura 30</i> Metodología propuesta para el estudio .....	50
<i>Figura 31</i> Área de aplicación del proyecto.....	51
<i>Figura 32</i> Esferas de referencia.....	53
<i>Figura 33</i> Nivelación del trípode.....	53
<i>Figura 34</i> Base metálica.....	54
<i>Figura 35</i> Protector del sensor.....	54
<i>Figura 36</i> Luces led del equipo .....	55
<i>Figura 37</i> Menú principal del equipo .....	55
<i>Figura 38</i> Parámetros de escaneo.....	56
<i>Figura 39</i> Altura del pecho.....	58
<i>Figura 40</i> Medición con la cinta métrica.....	59
<i>Figura 41</i> Archivos de escaneo – parcela A.....	61
<i>Figura 42</i> Archivos de escaneo – parcela B .....	61

<b>Figura 43</b> Entorno de trabajo software Scene .....	62
<b>Figura 44</b> Nuevo proyecto de procesamiento.....	62
<b>Figura 45</b> Asignación nombre al nuevo proyecto de procesamiento .....	63
<b>Figura 46</b> Carga de archivos de escaneo .....	63
<b>Figura 47</b> Pre procesamiento de escaneos.....	64
<b>Figura 48</b> Parámetros de pre procesamiento .....	64
<b>Figura 49</b> Herramienta de añadir nuevas esferas de referencia.....	65
<b>Figura 50</b> Desviación de la posición de las esferas de referencia .....	65
<b>Figura 51</b> Unión manual de escaneos.....	66
<b>Figura 52</b> Parámetros de creación de la nube de puntos .....	67
<b>Figura 53</b> Parámetros de exportación de la nube de puntos – pestaña “Export” .....	68
<b>Figura 54</b> Parámetros de exportación de la nube de puntos – pestaña “XYZ” .....	68
<b>Figura 55</b> Importación de la nube de puntos – software Trimble Real Works .....	69
<b>Figura 56</b> Herramienta de acercamiento .....	70
<b>Figura 57</b> Herramienta de mediciones .....	70
<b>Figura 58</b> Herramienta medición de distancia vertical.....	71
<b>Figura 59</b> Medición de la altura 1 .....	71
<b>Figura 60</b> Medición de la altura 2 .....	72
<b>Figura 61</b> Herramienta plano de corte.....	73
<b>Figura 62</b> Opción plano perpendicular a la pantalla .....	73
<b>Figura 63</b> Unión de las alturas 1 y 2 .....	74
<b>Figura 64</b> Opción de vista superior .....	74
<b>Figura 65</b> Plano de corte transversal .....	75

<b>Figura 66</b> Herramienta medición horizontal .....	76
<b>Figura 67</b> Distancia entre dos puntos .....	76
<b>Figura 68</b> Creación de medición .....	77
<b>Figura 69</b> Resultado de la medición en mm.....	77
<b>Figura 70</b> Propiedades de la medición .....	78
<b>Figura 71</b> Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov.....	80
<b>Figura 72</b> Prueba de hipótesis Z.....	81
<b>Figura 73</b> Prueba de hipótesis Chi cuadrado.....	81
<b>Figura 74</b> Localización parcelas de estudio .....	84
<b>Figura 75</b> Escena sin procesar de la parcela A.....	85
<b>Figura 76</b> Escena sin procesar de la parcela B.....	86
<b>Figura 77</b> Unión de las escenas.....	87
<b>Figura 78</b> Modelo tridimensional parcela A .....	87
<b>Figura 79</b> Modelo tridimensional parcela B.....	88
<b>Figura 80</b> Plano de corte transversal .....	88
<b>Figura 81</b> Diagramas de caja para mediciones de campo (a) y digital (b).....	91
<b>Figura 82</b> Histogramas de distribución de las mediciones en campo (a) y digital (b) .....	93
<b>Figura 83</b> Distribución de datos agrupados – Mediciones en campo.....	95
<b>Figura 84</b> Distribución de datos agrupados – Mediciones en digital .....	96
<b>Figura 85</b> Correlación lineal de Pearson .....	97
<b>Figura 86</b> Pinus radiata (a) y Casuarina equisetifolia (b).....	99
<b>Figura 87</b> Puntos de control del área de aplicación del proyecto.....	100
<b>Figura 88</b> Mapa de estimación de biomasa aérea.....	101

## RESUMEN

La biomasa es estimada mediante ecuaciones alométricas que incluyen variables dasométricas como el diámetro normal del árbol (DAP), determinados por técnicas convencionales de mediciones forestales y metodologías alternativas como el sistema escáner láser terrestre. El objetivo del trabajo, fue analizar los valores del DAP de los árboles aplicando tecnología escáner láser terrestre estática (ELT) y técnicas convencionales (TC) para estimar la biomasa aérea en un sector del bosque “La Armenia”. Se definieron dos parcelas, con el propósito de optimizar la captura y el manejo de la información LIDAR terrestre obtenida a través del escáner láser Faro Focus 3D, así como también de facilitar el trabajo de campo utilizando una cinta métrica en la medición del DAP de los árboles. A partir de los modelos tridimensionales generados, se midió digitalmente el DAP de 93 árboles localizados dentro del área de aplicación del proyecto. Se comprobó estadísticamente que los valores del DAP de los árboles medidos aplicando ELT, son iguales que los obtenidos empleando TC, dado que se aceptó la hipótesis de igualdad al realizar las pruebas Z y Chi cuadrado, además que el coeficiente de Pearson ( $R^2 = 0,99$ ), indicó una fuerte correlación de las variables. Finalmente, se estimó un total de 334,11 (Ton/Ha) de biomasa aérea forestal. La cantidad de biomasa estimada con base a observaciones directas del territorio mediante la aplicación de ELT, aporta información esencial para la toma de decisiones en la implementación de políticas sobre el manejo forestal del país.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **ESTIMACIÓN DE BIOMASA AÉREA**
- **DIÁMETRO NORMAL**
- **LA ARMENIA**
- **TECNOLOGÍA ESCÁNER LÁSER TERRESTRE**
- **TÉCNICAS CONVENCIONALES**

## **ABSTRACT**

The biomass is estimated by means of allometric equations that include diameter variables such as the normal diameter of the tree (DAP), determined by conventional forest measurement techniques and alternative methodologies such as the terrestrial laser scanner system. The objective of the work was to analyze the values of the DAP of the trees applying static terrestrial laser scanner (ELT) technology and conventional techniques (TC) to estimate the aerial biomass in a sector of the "La Armenia" forest. Two plots were defined, with the purpose of optimizing the capture and handling of the terrestrial LIDAR information obtained through the Faro Focus 3D laser scanner, as well as facilitating the field work using a tape measure in the measurement of the DAP of the trees. From the three-dimensional models generated, the DAP of 93 trees located within the project's application area was digitally measured. It was statistically verified that the values of the DAP of the trees measured applying ELT, are the same as those obtained using TC, given that the hypothesis of equality was accepted when performing the Z and Chi squared tests, in addition to the Pearson coefficient ( $R^2 = 0.99$ ), indicated a strong correlation of the variables. Finally, a total of 334,11 (Ton / Ha) of forest aerial biomass was estimated. The amount of biomass estimated based on direct observations of the territory through the application of ELT, provides information for decision making in the implementation of policies on forest management in the country.

### **KEYWORDS:**

- **ESTIMATION OF AERIAL BIOMASS**
- **TERRESTRIAL LASER SCANNER TECHNOLOGY**
- **NORMAL DIAMETER**
- **CONVENTIONAL TECHNIQUES**
- **LA ARMENIA**

## **CAPÍTULO I**

### **1. GENERALIDADES**

El presente proyecto se desarrolla en un sector del bosque de la Armenia ubicado en la provincia de Pichincha dentro del valle de los Chillos, su objetivo es realizar un análisis dasométrico de los valores del diámetro normal de los árboles obtenidos aplicando tecnología escáner láser terrestre estática y técnicas convencionales de campo para determinar la biomasa aérea a través de modelos alométricos de estimación, para lo cual también se propone definir parcelas de estudio en función de la densidad de vegetación del bosque y la aplicabilidad de las técnicas de levantamiento de información dasométrica y posteriormente analizar estadísticamente los datos obtenidos de las mediciones digitales y en campo.

La tecnología escáner láser terrestre se presenta como una metodología alternativa aplicable dentro del área forestal para la estimación de biomasa aérea, cuenta con el potencial de optimizar las técnicas convencionales de campo en términos de ahorro de tiempo y costos, así como también mejorar la precisión de los modelos alométricos para la estimación de biomasa.

#### **1.1. Antecedentes**

El cambio climático, y en especial los compromisos adquiridos por la República del Ecuador en el Acuerdo de París en el año 2016, han generado un mayor interés en el análisis de los ecosistemas forestales, considerando de manera especial la cantidad de biomasa, dada la relación con la fijación del carbono atmosférico y consecuentemente con la disminución del efecto invernadero (ONU, 2015).



Para estimar la cantidad de biomasa de un ecosistema forestal es necesario aplicar modelos alométricos, los cuales generalmente incluyen variables dasométricas como el diámetro normal y la altura de los árboles, cuyas mediciones se pueden realizar de manera tradicional o con el apoyo de diferentes sensores ópticos. El uso de la tecnología “Laser Imaging Detection and Ranging” (LIDAR) terrestre permite realizar mediciones de masas forestales facilitando la obtención de las variables dasométricas para la estimación de biomasa (Holmgren, 2003).

Se han realizado varios estudios dentro de los ámbitos mencionados como es el caso de Condés Ruíz y Riaño Arribas (2005), quienes presentaron un modelo alométrico que permitió la obtención de un mapa de la biomasa foliar a partir del sensor LIDAR en masas de *Pinus sylvestris l.* en Canencia (Madrid). Además que Coromines Munt, Blanco Casellas y Ruíz García (2005), estudiaron la aplicación del LIDAR aerotransportado para el cálculo de parámetros forestales como la altura del árbol, diámetros de copas, entre otros; demostrando de esa manera la aplicabilidad del sensor, sin embargo cabe recalcar que observaron una sobrestimación de los datos debido a que las alturas máximas de la vegetación medidas mediante LIDAR fueron inferiores a las alturas reales medidas en campo mediante técnicas convencionales en estructuras forestales más complejas.

Un análisis más completo realizado por Uzquiano S. (2017), tuvo por objetivo comparar mediciones dendrométricas y dasométricas mediante técnicas LIDAR, técnicas tradicionales y técnicas fotogramétricas aéreas y terrestres, determinando así cuál sería la biomasa en el monte público nº32 “Común de la Torre y Jaramiela”, perteneciente a la comunidad de Villa y Tierra Antigua de Cuéllar y situado en los términos municipales de Mata de Cuéllar y Vallelado (Segovia), con fines de gestión forestal. Concluyendo que las ecuaciones ajustadas que se emplearon para obtener los modelos de crecimiento de los bosques sirvieron para hacer predicciones precisas de la

forma en que van a crecer esas masas forestales. Una información muy importante para gestionar mejor los bosques y mejorar la rentabilidad económica que pueden tener.

Dentro del ámbito nacional, el estudio realizado por Quizhpe Parra (2015), estimó el potencial energético proveniente de la biomasa agroforestal en el área del Megaproyecto Pacalori desarrollado por Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) y el proyecto para el manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca. En esta estimación se aplicó tecnología LIDAR, obteniendo distintos modelos digitales de elevación (DEM) a partir de la nube de puntos generada; el rango de valores de altura presentes en los DEM fue utilizado para determinar las alturas promedio de las coberturas y de esa manera aplicar ecuaciones empíricas para la estimación de biomasa. Por otra parte, el estudio que realizó Molina Simbaña (2016), estableció una metodología para la calibración y validación de un modelo general de estimación de carbono sobre el suelo (ACD), usando LIDAR en un sector del parque Nacional Yasuní en Ecuador, los resultados obtenidos muestran el potencial de los datos LIDAR para caracterizar la estructura vertical de la vegetación en un bosque altamente diverso, lo cual permitió estimar la ACD y conocer sobre la distribución de la biomasa aérea y del contenido de carbono en la zona de estudio.

## **1.2. Planteamiento del problema**

El monitoreo de los ecosistemas forestales es una actividad fundamental en el manejo de los recursos naturales, uno de los atributos forestales es la cantidad de biomasa que posee un bosque, por tal motivo se requiere de la aplicación de metodologías adecuadas para determinar las variables dasométricas usadas en su estimación (Murcia García, et al., 2007). Para realizar las mediciones de dichas variables, comúnmente existen métodos destructivos directos e indirectos, que consisten

en cortar el árbol para determinar la biomasa pesando directamente cada componente; debido a ello se requiere de la aplicación de métodos de estimación no destructivos que garanticen la conservación del bosque y no dañen su estado natural, como es el caso del empleo de modelos alométricos que utilizan los valores de las mediciones dasométricas (Fonseca , Alice y Rey, 2009).

Tradicionalmente, los valores de las variables dasométricas se obtienen mediante técnicas convencionales basadas en el uso de la forcípula, el hipsómetro, la cinta métrica, entre otras herramientas, cuya aplicación resulta ser una tarea compleja, debido al excesivo tiempo de ejecución en grandes áreas forestales. Además, desde los años noventa se han implementado otras técnicas como el uso de dendrómetros láser, las cuales implican costos elevados, hecho que restringe su uso masivo en estudios forestales (Salas, Reyes y Bassaber, 2005).

Disponer de una técnica automatizada para realizar las mediciones dasométricas sobre grandes extensiones forestales tiene el potencial de mejorar las técnicas convencionales en términos de ahorro de tiempo y costos, por tal motivo la tecnología escáner láser terrestre se presenta como una alternativa aplicable dentro del área forestal para reproducir en 3D un bosque, medir cada árbol y mejorar la precisión de los modelos alométricos para la estimación de biomasa (Uzquiano Pérez, 2017).

### **1.3. Justificación e importancia**

El conocimiento sobre la biomasa en función de las diversas características estructurales dasométricas de los bosques es fundamental para el desarrollo adecuado de planes de manejo en recursos naturales, por lo cual surge la necesidad de aplicar metodologías para las mediciones de las variables dasométricas tales como el diámetro normal y la altura de los árboles, utilizadas en la estimación de biomasa (Domínguez Hernández y Huerta Ortega, 2012).

La estimación de la biomasa aérea de una determinada área se puede realizar mediante ecuaciones alométricas, que incluyen variables dasométricas como la altura y el diámetro normal del árbol, cuyos valores se pueden obtener de forma convencional usando herramientas de medición como la forcípula, el hipsómetro y la cinta métrica. Actualmente se ha desarrollado el uso de la tecnología escáner láser terrestre, la cual se plantea como una alternativa para la estimación de biomasa, mediante la captura de datos LIDAR, la misma que genera modelos tridimensionales de un bosque, sobre los cuales se pueden realizar las mediciones de las variables dasométricas empleadas en los modelos alométricos (Uzquiano Pérez, 2017). A pesar de las diversas aplicaciones que tiene la tecnología escáner láser terrestre, en el Ecuador no se han registrado trabajos relacionados a la aplicabilidad del sistema escáner láser terrestre en el ámbito forestal (Moskal, 2009).

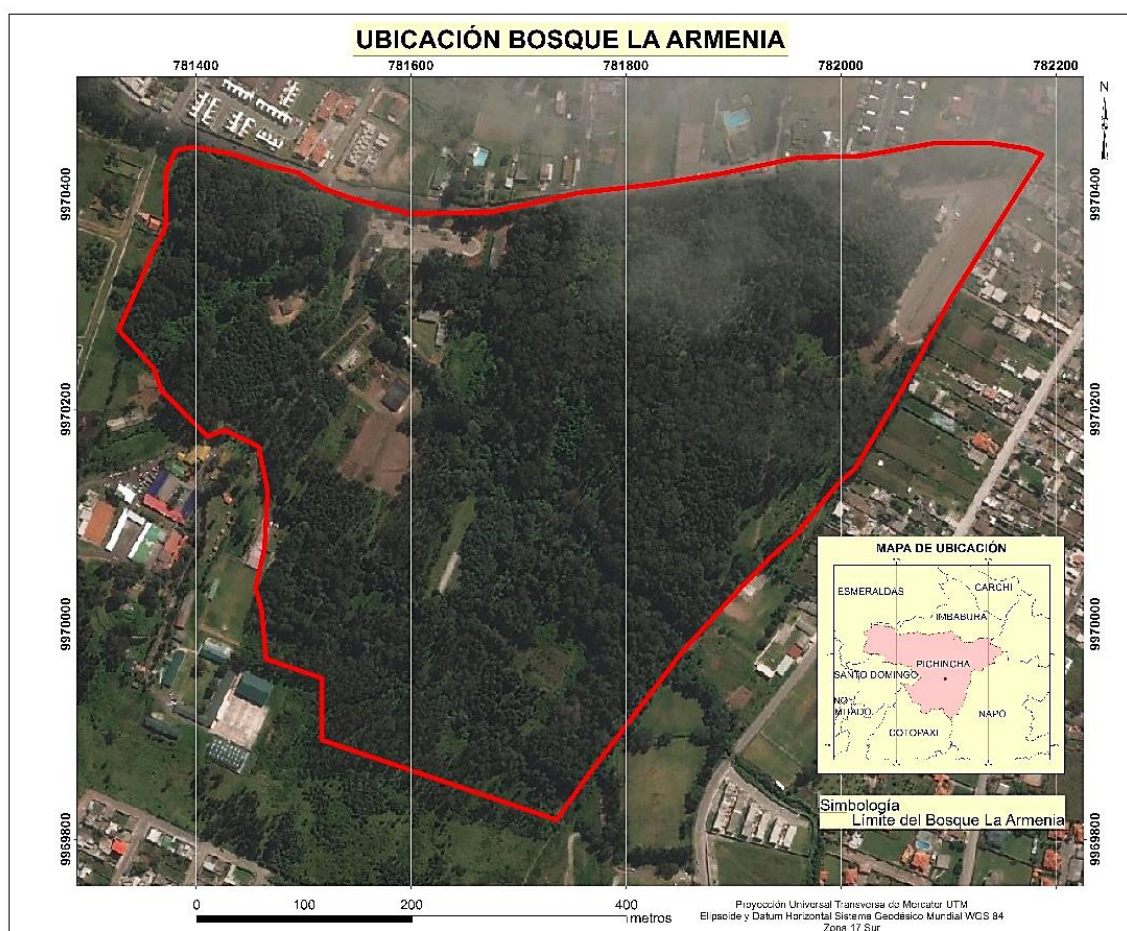
El interés por realizar el presente trabajo en el bosque “La Armenia”, se debe a que existen estudios similares realizados a través de sensores activos y pasivos basados en plataformas aéreas y satelitales tripuladas y no tripuladas (Guascal Sanguña , 2018), con la finalidad de comparar los resultados obtenidos en investigaciones futuras, se pretende realizar las mediciones dasométricas para estimar la biomasa en la misma zona de estudio, utilizando la tecnología LIDAR terrestre, mediante el escáner láser terrestre Faro Focus 3D y el software Scene para la captura y procesamiento de los datos, los mismos que serán proporcionados por el Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE) mediante el convenio institucional con el que cuenta la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

La nueva Política de Patrimonio Natural toma en cuenta a la conservación sostenible como uno de sus ejes estratégicos de gestión, por lo cual se ha implementado el primer Sistema Nacional de

Control Forestal (SNCF) en el país por parte del Ministerio del Ambiente (MAE), con el objetivo de contribuir a mejorar las condiciones de vida de los propietarios de bosques a través de la aplicación de mecanismos de manejo, uso y control de los recursos forestales y vida silvestre del país (MAE, 2017), teniendo de esta manera como principal beneficiario del presente proyecto al MAE, institución encargada del monitoreo forestal, al presentar a la tecnología escáner láser terrestre como una metodología alternativa de estimación de biomasa del bosque “La Armenia”.

#### 1.4. Área de influencia

El área de influencia se encuentra en el sector La Armenia, en el valle de los Chillos de la provincia de Pichincha, que abarca parte del bosque “La Armenia”, cuyo acceso es desde la utopista general Rumiñahui hacia Guangopolo, ingresando por el desvío del puente 3 (ver Figura 1).



*Figura 1.* Ubicación bosque La Armenia

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

Analizar los valores de una de las variables dasométricas obtenidos aplicando tecnología escáner láser terrestre estática y la técnica convencional para estimar la biomasa aérea en un sector del bosque “La Armenia”.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Definir las parcelas de estudio en función de la densidad de vegetación del bosque “La Armenia” y el diseño del sistema de medición del escáner láser, mediante insumos fotográficos y visitas de campo.
- Capturar datos LIDAR utilizando el escáner láser terrestre Faro Focus 3D para obtener valores de los diámetros de los árboles usados en la estimación de biomasa aérea.
- Aplicar la técnica convencional de campo basada en el uso de la cinta métrica para realizar mediciones de los diámetros de los árboles e incluir sus valores en la estimación de biomasa aérea.
- Analizar estadísticamente los datos obtenidos con el escáner láser terrestre y la técnica convencional de campo para la medición de una de las variables dasométricas como el diámetro de los árboles.

## **1.6. Metas**

- 1 modelo tridimensional de las parcelas de estudio escaneadas.
- 1 informe estadístico de las mediciones digitales y en campo del diámetro normal de los árboles.

- 1 mapa de Estimación de biomasa aérea de la zona de aplicación del proyecto dentro del bosque “La Armenia”.

## 1.7. Variables de la investigación

### 1.7.1. Independientes

- Diámetro normal del árbol: los valores son expresados en centímetros (cm).
- Densidad del árbol: los valores son expresados en kilogramos sobre metros cúbicos  $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ .
- Nube de puntos: densidad de puntos obtenidos de la aplicación del escáner láser terrestre (coordenadas x,y,z).
- Ubicación de parcelas de estudio: coordenadas UTM (metros)
- Área de las parcelas de estudio: valores expresados en hectáreas (Ha).
- Perímetro de las parcelas de estudio: valores expresados en metros (m).

### 1.7.2. Dependientes

- Volumen del árbol: los valores calculados son expresados en metros cúbicos ( $m^3$ ).
- Peso del árbol: generalmente se expresa en (Kg).
- Cantidad estimada de biomasa: los valores son expresados en kilogramos sobre hectáreas  $\left(\frac{Kg}{Ha}\right)$ .

### 1.7.3. Operacionalización de las variables

En la Tabla 1, se presenta la Operacionalización de las variables del proyecto, detallando la variable y su naturaleza, así como también las dimensiones y sus indicadores.



**Tabla 1**  
*Operacionalización de variables*

<b>Tipo</b>	<b>Variable</b>	<b>Naturaleza</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Método de obtención</b>
Independiente	Diámetro normal del árbol	Variable cuantitativa continua	Centímetros (cm)	Técnicas convencionales y tecnología escáner láser terrestre
	Densidad del árbol	Variable cuantitativa continua	Kilogramos sobre metros cúbicos $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	
	Nube de puntos	Contiene variables continuas tridimensionales	Coordenadas X,Y,Z	Pulsos LIDAR del escáner láser terrestre
	Ubicación de parcelas de estudio	Contiene variables continuas bidimensionales	Coordenadas este y norte UTM (metros)	Identificación a través de la Ortofoto SIGTIERRAS MAG
	Área de las parcelas de estudio	Variable cuantitativa continua	Hectáreas (Ha.)	
	Perímetro de las parcelas de estudio	Variable cuantitativa continua	Metros (m)	
Dependiente	Volumen del árbol	Variable cuantitativa continua	Metros cúbicos ( $m^3$ ).	Ecuaciones alométricas
	Peso del árbol	Variable cuantitativa continua	Kilogramos (Kg)	
	Cantidad estimada de biomasa	Variable cuantitativa continua	Kilogramos sobre hectárea $\left(\frac{Kg}{Ha}\right)$ .	

Fuente: Modificado de Andrade y Cerda (2014) y Emanuelli (2014)

## **CAPÍTULO II**

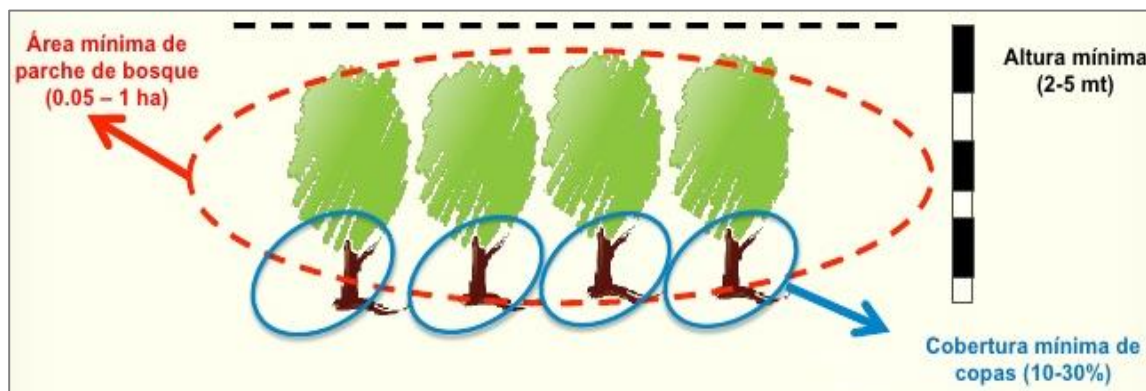
### **2. MARCO TEÓRICO**

El presente capítulo abarca diferentes temas relacionados con el desarrollo del proyecto, se enfoca en tres ejes principales. El primer eje se refiere a la estimación de biomasa, en el cual se aborda las definiciones de bosque y biomasa, especificando los tipos de composición de biomasa existentes, así como también las ecuaciones alométricas aplicadas en su estimación. El segundo eje de medición de variables dasométricas, incluye la definición de dasometría, expone los métodos directos (herramientas de campo como la cinta métrica, forcípula e hipsómetro) e indirectos (equipos tecnológicos como el escáner láser terrestre) de mediciones forestales y explica la medición de las principales variables dasométricas que son el diámetro normal y la altura del árbol. El tercer eje es el análisis estadístico, dentro del cual se presentan los conceptos básicos empleados en el lenguaje estadístico y se describen los parámetros de la estadística descriptiva (parámetros de centralización, dispersión, posición y forma) e inferencial (prueba de hipótesis y sus respectivos estadísticos de prueba).

#### **2.1. Estimación de biomasa**

##### **2.1.1. Bosque**

De acuerdo con la FAO (2010), el término bosque se refiere al área comprendida por más de 0,5 Ha, dotada de árboles de una altura superior a 5 metros, incluyendo árboles jóvenes que aún no han alcanzado esa altura pero que pueden hacerlo; además incluye aquellas áreas que tengan una cubierta de dosel o de copas de los árboles superior al 10%. Está excluida el área de uso predominante agrícola o urbano (ver Figura 2).



**Figura 2.** Definición de bosque  
Fuente: (Enviogreen, 2012)

El bosque es un ecosistema constituido por árboles, arbustos, otras especies vegetales y animales, que se encuentra interrelacionado con el suelo, el aire, el agua, la biodiversidad, el paisaje, entre otros recursos naturales. Además, el bosque ofrece bienes y servicios ambientales como la belleza escénica beneficiando así a la industria del turismo ecológico, el recurso hídrico y el aprovechamiento de la biomasa que contribuye al desarrollo del sector económico de un país, la comunidad nacional e internacional se beneficia por la regulación de gases de efecto invernadero y el suministro de productos alimenticios y medicinales, el control de la erosión y la conservación de los suelos garantiza la productividad y la reducción de riesgos en la zona (Barrantes, Chaves y Vinueza, 2010) (Indacochea, Jiménez y Parrales , 2015); mundialmente existen estimaciones que sostienen que los bosques almacenan alrededor de 289 giga toneladas de carbono en su biomasa por lo que resulta de vital importancia su conservación evitando la deforestación y degradación de los mismos (Cordero, 2011).

### **2.1.2. Biomasa**

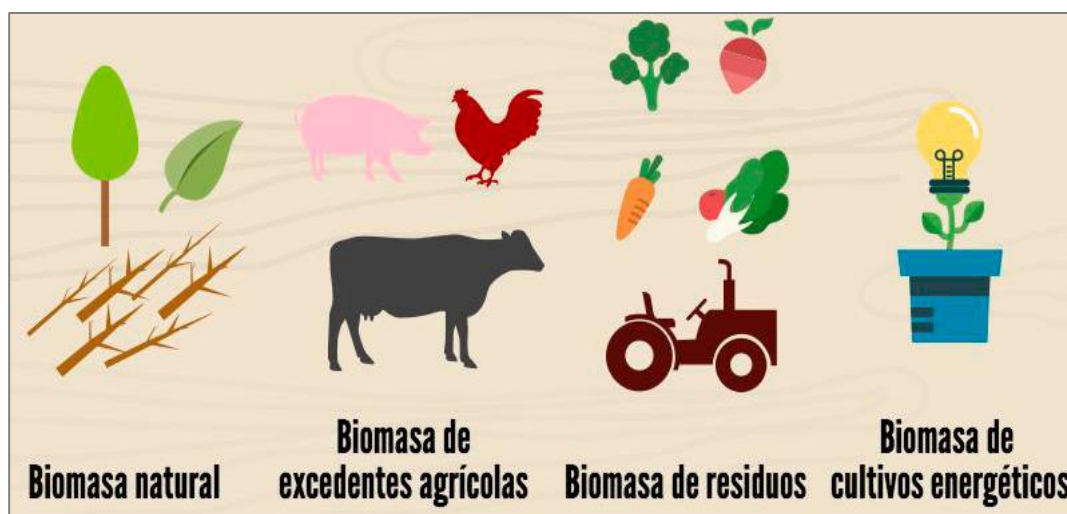
#### **a) Definición**

La biomasa comprende un conjunto heterogéneo de materias orgánicas por su origen y por su naturaleza. Es una de las fuentes de energías renovables más antiguas, que puede emplearse como

combustible para la generación de calor o electricidad, en algunos casos puede transformarse en productos sustitutos del petróleo en los motores de autos (Patiño Martínez, 2014).

### b) Tipos de composición de biomasa

Existen diferentes tipos de composición de biomasa como recurso energético, entre los cuales se encuentran la biomasa natural que se refiere a los residuos en la naturaleza sin intervención humana, la biomasa de excedentes agrícolas provenientes de los cultivos que no han sido usados para la alimentación, la biomasa residual abarca los residuos orgánicos provenientes de actividades antropogénicas, y la biomasa de los cultivos energéticos que son aquellos procedentes de plantaciones específicas como los cultivos oleaginosos, alcoholígenos y lignocelulósicos que tiene como finalidad el aprovechamiento energético de los mismos (ver Figura 3) (García Garrido, 2012) (AEFECC, 2015) (Arévalo, 2015)(Vignote, 2016).



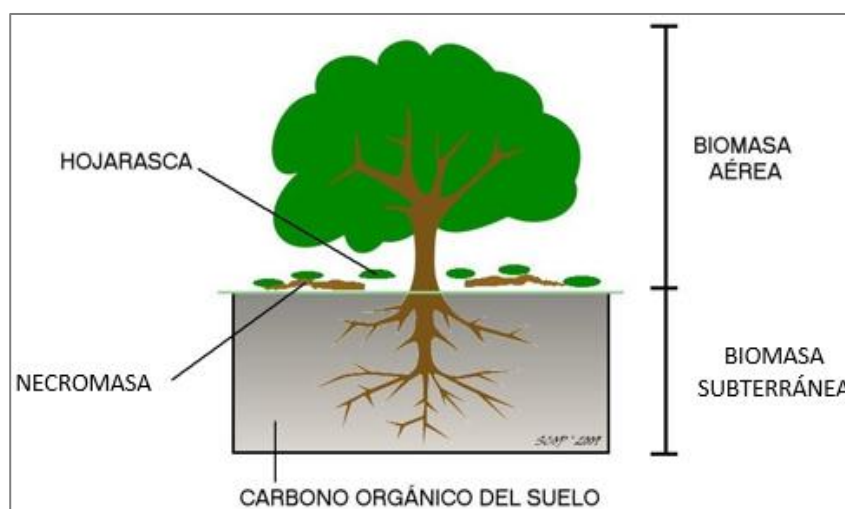
*Figura 3.* Tipos de composición de biomasa

Fuente: (AEFECC, 2015)

#### 2.1.3. Biomasa forestal aérea

La biomasa forestal se refiere al peso de materia orgánica existente en un ecosistema forestal, valor estimado por encima (biomasa subterránea) y por debajo del suelo (biomasa aérea), como se

puede verificar en la Figura 4. Generalmente es cuantificada en kilogramos o toneladas por hectárea (Goyoso, Guerra y Schlegel, 2000). El término de biomasa aérea corresponde a la biomasa de la vegetación viva que se encuentra por encima del suelo, incluidos tallos, cepas, ramas, corteza y follaje (IPCC, 2007). Es importante considerar que la biomasa de los bosques contiene una tasa alta de fijación de  $N_2$  y  $CO_2$ ; por tanto al existir una deficiencia de éstos, se incrementa el  $CO_2$  atmosférico a la vez que se produce el efecto invernadero provocando así el calentamiento global (Patiño Martínez, 2014).



**Figura 4.** Biomasa forestal aérea  
Fuente: (Cámara Forestal de Bolivia, 2016)

La biomasa aérea es un indicador del crecimiento y la fijación de carbono de los bosques que contribuye a la reducción de los gases de efecto invernadero y favorece a la planificación forestal, con el objetivo de reducir los impactos negativos del cambio climático (Hernández et al., 2017). Los factores que influyen en la formación de la biomasa aérea son la composición florística, la edad, condiciones climáticas, edáficas y topográficas, así como también la abundancia de cada especie por comunidad vegetal, por lo que para inferir la cantidad de biomasa aérea es necesario

aplicar modelos alométricos que consideran la densidad específica y las variables dasométricas como la altura y el diámetro normal de los árboles (Paipa y Triana, 2017).

#### 2.1.4. Ecuaciones alométricas de estimación de biomasa aérea

En el ámbito forestal, el término alometría se refiere a la variación de los valores en la medición de las dimensiones de un árbol a otro, se trata de analizar el crecimiento heterogéneo relativo de las partes de un árbol en desarrollo (Navarro et al., 2017). Las ecuaciones alométricas permiten obtener una estimación de la biomasa aérea y representan una alternativa para cuantificar el crecimiento de un bosque y la capacidad de fijación de carbono del mismo (Hernández et al., 2017).

Los modelos de estimación de biomasa aérea incluyen los valores del diámetro normal de los árboles  $DAP$  (cm), la altura total de los árboles  $H$  (m) y la gravedad específica de los árboles  $\rho$  ( $\frac{g}{cm^3}$ ). Con base a lo mencionado, en la ecuación 1 se presenta el modelo de estimación de biomasa aérea que considera las variables dasométricas de los árboles (Chave et al., 2005).

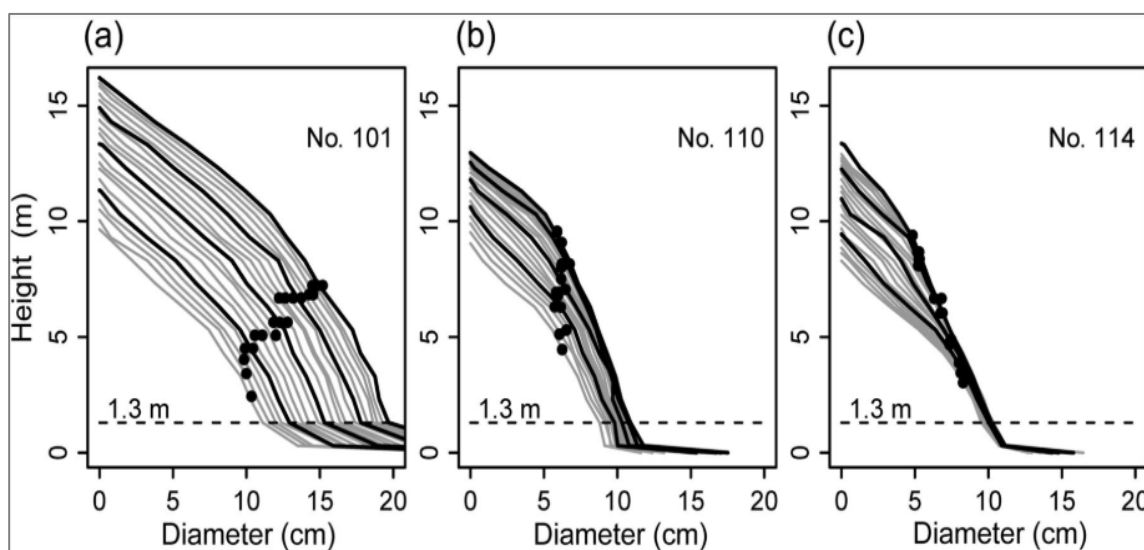
$$\ln(BA) = -2.680 + 1.805 \ln(DAP) + 1.038 \ln(H) + 0.377 \ln(\rho) \quad (1)$$

Fuente: (Chave et al., 2005)

En donde,

- BA: Biomasa aérea estimada (Kg)
- DAP: Diámetro normal o diámetro a la altura del pecho de los árboles (cm)
- H: Altura total de los árboles (m)
- $\rho$ : Densidad específica de los árboles ( $\frac{g}{cm^3}$ )

En caso de que la altura total de los árboles no sea posible determinarla, es mejor no incluir el valor de dicha variable en la estimación de la bioma aérea (Williams y Schreuder , 2000). Por tal motivo, al representar la altura contra el diámetro se observa una relación de forma cóncava, que indica una desviación progresiva de la alometría ideal durante la ontogenia del árbol (ver Figura 5), deduciendo así la ecuación 2 para la estimación de biomasa aérea incluyendo los valores del diámetro normal y la densidad específica de los árboles de interés (Chave et al., 2005).



**Figura 5.** Relación diámetro versus altura  
Fuente: (Sumida , Miyaura y Torii, 2013)

$$BA = \rho * \exp(-1.499 + 2.148 \ln(DAP) + 0.207 (\ln(DAP))^2 - 0.0281(\ln(DAP))^3) \quad (2)$$

Fuente: (Chave et al., 2005)

En donde,

- BA: Biomasa aérea estimada (Kg)
- DAP: Diámetro normal o diámetro a la altura del pecho de los árboles (cm)
- $\rho$ : Densidad específica de los árboles ( $\frac{g}{cm^3}$ )

La aplicación de los modelos alométricos de estimación de biomasa aérea es válida para aquellos árboles que se encuentren dentro del rango de 5 a 156 cm de diámetro normal. El error estándar de estimación de biomasa usando la ecuación 1 es de 12.5% y para la ecuación 2 es de 19.5% (Chave et al., 2005).

## **2.2. Medición de variables dasométricas**

### **2.2.1. Dasometría**

#### **a) Definición**

De acuerdo con López Peña (2008), la dasometría es una ciencia forestal que se encarga de las mediciones de árboles y masas forestales, incluyendo las técnicas de medición y las leyes métricas que rigen su crecimiento.

#### **b) División**

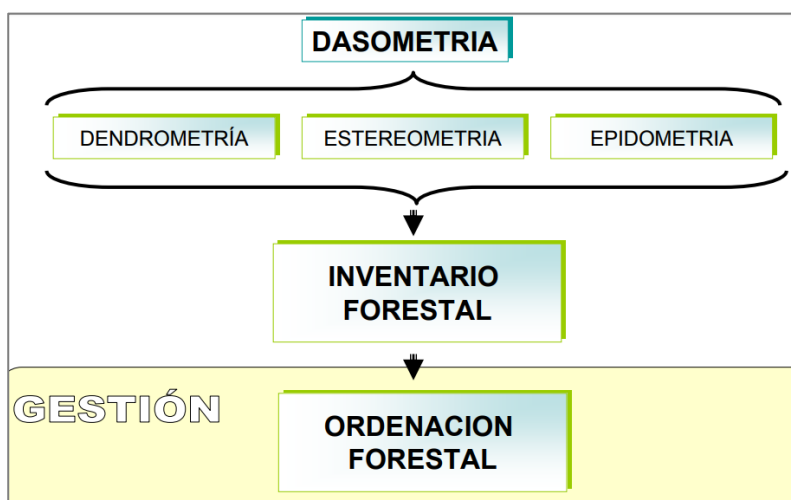
El estudio de la dasometría se divide en tres partes que son:

- Dendrometría: comprende la medida de las dimensiones del árbol, el estudio de su forma y la determinación de su volumen.
- Estereometría: trata acerca de las estimaciones métricas y el cálculo del volumen de la masa forestal, entendida como un conjunto de árboles que coexisten en un espacio común.
- Epidometría: se refiere a las técnicas de medición de las dimensiones del árbol y las leyes que regulan la evolución de las masas forestales.

#### **c) Importancia**



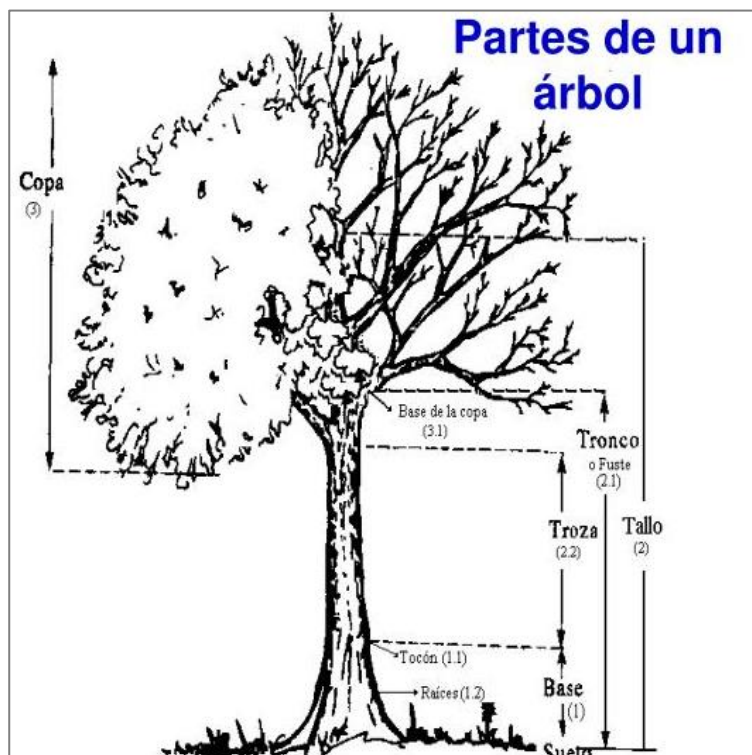
La dasometría en conjunto con la dendrometría, la estereometría y la epidimetría se constituye como una herramienta importante para el desarrollo de investigaciones forestales, debido a que permite obtener información necesaria como el inventario forestal, para facilitar la toma de decisiones en el manejo de recursos naturales de interés, así como también en la planificación, gestión y ordenamiento forestal de una determinada área (ver Figura 6) (López Peña, 2008).



*Figura 6.* Concepto de dasometría  
Fuente: (López Peña, 2008)

#### d) Variables dasométricas

De acuerdo con Andrade y Cerda (2014), inicialmente para aplicar los procedimientos dasométricos en las mediciones de árboles y masas forestales, es necesario conocer las partes de un árbol (ver Figura 7).



*Figura 7.* Partes de un árbol  
Fuente: (Andrade y Cerda, 2014)

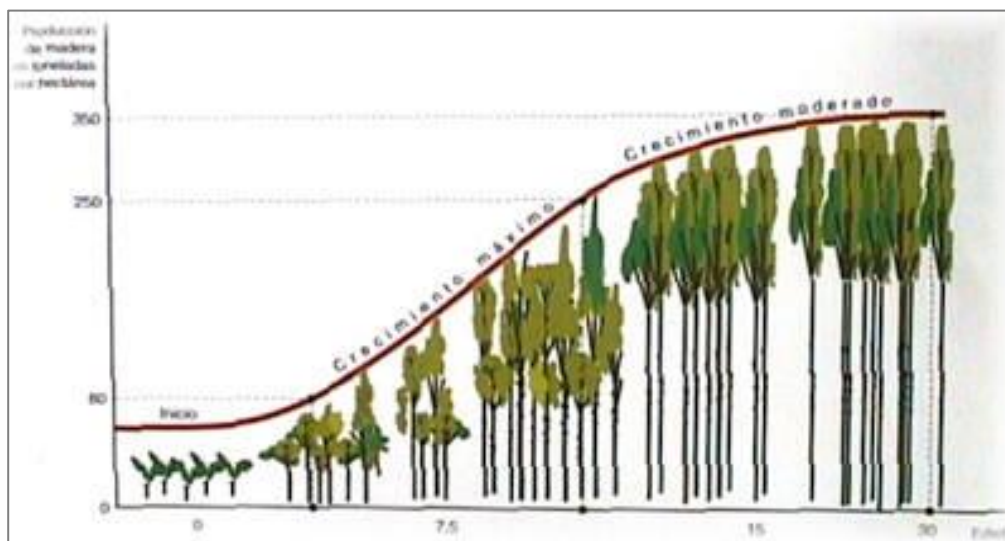
Las variables dasométricas que se miden son el diámetro a la altura del pecho, la altura total, comercial y de copa. Con los valores de las variables mencionadas se estima el área basal, el volumen total y comercial de madera, la biomasa aérea, biomasa de raíces y el carbono en biomasa (Andrade y Cerda, 2014). En la Figura 8 se presenta un resumen de las principales variables dasométricas, indicando la parte del árbol, los atributos, la simbología, la unidad de medida y el instrumento o método de medición.

PARTE DEL ÁRBOL	ATRIBUTO	SIMBOLOGÍA (IUFRO <sup>1</sup> )	UNIDAD DE MEDIDA (sistema métrico decimal)	INSTRUMENTO / MÉTODO DE MEDICIÓN
Fuste	Diámetro	$d$	cm	Cinta diamétrica
	Circunferencia o perímetro	$c$	cm	Cinta métrica
	Altura	$h$	m	Clinómetro
	Volumen	$v$	m <sup>3</sup>	Modelos, tablas, factor de forma
	Área transversal	$g$	m <sup>2</sup>	$g = \pi / 4 \cdot DAP^2$
	Área Basal	$G$	m <sup>2</sup> árbol <sup>-1</sup> ó m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	$G = \sum g$
Copa	Biomasa	$B$	t o Mg	Modelos, tablas, factor de forma
	Diámetro	$d$	cm	Métodos Indirectos
	Altura	$h$	m	Clinómetro
	Biomasa	$B$	t o Mg	Modelos, tablas, factor de forma

**Figura 8.** Resumen de variables dasométricas  
Fuente: (IUFRO, 1969)

### 2.2.2. Mediciones forestales

Las mediciones forestales se refieren a la determinación y estimación de los valores de las variables dasométricas a fin de predecir el volumen, la biomasa y la edad de un recurso forestal así como también el estudio del crecimiento y la productividad acerca de los árboles y rodales forestales (ver Figura 9). Su importancia radica en la gestión forestal enfocada en la planificación, dasocracia y manejo de los ecosistemas forestales, aspectos necesarios para la toma de decisiones dentro de entidades rectoras (Aldana Pereira, 2008).



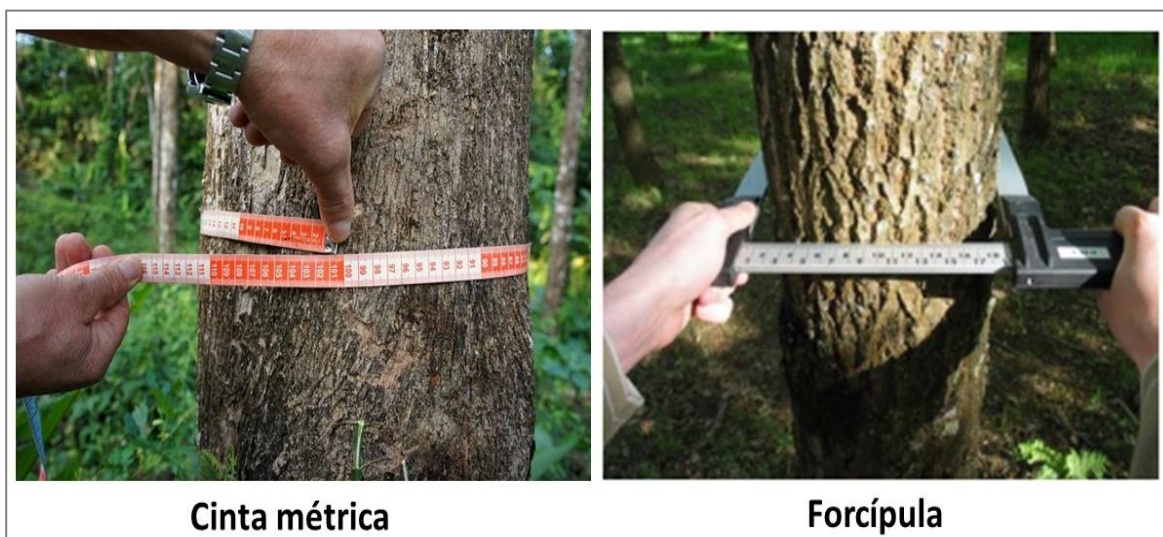
**Figura 9.** Crecimiento de una masa forestal

Fuente: (González et al., 2014)

Las mediciones forestales se clasifican de acuerdo a los métodos de obtención de los valores de las variables dasométricas, basadas en el uso de herramientas y equipos de medición, en tal motivo existen dos métodos de mediciones forestales: el método directo y el método indirecto (Emanuelli, 2014).

#### **a) Método directo**

El método directo está basado en las mediciones realizadas por el hombre sobre el objeto de interés, es decir existe un contacto directo físico, óptico o acústico. Es importante señalar que cuando se realizan las mediciones forestales directas corresponden a la determinación de valores de variables dasométricas, como es el caso del diámetro a la altura del pecho (DAP) determinado mediante el uso de la cinta métrica o la forcípula (ver Figura 10), así como también el espesor de la corteza, la longitud de un árbol derribado, entre otras (Aldana Pereira, 2008) (Emanuelli, 2014).



*Figura 10.* Herramientas de mediciones directas  
Fuente: (Diéguez et al., 2005)

Dentro de las herramientas más comunes utilizadas en el método directo se encuentran la cinta métrica, la forcípula y el hipsómetro, empleadas para determinar el diámetro normal y la altura de los árboles de una masa forestal.

#### - **Uso de la cinta métrica**

De acuerdo con la FAO (2010), la cinta métrica permite medir directamente el diámetro, al rodear el tronco a la altura de 1.30 m o a su vez a la altura del pecho, teniendo en cuenta que se la debe ubicar perpendicularmente al eje longitudinal del tronco del árbol a medir. El valor de la medición mediante el uso de esta herramienta, se lo obtiene a partir de la ecuación 3.

$$c = \pi(DAP) \quad (3)$$

Fuente: FAO (2010)

En donde,

- $c$ : circunferencia del árbol medido con la cinta métrica (cm)
- $\pi$  : valor de phi, aproximadamente 3.1416.
- $DAP$ : diámetro normal del árbol (cm)

### - **Uso de la forcípula**

La forcípula es una herramienta forestal usada para la medición de diámetros normales de los árboles. En árboles en pie, el diámetro normal representativo corresponde al que se mide a 1.30 m desde el nivel del suelo. Para el uso de la forcípula hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La forcípula debe abarcar ajustadamente el tronco a medir, pero sin comprimir demasiado la corteza.
- Para determinar la altura de medición del diámetro, se utiliza una cinta métrica, manteniendo el contacto directo entre la cinta y la corteza del árbol a medir y tomando en cuenta que la cinta no esté torcida.
- Si existe el caso de árboles con perímetros dimétricos no circulares, se debe medir los dos diámetros perpendiculares entre sí y obteniendo la media de los dos valores (FAO, 2010).

### - **Uso del hipsómetro**

El uso de esta herramienta nos permite obtener la altura de los árboles, mediante las siguientes etapas de procedimiento:

- Se debe tomar diferentes distancias del árbol a medir (a 15, 20 o 30 metros por ejemplo). Es recomendable que la distancia sea equivalente a la altura estimada a primera vista del árbol a medir.
- A través del hipsómetro se debe observar la copa del árbol a medir.
- Se realiza la observación de la base del árbol a medir mediante el hipsómetro.

- Adición o sustracción de los dos resultados de observación dependiendo el caso; se debe adicionar si el observador está en la parte alta de la ladera y se debe sustraer si el observador está en la parte baja de la ladera con respecto al árbol a medir.

### b) Método indirecto

El método indirecto se fundamenta en las mediciones que permiten inferir información sobre las variables dasométricas de una forma menos inmediata que el método directo, y se requiere de un procesamiento previo de los datos obtenidos. Generalmente se utilizan equipos tecnológicos como por ejemplo los vehículos aéreos no transportados (UAV) empleados para la estimación de alturas de un rodal forestal, la aplicación del escáner láser terrestre para la estimación del diámetro normal de los árboles, el uso del relascopio de Bitterlich para las mediciones de diámetro a alturas inaccesibles, entre otros como se puede verificar en la Figura 11 (Aldana Pereira, 2008).



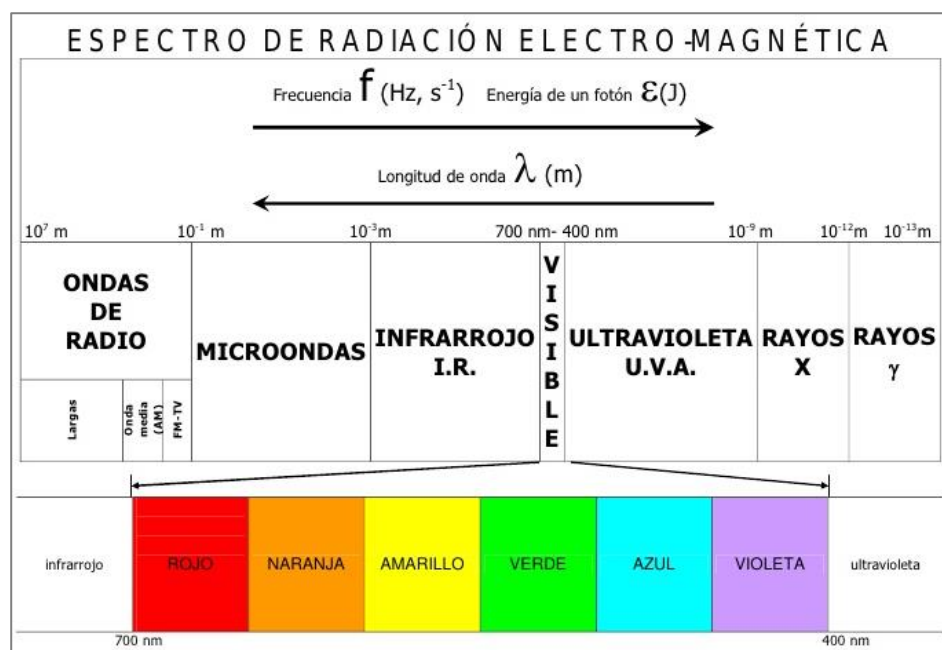
*Figura 11.* Equipos de mediciones indirectas  
Fuente: (Tech Advisor, 2018)

Dentro de los avances tecnológicos para efectuar mediciones indirectas dentro del campo forestal, la tecnología LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) se postula como una

alternativa eficaz para la estimación de variables dasométricas cuyos valores son empleados en modelos de estimación de biomasa forestal (Uzquiano Pérez, 2017).

### - Tecnología LIDAR

Su acrónimo corresponde a Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging, también conocida como “laser scanning” (Wehr y Lohr, 1999). Es un sistema activo de teledetección, lo que significa que utiliza una fuente de energía propia, aunque también emplea energía láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Los sistemas LIDAR trabajan en la región del espectro electromagnético del infrarrojo cercano (IRC), generalmente entre las longitudes de onda de 1040 nm y 1065 nm (ver Figura 12), por lo cual dichos sistemas están afectados por las condiciones atmosféricas como nieve, nubes, entre otras (García Alonso, 2017).



**Figura 12.** Espectro de radiación electromagnética  
Fuente: (Navarro Rodríguez, 2012)



### - Escáner láser terrestre

Uno de los equipos de la tecnología LIDAR es el escáner láser terrestre, éste dispositivo permite realizar reconstrucciones digitales, planos bidimensionales o modelos tridimensionales, para analizar un entorno u objeto real con el fin de tomar datos de su forma o apariencia (ver Figura 13). La ventaja de esta tecnología es el hecho fundamental de capturar una gran cantidad de nube de puntos con una alta precisión en un período de tiempo relativamente corto (Merlo, 2015).



*Figura 13.* Escáner láser terrestre  
Fuente: (FPInnovations, 2012)

### - Nube de puntos

Para los escáneres 3D o sensores LIDAR, las nubes de puntos representan la realidad física de un entorno y objeto, conformada por una alta densidad de puntos determinados por su posición X, Y y Z, es decir representan modelos tridimensionales. La alta densidad de puntos significa que, para realizar la reconstrucción digital de una determinada área, puede ser necesario registrar millones de puntos. La representación de los puntos en la nube tiene un valor

de color específico (R, G, B) e intensidad mostrados en la pantalla como se puede verificar en la Figura 14 (Guinea de Salas y Jorrín, 2010).



*Figura 14.* Nube de puntos  
Fuente: (CIEFAP, 2017)

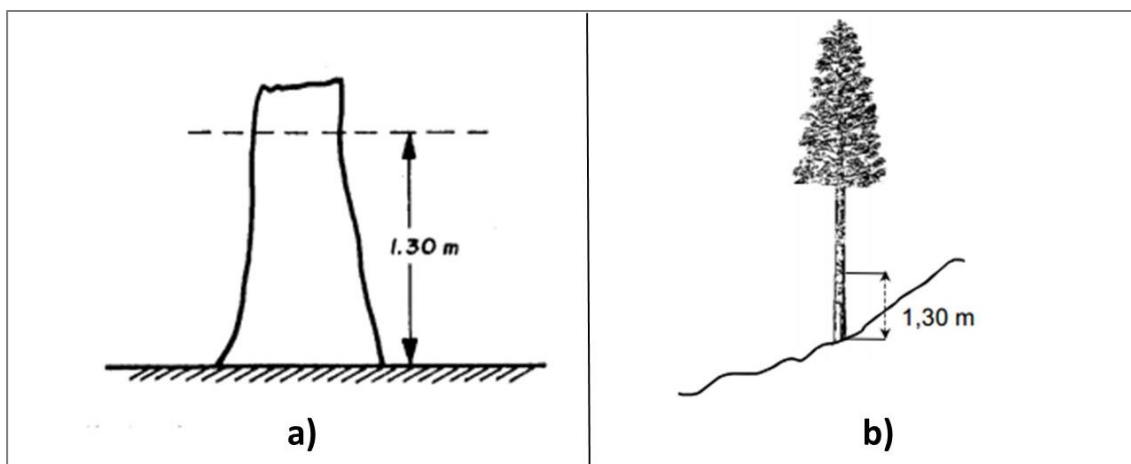
### **2.2.3. Medición del diámetro normal**

El conocimiento del valor del diámetro normal es fundamental para cuantificar el volumen, el estado de desarrollo y la estimación de biomasa de un árbol, así como también permite determinar la distribución diamétrica de un bosque para inferir el crecimiento de un ecosistema forestal (Diéguez et al., 2005).

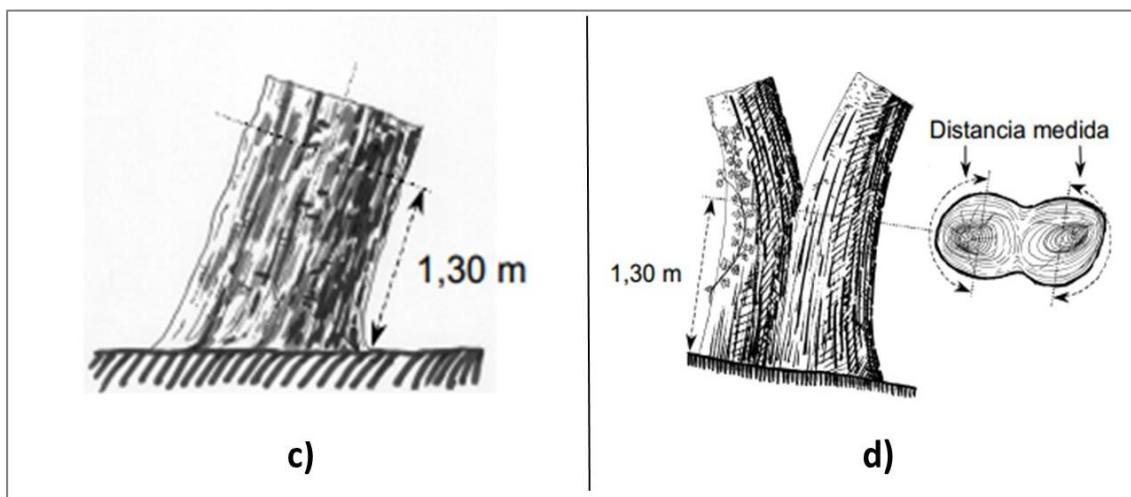
La medición del diámetro se la efectúa a la altura del pecho o altura normal, es decir 1.30 m sobre el suelo, valor de referencia que fue adoptado convencionalmente porque es la altura a la cual el operador maneja fácilmente las herramientas de medición, además en las zonas tropicales y templadas la mayoría de los árboles tienen deformaciones en su tronco y se considera que a 1.30 m, éstas son bastante reducidas (Aldana Pereira, 2008).

Existen diferentes situaciones para realizar las mediciones del diámetro a la altura normal, que dependen de la localización y la forma del árbol, a continuación se presenta algunos casos (ver Figuras 15, 16, 17, 18):

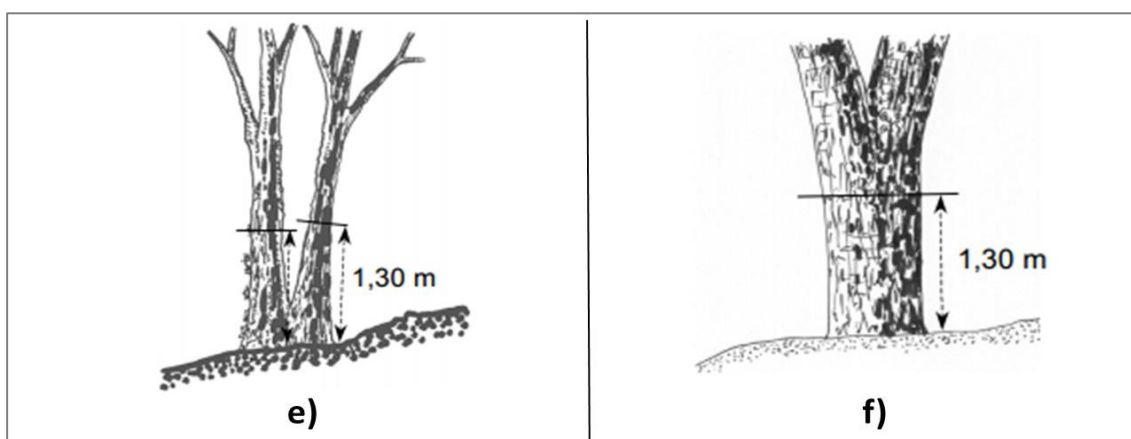
- a) Altura normal en terrenos llanos
- b) Altura normal en terrenos inclinados
- c) Altura normal en un árbol inclinado
- d) Diámetro normal en árboles que crecen juntos
- e) Altura normal en un árbol bifurcado por debajo de 1.30 m sobre el suelo
- f) Altura normal en un árbol bifurcado por encima de 1.30 m sobre el suelo
- g) Altura normal en un árbol que tiene parte de su sistema radical sobre la superficie
- h) Altura normal en un árbol caído



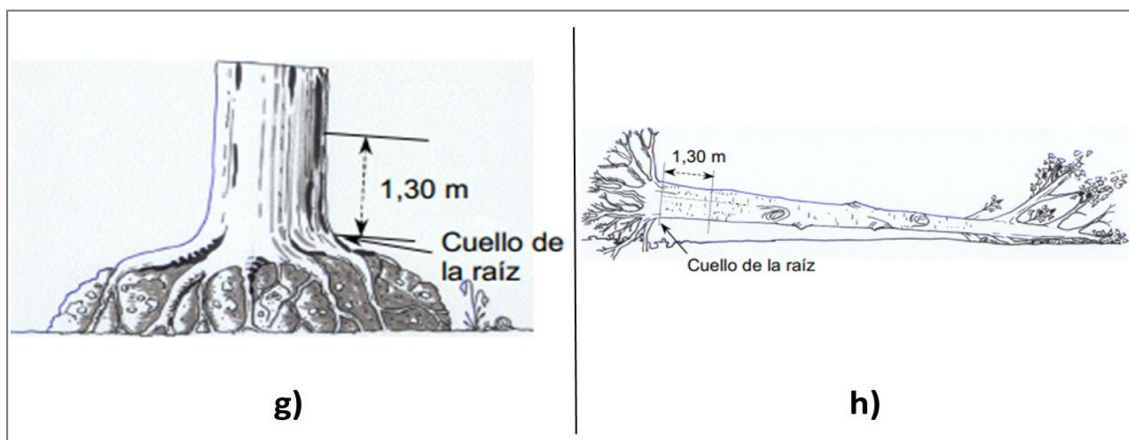
**Figura 15.** Altura normal en terrenos llanos e inclinados  
Fuente: (Diéguez et al., 2005)



**Figura 16.** Altura normal de un árbol inclinado y diámetro normal de árboles contiguos  
Fuente: (Diéguez et al., 2005)



**Figura 17.** Altura normal de árboles bifurcados por abajo y por encima de 1.30 m  
Fuente: (Diéguez et al., 2005)

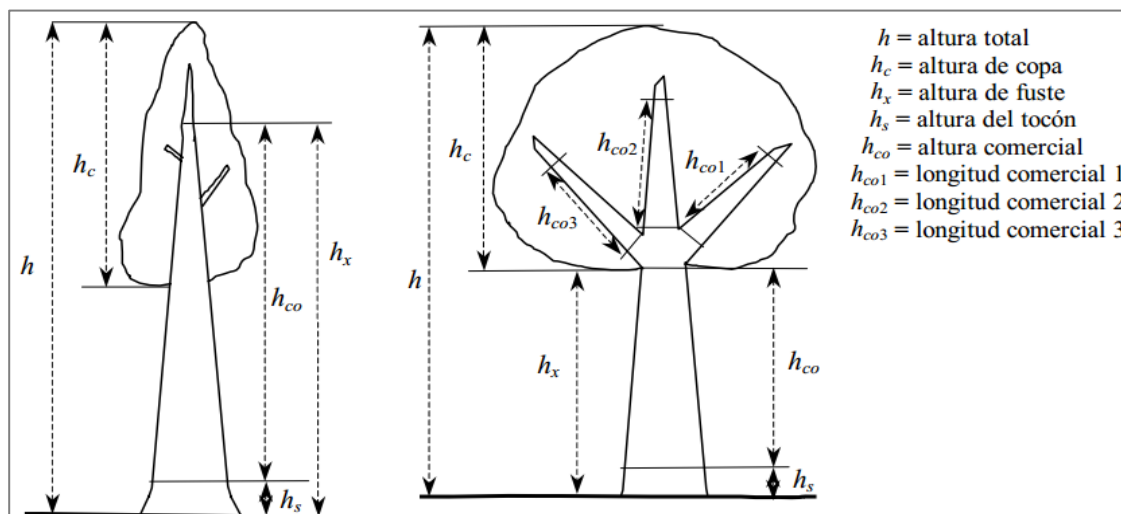


**Figura 18.** Altura normal de un árbol con raíces sobre la superficie y de un árbol caído  
Fuente: (Diéguez et al., 2005)

#### 2.2.4. Medición de la altura

El valor de la altura es imprescindible para el cálculo del volumen y estimación de biomasa, además es fundamental para analizar el desarrollo de un árbol y clasificar a un determinado ecosistema forestal en función de la productividad (Diéguez et al., 2005). La altura total de un árbol en pie se refiere a la distancia lineal que existe entre el ápice (parte más alta de la copa del árbol) y la base del árbol que están en contacto con la superficie del terreno. Su valor puede ser obtenido por mediciones directas o por estimaciones (Emanuelli, 2014).

Dentro del campo forestal, existen cinco tipos de alturas dependiendo del punto considerado para medirla, las cuales son la altura total, altura de copa, altura de fuste, altura de tocón y la altura comercial, las mismas que se encuentran identificadas en la Figura 19 (López y Acosta, 2014).



**Figura 19.** Tipos de alturas forestales  
 Fuente: (Diéguez et al., 2005)

En la medición de las alturas, se presentan situaciones especiales que dependen de la localización y la forma del árbol, a continuación se muestra algunos casos (ver Figuras 20 y 21).

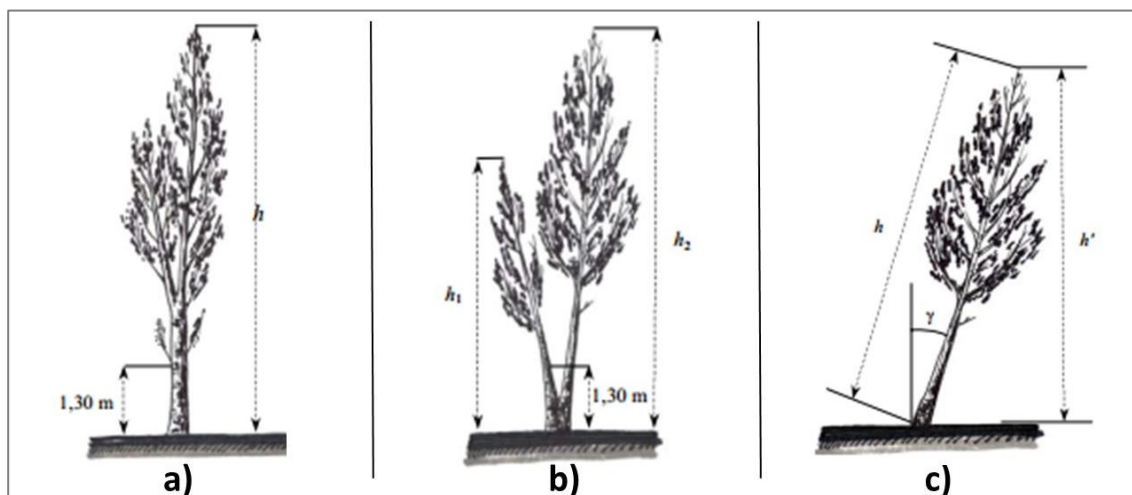
- Altura de un árbol bifurcado por encima de la altura normal
- Altura de un árbol bifurcado por debajo de la altura normal
- Altura de un árbol inclinado, para lo cual es necesario utilizar la ecuación 4.

$$h = \frac{h'}{\cos(\gamma)} \quad (4)$$

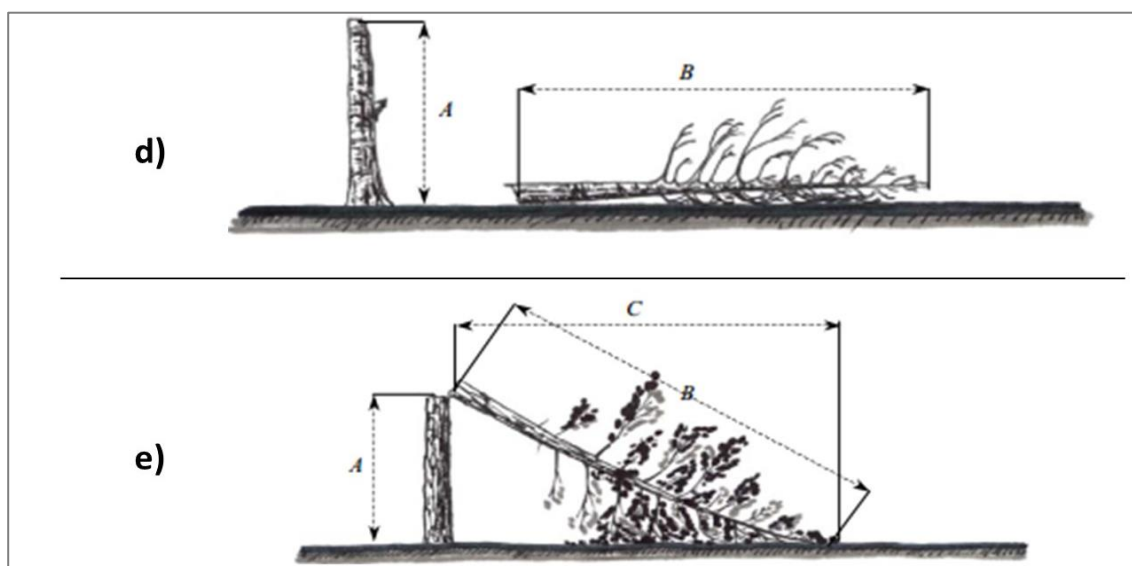
Fuente: (Diéguez et al., 2005)

En donde,

- $h$ : altura calculada
  - $h'$ : altura observada
  - $\gamma$ : ángulo de inclinación
- Altura de un árbol roto, con la parte caída apoyada sobre el suelo
  - Altura de un árbol roto, con la parte caída enganchada al tronco



**Figura 20.** Altura de árboles bifurcados e inclinados  
Fuente: (Diéguez et al., 2005)



**Figura 21.** Altura de árboles caídos  
Fuente: Fuente: (Diéguez et al., 2005)

### 2.3. Análisis estadístico

La estadística es una ciencia formal con base en modelos matemáticos, que engloba a un conjunto de procedimientos para recolectar, analizar e interpretar datos cualitativos o cuantitativos, además es una herramienta importante para la toma de decisiones y la explicación de la ocurrencia de fenómenos de estudio (Sulbarán, 2009). En cuanto al análisis se refiere al estudio profundo de

un objeto, sujeto o situación, para conocer sus elementos, principios, fundamentos, bases y causas originarias (López Noguero, 2002).

Es así que de acuerdo con Sulbarán (2009), el análisis estadístico se define como el procedimiento para almacenar, procesar e interpretar los datos relacionados con un proyecto de investigación, con base a tabulaciones, análisis y contraste de los datos, para obtener patrones de comportamientos y establecer predicciones. Los criterios a considerar para el análisis estadístico son el objetivo de la investigación, el nivel de medición de las variables y la estrategia de recolección de los datos. Dentro del análisis estadístico existen dos procedimientos de análisis que se basan en la estadística descriptiva y la estadística inferencial.

### **2.3.3. Conceptos básicos**

Para la comprensión del proceso de análisis estadístico, se requiere el reconocimiento de los términos característicos que lo definen. Por lo tanto, en lo sucesivo se presenta algunos conceptos básicos del lenguaje estadístico.

#### **a) Datos**

Es la información extraída de la realidad, representada en medidas o números recopilados de observaciones; para representar e interpretarlos es necesario recopilar, analizar y resumir. Se clasifican en datos cuantitativos (numéricos) o datos cualitativos (nombres o etiquetas que se asigna a un atributo) (Sulbarán, 2009).

#### **b) Población**

Conjunto de todos los elementos de análisis, se refiere a todas las observaciones que tienen ciertas características en común y ubicación espacio temporal. Dependiendo del conocimiento del tamaño de la población, ésta se puede clasificar en población finita (se conoce el tamaño de la muestra) o infinita (no se conoce el tamaño muestral) (Balseca et al., 2016).



### c) Muestra

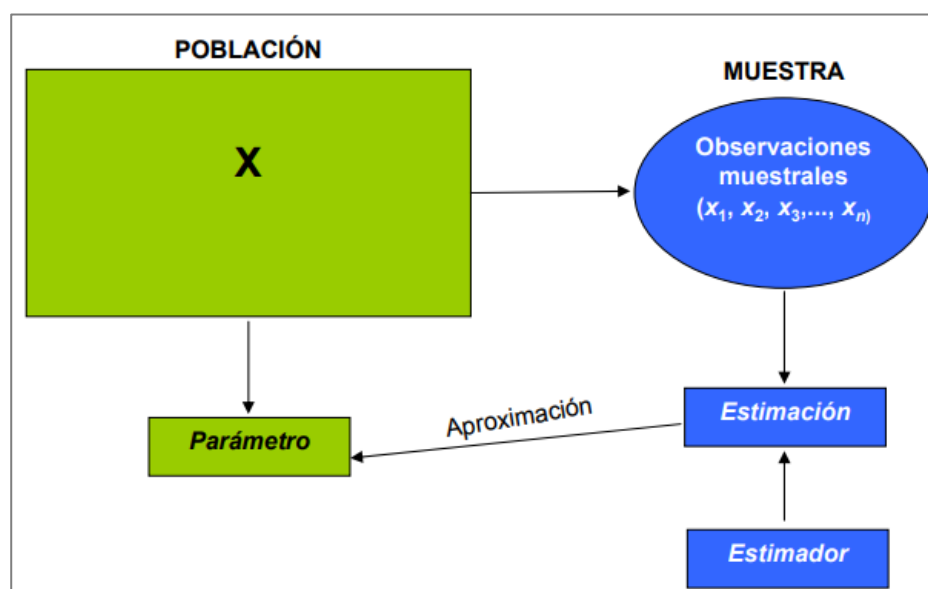
Es un subconjunto representativo que contiene las características principales de la población (Sulbarán, 2009). Las muestras se clasifican en probabilísticas, cuyos elementos tienen la misma posibilidad de ser elegidos y pueden ser seleccionados de forma aleatoria simple, por estratificación, por conglomeración entre otras técnicas; otra clasificación de las muestras son las no probabilísticas, las mismas que sus elementos son seleccionados de por juicio propio de acuerdo a las características de la investigación (Balseca et al., 2016).

### d) Parámetro

Es cualquier medida estadística de una variable en la población, se tiene como ejemplo la media poblacional (Cladera, 2012).

### e) Estimación

Es el valor estadístico que se obtiene de una muestra, utilizado como una aproximación de un parámetro (ver Figura 22.), como por ejemplo la media muestral (Cladera, 2012).



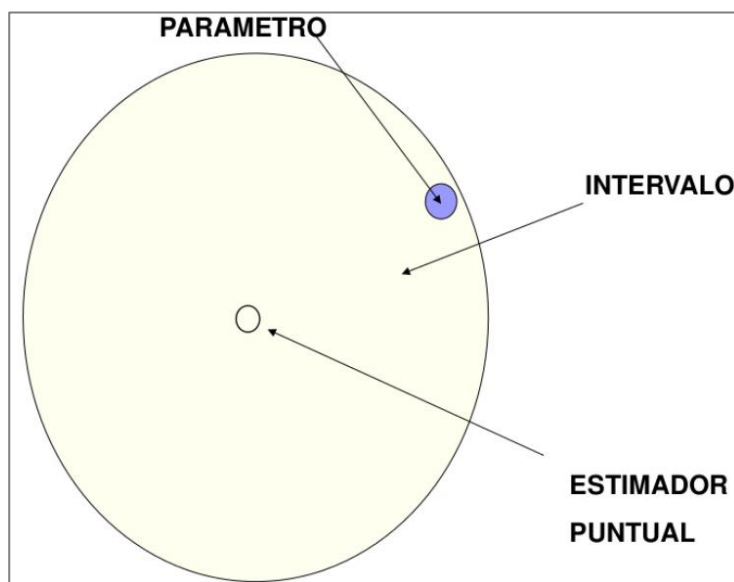
**Figura 22.** Estimación estadística  
Fuente: (Cladera, 2012)

**f) Variable**

Propiedad o característica poblacional o muestral apta de observaciones y mediciones. Se clasifican en cualitativas (atributos no numéricos que pueden ser nominales indicando cualidades u ordinales indicando categorías) y cuantitativas (variables que asumen valores numéricos que pueden ser discretas tomando valores de números enteros y continuas adquiriendo cualquier valor dentro de un intervalo de números) (Balseca et al., 2016).

**g) Estimación de parámetros**

Se refiere a las aproximaciones de los parámetros poblacionales que se realiza a partir de una muestra. La estimación puede ser puntual cuando se obtiene un único valor o por intervalos cuando se obtiene un rango de valores (ver Figura 23), para dicha estimación se tiene en cuenta el nivel de confianza como la probabilidad de que el valor verdadero del parámetro estimado se encuentre dentro del intervalo determinado, generalmente se utiliza un nivel de confianza de 90%, 95% y 99% (Cladera, 2012).



**Figura 23.** Estimación puntual e intervalos de confianza  
Fuente: (Escudero, 2016)

## **h) Contraste de hipótesis**

Consiste en utilizar la información de una muestra para comprobar una afirmación sobre una característica de una o varias poblaciones (Cladera, 2012).

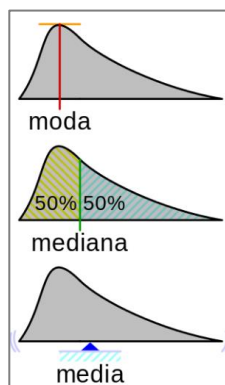
Una vez expuestos los principales términos dentro del lenguaje estadístico, para poder continuar con el desarrollo de un análisis estadístico se requiere de dos tipos de análisis basados en la estadística descriptiva y la estadística inferencial.

### **2.3.4. Estadística descriptiva**

La estadística descriptiva se refiere a la exploración y resumen de los datos de las variables de estudio, sin inferir sobre ellos porque son valores obtenidos de una muestra de la población, basados en parámetros estadísticos de centralización, dispersión, posición y forma (Posada Hernández, 2016).

#### **a) Parámetros de centralización**

Son aquellos parámetros que proporcionan información sobre la agrupación de los datos alrededor de la media, y son una representación global de la población (Barrios Calmaestra, 2005). Dentro de estos parámetros se encuentran las medidas de tendencia central (ver Figura 24) que son la media (cociente de la sumatoria de todas las observaciones entre el número total de las mismas), la mediana (valor asociado con el percentil 50, es decir corta por la mitad a la distribución) y la moda (valor más repetido de las observaciones); los cuales resumen en un solo número la información acerca del comportamiento de los datos de una distribución (Cladera, 2012).



**Figura 24.** Medidas de tendencia central  
Fuente: (Cmglee, 2016)

En la Tabla 2, se presentan las medidas la tendencia central y su correspondiente ecuación de cálculo.

**Tabla 2**  
*Medidas de tendencia central*

Medida	Ecuación	Observaciones
Media muestral	$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{i=n} x_i$	Considerar que: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\bar{x}</math> es la media muestral</li> <li>• n es el tamaño de la muestra</li> <li>• <math>x_i</math> son las observaciones o mediciones realizadas</li> </ul>
Mediana	<p>Si n es impar</p> $\text{Posición Me} = X_{\frac{n+1}{2}}$ <hr/> <p>Si n es par</p> $\text{Posición Me} = \frac{1}{2} * (X_{\frac{n}{2}} + X_{\frac{n}{2}+1})$	Considerar que: <ul style="list-style-type: none"> <li>• X es el conjunto de datos ordenados</li> <li>• El subíndice indica la posición de la mediana</li> </ul>
Moda	$Mo = x_i$ con más repeticiones	Considerar que: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>x_i</math> son las observaciones o mediciones realizadas</li> </ul>

Fuente: (Cladera, 2012)

## b) Parámetros de Dispersión

Son aquellos parámetros que describen la concentración y dispersión de los datos obtenidos de las variables de estudio respecto de los parámetros de centralización. Éstos parámetros determinan la variabilidad de los datos mediante las medidas de dispersión que son el rango o la amplitud (valor calculado a partir de la diferencia entre el mayor y menor valor del conjunto de datos), la

varianza (es el valor promedio del cuadrado de las diferencias de cada observación o medición respecto a la media muestral), la desviación estándar (es el valor de la raíz cuadrada de la varianza) y el coeficiente de variación (es una medida de relación entre la desviación estándar y la media muestral para determinar la homogeneidad de los datos) (Cladera, 2012) (Posada Hernández, 2016).

En la Tabla 3, se muestran las medidas de dispersión más representativas junto con su respectiva ecuación de cálculo.

**Tabla 3**  
*Medidas de dispersión*

Medida	Ecuación	Observaciones
Rango o amplitud	$R = x_{max} - x_{min}$	Considerar que: <ul style="list-style-type: none"> <li>• R es el rango</li> <li>• <math>x_{max}</math> es el valor máximo de las mediciones</li> <li>• <math>x_{min}</math> es el valor mínimo de las mediciones</li> </ul>
Varianza muestral	$s^2 = \frac{1}{(n-1)} * \sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2$	Considerar que: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>s^2</math> es la varianza muestral</li> <li>• <math>n</math> es el tamaño de la muestra</li> <li>• <math>x_i</math> son las mediciones realizadas</li> <li>• <math>\bar{x}</math> es la media muestral</li> </ul>
Desviación estándar	$s = \sqrt{s^2}$	Considerar que $s$ , es la medida de desviación estándar
Coeficiente de variación	$CV = \frac{s}{\bar{x}} * 100$	Considerar los siguientes criterios de calidad de las estimaciones: <ul style="list-style-type: none"> <li>• CV menor o igual al 7% las estimaciones son precisas</li> <li>• CV entre 8% y 14% la precisión es aceptable</li> <li>• CV entre 15% y 20% la precisión es regular</li> <li>• CV mayor al 20% las estimaciones son poco precisas</li> </ul>

Fuente: (DANE, 2008) (Posada Hernández, 2016)

### c) Parámetros de Posición

Se los conoce como cuantiles, éstas medidas permiten determinar la distribución de los datos y los dividen en intervalos iguales para su análisis. Los cuantiles más representativos son los cuartiles (fragmentan en cuatro partes la distribución de los datos), los deciles (fraccionan en diez partes la distribución de los datos) y los percentiles (dividen en cien partes la distribución de los datos) (Posada Hernández, 2016).

En la Tabla 4, se presentan las medidas de posición y su correspondiente ecuación. Además cabe señalar que para determinar dichas medidas primero se deben ordenar los datos de manera ascendente y que el subíndice indica la posición de los cuantiles.

**Tabla 4**  
*Medidas de posición*

Medida	Ecuación	Observaciones
Cuartiles	$Posición Q_i = \frac{i}{4} * n$	Considerar que: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>i</math> es el número del cuartil</li> <li>• <math>n</math> es el tamaño de la muestra</li> </ul>
Deciles	$Posición D_i = \frac{i}{10} * n$	
Percentiles	$Posición P_i = \frac{i}{4} * n$	

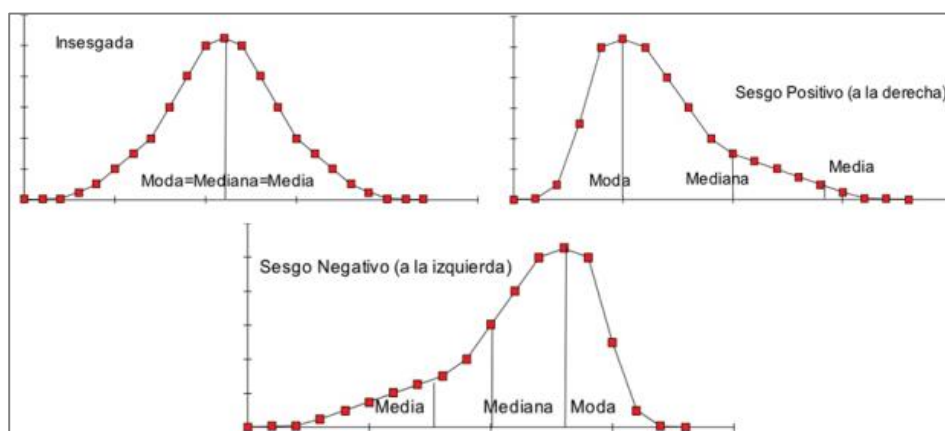
Fuente: (Posada Hernández, 2016)

### d) Parámetros de forma

Son aquellos parámetros usados para identificar medidas particulares de las variables que permiten conocer el grado de agrupamiento y concentración de la distribución de los datos.

A continuación se describen las medidas de forma de la distribución de los datos que son los valores de la asimetría y la curtosis, los cuales permiten determinar si el conjunto de datos siguen una distribución normal, para así poder emplear ciertos procedimientos de la estadística inferencial posteriormente.

- **Asimetría o sesgo:** se refiere al grado de agrupamiento de los datos de acuerdo a la frecuencia de los mismos (ver Figura 25), por lo tanto un valor positivo de éste coeficiente indica que existen muchos valores bajos en comparación con los altos, un valor negativo señala que existen más valores altos respecto a los bajos, y mientras el valor de asimetría se acerque a 0 indica que los datos se encuentran agrupados siguiendo una distribución normal (López Puga, 2013).



**Figura 25.** Asimetría o sesgo  
Fuente: (Posada Hernández, 2016)

Para calcular el valor de la medida del coeficiente de asimetría o sesgo se utiliza la ecuación 5.

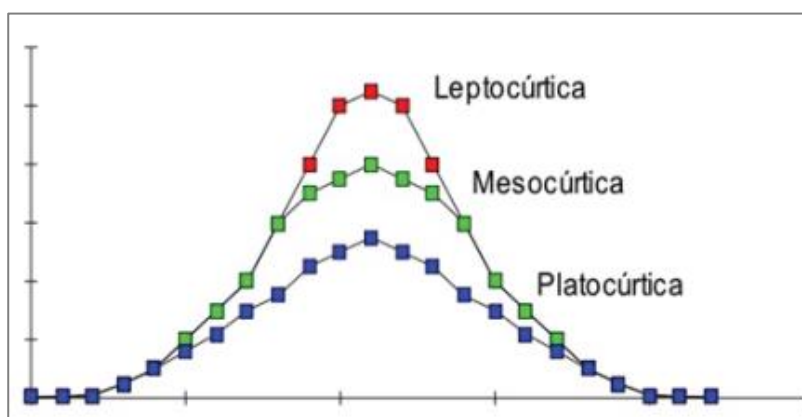
$$Ap = \frac{\bar{x} - Mo}{s} \quad (5)$$

Fuente: (Posada Hernández, 2016)

En donde,

- $Ap$ : coeficiente de asimetría
- $\bar{x}$ : media muestral
- $Mo$ : Moda
- $s$ : desviación estándar

- **Curtosis o apuntamiento:** éste coeficiente nos indica la concentración de los datos que se encuentran cercanos a la media, por lo tanto si el valor de la curtosis es positivo significa que la existe una gran concentración (distribución leptocúrtica), si el valor es negativo hay muy poca concentración (distribución platocúrtica) y mientras el valor se acerque a 0 significa que los datos se encuentran concentrados siguiendo una distribución normal (distribución mesocúrtica) como se puede verificar en la Figura 26 (Oliva Contero, 2010).



**Figura 26.** Curtosis o apuntamiento  
Fuente: (Posada Hernández, 2016)

Para calcular el valor de la medida del coeficiente de curtosis o apuntamiento se utiliza la ecuación 6.

$$Curtosis = \frac{1}{n*s^4} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 - 3 \quad (6)$$

Fuente: (Posada Hernández, 2016)

En donde,

- n: tamaño de la muestra
- s: desviación estándar
- $x_i$ : mediciones realizadas
- $\bar{x}$ : media muestra

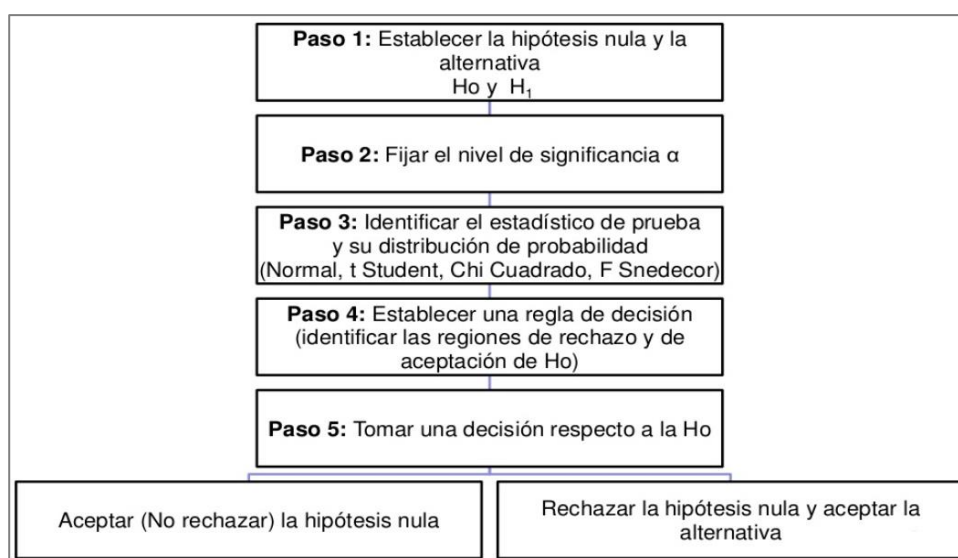


### 2.3.5. Estadística inferencial

La estadística inferencial permite realizar predicciones sobre las características de un objeto, sujeto o fenómeno de estudios derivados de la muestra, con base en la información parcial de los mismos, es decir que este tipo de análisis establece generalidades para la población mediante la investigación de una muestra determinada; para aplicar el análisis estadístico inferencial se realiza pruebas de hipótesis. Dentro del análisis inferencial se incluye la determinación del coeficiente de correlación lineal de Pearson para comparar las variables de interés (Posada Hernández, 2016).

#### Prueba de hipótesis

Una hipótesis se define como una afirmación de la realidad de una o varias poblaciones, para poder verificar si la afirmación es verdadera o false se realizan pruebas basadas en datos muestrales y en la teoría de la probabilidad. El objetivo de la prueba de hipótesis es plantear un juicio con respecto a la diferencia entre el estadístico de una muestra y un valor planteado de un parámetro (Ramos Galván, 2012). Los pasos para realizar una prueba de hipótesis de acuerdo con Ramos Galván (2012), son los siguientes (ver Figura 27):



**Figura 27.** Procedimiento prueba de hipótesis

Fuente: (Escudero, 2016)

**Paso 1.** Establecer la hipótesis nula ( $H_0$ ) y la hipótesis alternativa ( $H_1$ ).

La hipótesis nula corresponde a una afirmación que solo se rechaza si los datos muestrales indican que es falsa, por lo tanto el planteamiento de la hipótesis nula siempre contiene el signo de igualdad en relación al valor del parámetro determinado.

La hipótesis alternativa es la hipótesis de investigación, considerada como una afirmación que se acepta si los datos muestrales señalan la falsedad de la hipótesis nula, es así que el planteamiento de la hipótesis alternativa contiene el signo contrario al establecido en la hipótesis nula.

**Paso 2.** Elegir el nivel del significancia ( $\alpha$ ).

El nivel de significancia se define como la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera, conocido también como un error de tipo I ( $\alpha$ ). El error de tipo II ( $\beta$ ), se refiere a la probabilidad de aceptar la hipótesis nula cuando es falsa, en la Figura 28 se puede verificar los tipos de errores al tomar la decisión de aceptar o rechazar la hipótesis nula o alternativa.

Decisión \ Realidad	No Rechazar $H_0$ (Aceptar $H_0$ )	Rechazar $H_0$ (Aceptar $H_1$ )
$H_0$ cierta	Correcto	<b>Error de tipo I</b> Probabilidad $\alpha$ $\alpha = P(\text{Error tipo I})$ $= P(\text{Rechazar } H_0 / H_0 \text{ cierta})$
$H_0$ falsa	<b>Error de tipo II</b> Probabilidad $\beta$ $\beta = P(\text{Error tipo II})$ $= P(\text{Aceptar } H_0 / H_0 \text{ falsa})$	Correcto Probabilidad $1 - \beta \rightarrow$ potencia del contraste $= P(\text{Rechazar } H_0 / H_0 \text{ falsa})$

**Figura 28.** Tipos de errores al aceptar o rechazar hipótesis nula o alternativa  
Fuente: (Escudero, 2016)

Los valores de nivel de significancia generalmente usados son:

- $\alpha = 1\% = 0.01$ , valor recomendado para investigaciones de consumo.
- $\alpha = 5\% = 0.05$ , valor recomendado para proyectos de investigación.

- $\alpha = 10\% = 0.1$ , valor recomendado para proyectos que requieran encuestas.

### Paso 3. Calcular el valor estadístico

El valor estadístico es calculado a partir de los datos muestrales, que se emplea para tomar la decisión de aceptar o rechazar la hipótesis nula o alternativa, existen diferentes estadísticos de prueba, cuya elección depende del tamaño y la distribución de los datos de la muestra. Las pruebas de hipótesis más comunes y sus respectivos estadísticos de prueba se presentan la Tabla 5.

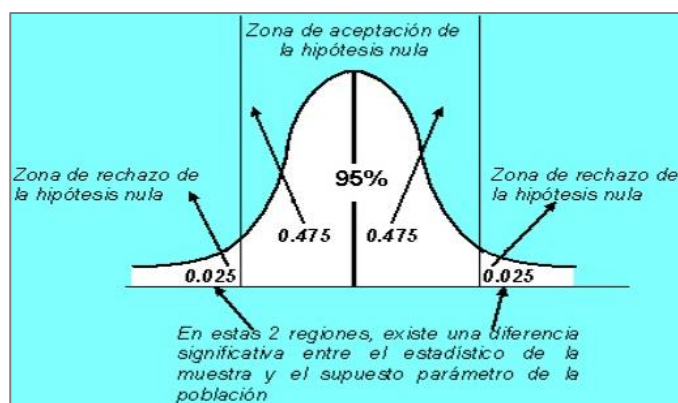
**Tabla 5**  
*Estadísticos de pruebas de hipótesis*

Prueba de hipótesis	Estadístico de prueba	Ecuación	Observaciones
Prueba Z	Estadístico Z para una población	$Z = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$	Considerar que: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\bar{x}</math> es la media muestra</li> <li>• <math>\mu_0</math> es la media poblacional</li> <li>• <math>s</math> es la desviación estándar muestral</li> <li>• <math>n</math> es el tamaño de la muestra</li> </ul>
	Estadístico Z para dos poblaciones	$Z = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$	
Prueba t	Estadístico t para una población	$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$	
	Estadístico t para dos poblaciones	$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\sqrt{S_p^2 \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$ <p>Donde,</p> $S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{(n_1 - 1) + (n_2 - 1)}$	
ANOVA	Estadístico F	$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$	
Pruebas de chi-cuadrada	Estadístico de chi-cuadrado	$\chi^2 = \sum \frac{(f_o - f_e)^2}{f_e}$	Considerar que: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>f_o</math> es la frecuencia observada</li> <li>• <math>f_e</math> es la frecuencia esperada</li> </ul>

Fuente: (Escudero, 2016)

#### Paso 4. Plantear una regla de decisión

Se requiere establecer condiciones específicas para rechazar o no la hipótesis nula, en tal motivo es necesario conocer el valor crítico, que es el punto de división entre la zona de rechazo de la hipótesis nula y la zona en la que no se la rechaza (ver Figura 29).



**Figura 29.** Zona de aceptación y rechazo de la hipótesis nula  
Fuente: (Olivero, 2016)

#### Paso 5. Tomar la decisión

En este paso se toma la decisión si aceptar o rechazar la hipótesis nula o alternativa con base a la comparación del valor estadístico y el valor crítico. Hay que tener en cuenta la posibilidad de cometer los tipos de errores expuestos en la Figura 28.

#### Coefficiente de correlación lineal de Pearson

Es un índice que mide el grado de correlación entre variables cuantitativas relacionadas linealmente. Es un índice cuyos valores absolutos oscilan entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 mayor ser la correlación, y menor cuanto más cerca de cero. El coeficiente se lo obtiene mediante la aplicación de un modelo de regresión lineal simple, utilizando las variables a comparar (Pita Fernández y Pértega Díaz, 2001), como se muestra en la ecuación 7.

$$y = a + bx \quad (7)$$

Fuente: (Pita Fernández y Pértega Díaz, 2001)

En donde,

- y: variable independiente
- x: variable dependiente
- a y b: parámetros del modelo lineal

Los valores de coeficiente de correlación lineal de Pearson ( $R^2$ ) aceptables son mayores que 0,7 o menores que -0,7 (Pita Fernández y Pértega Díaz, 2001).

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

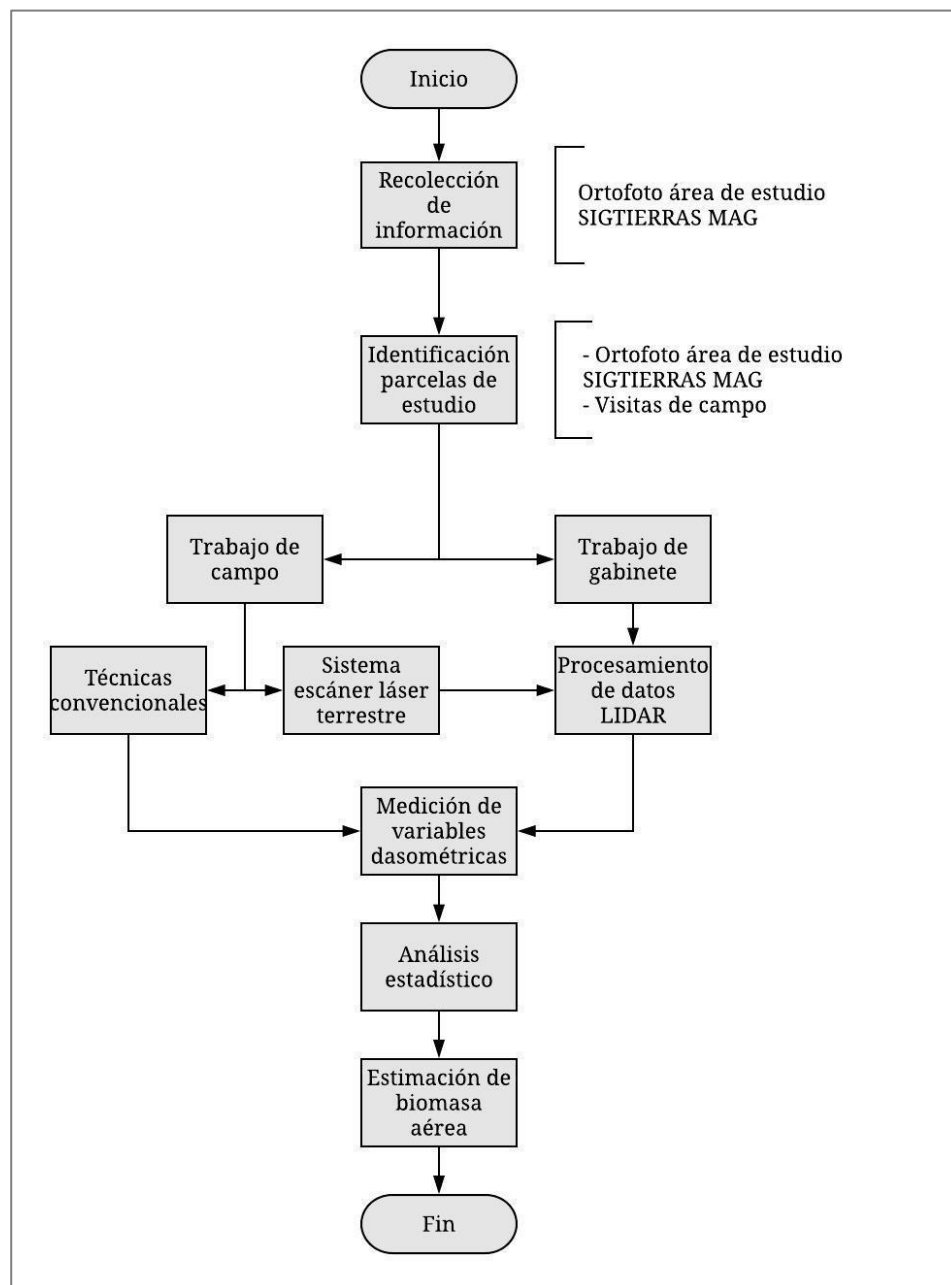
El presente capítulo explica la metodología utilizada para el cumplimiento de los objetivos propuestos del proyecto, se fundamenta en dos ejes principales que son el trabajo de campo basado en la aplicación de la tecnología escáner láser terrestre y la técnica convencional de campo a través del uso de la cinta métrica, para realizar el levantamiento de la información dasométrica en las parcelas de estudio previamente establecidas, además dentro de esta fase se incluyó el proceso de toma de puntos de control para la georreferenciación del trabajo; y el trabajo de gabinete, el cual abarca el procesamiento de los datos LIDAR capturados en campo y la medición digital del DAP de los árboles, utilizando software comercial mediante el manejo de los programas Scene y Trimble Real Works proporcionados por el IEE, dentro de esta fase también se realizó el análisis estadístico de los datos en el software libre Rstudio y la estimación de biomasa aérea aplicando los modelos alométricos que consideran los valores del DAP y la densidad de los árboles.

Para el desarrollo del presente proyecto se consideraron los insumos detallados en la Tabla 6, donde se describe cada uno de los recursos así como también los organismos que facilitaron su adquisición.

**Tabla 6***Insumos del proyecto*

	<b>Descripción</b>	<b>Proporcionado por</b>
<b>Hardware</b>	Escáner Láser Faro Focus 3D	Instituto Espacial Ecuatoriano
	Estación total Trimble 3600	
	Equipo GPS de precisión Trimble R4	Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE
	Cinta métrica	Autora
<b>Software</b>	Scene	Licencia autorizada por el Instituto Espacial Ecuatoriano
	Trimble Real Works	
	Trimble Business Center	
	R-studio	Software libre
<b>Otros</b>	Ortofoto área de influencia del proyecto	Proyecto SIGTIERRAS – Ministerio de Agricultura y Ganadería

Para realizar el análisis dasométrico aplicando tecnología escáner láser terrestre y la técnica convencional de campo para la estimación de biomasa aérea en el bosque “La Armenia”, se aplicó una metodología experimental basada en trabajo de campo y gabinete, teniendo en cuenta la información existente de la zona de estudio (ver Figura 30).



**Figura 30.** Metodología propuesta para el estudio

Fuente: Modificado de Uzquiano (2017), Grijpma (2008), Basantes, et al. (2018), Diéguez, et al. (2003)

A continuación se describen los componentes de la metodología propuesta.

### 3.1. Definición de parcelas de estudio

El área de influencia definida en el bosque de la Armenia (ver Figura 1), se determinó con base a la ortofoto, con fecha 2013 y resolución de 1.5 metros, que se obtuvo del proyecto SIGTIERRAS



del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), de la cual se consiguió la información necesaria para identificar las parcelas de estudio en función de la densidad de vegetación y la aplicabilidad de las técnicas propuestas para el cumplimiento de los objetivos definidos en el estudio.

De acuerdo con la FAO (2010), una de las condiciones básicas para que un área sea considerada como bosque es tener una extensión mínima de 0.5 Ha., razón por la cual se decidió tomar dicho valor como el área de aplicación del proyecto (ver Figura 31). Esta área fue dividida en dos parcelas contiguas (A y B) con el propósito de optimizar la captura de la información mediante la tecnología LIDAR terrestre, así como también facilitar el manejo y procesamiento de los datos obtenidos.



*Figura 31.* Área de aplicación del proyecto

### **3.2. Trabajo de campo**

Para la medición de una de las variables dasométricas (diámetro normal de los árboles), cuyos valores fueron necesarios para la estimación de la biomasa aérea del área de aplicación del proyecto, se emplearon dos técnicas de levantamiento de información: el sistema escáner láser terrestre y la técnica convencional de campo mediante el uso de la cinta métrica.

#### **3.2.1. Sistema escáner láser terrestre - Captura de datos LIDAR terrestre**

El sistema escáner láser terrestre permitió obtener datos LIDAR de las dos parcelas de estudio identificadas en el bosque La Armenia, los cuales fueron capturados mediante el escáner terrestre Faro Focus 3D. Para el funcionamiento del equipo, se requirió de un trípode de aluminio, una base nivelante y una base metálica para el soporte el equipo (peso 5 Kg), debido a que durante el proceso de escaneo se ejecutó un movimiento rotatorio y por lo tanto se necesitaba estabilidad para el equipo. Además, para la unión de las escenas que fueron el resultado de cada escaneo, se necesitó utilizar referencias artificiales (esferas blancas de 139 mm y 200 mm de diámetro), las cuales se colocaron en lugares que permitieron la visibilidad de al menos dos de ellas por el equipo en cada toma de escaneo (Basantes , et al., 2018). El procedimiento que se realizó para la captura de los datos LIDAR con el escáner terrestre Faro Focus 3D fue el siguiente:

- Se planificó el número de escaneos en cada una de las parcelas, tomando en cuenta la densidad de información del área a escanear y en función de la visibilidad entre el equipo y las esferas de referencia (ver Figura 32) en dos sentidos, es decir hacia adelante y hacia atrás, con lo cual se garantizó el procesamiento y unión de las escenas para lograr la obtención de un escenario completo de cada una de las parcelas de estudio (Guerrero y

Velastegui, 2013). En tal motivo, se tuvo que en las parcelas A y B se planificaron 11 y 14 escaneos respectivamente.



*Figura 32.* Esferas de referencia

- Se niveló utilizando un trípode de aluminio con la base nivelante (ver Figura 33).



*Figura 33.* Nivelación del trípode

- Se colocó la base metálica para la rotación del escáner terrestre (ver Figura 34).



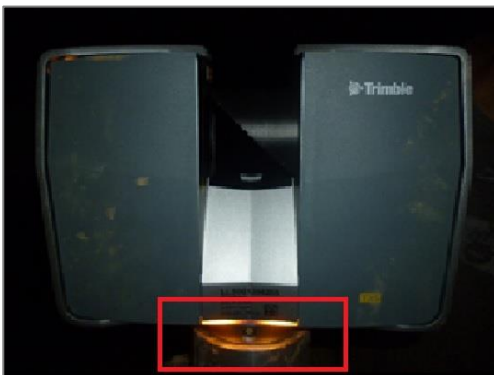
*Figura 34.* Base metálica

- Se encendió el equipo y se retiró el protector del sensor (ver Figura 35).



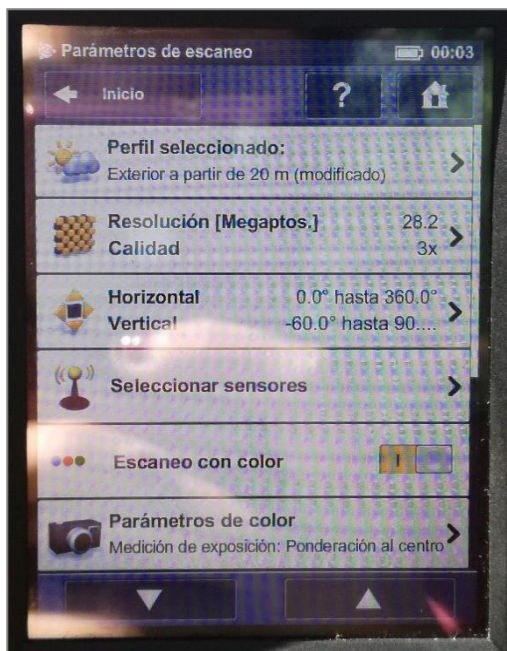
*Figura 35.* Protector del sensor

- Se verificó que las luces led ubicadas en la parte inferior del equipo estén encendidas, lo cual indicó la correcta posición del equipo y que se encontraba listo para la captura de los datos (ver Figura 36).



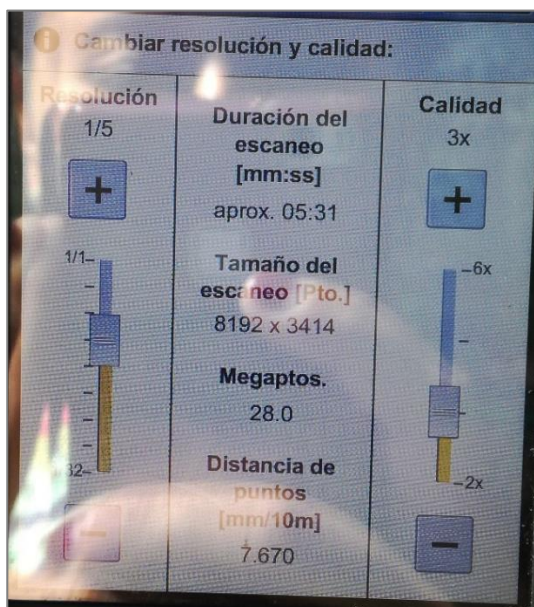
**Figura 36.** Luces led del equipo

- Se visualizó el menú principal, en el cual se seleccionó la opción de parámetros de escaneo (ver Figura 37).



**Figura 37.** Menú principal del equipo

- Los parámetros de configuración del equipo para iniciar cada escaneo fueron los siguientes (ver Figura 38):



**Figura 38.** Parámetros de escaneo

- Resolución de 1/5, este valor se expresó como una fracción de la máxima posible, es decir el escáner tiene la capacidad de medir alrededor de sí mismo a lo largo de un número máximo de direcciones determinadas por los ángulos de rotación del espejo y del cabezal completo, la resolución angular del equipo es de  $0.009^\circ$  (Contreras Echebarría, 2014) (Uzquiano Pérez, 2017).
- Calidad de 3X, este valor representó la duración de cada medida individual, por lo tanto la velocidad y la precisión de medición dependerá del equipo utilizado (Uzquiano Pérez, 2017).
- El tiempo de escaneo en función de la resolución y la calidad fue de aproximadamente 5 minutos con 31 segundos, obteniendo así un aproximado de 28 millones de puntos por toma y una resolución espacial de 7,67 mm.

- Se inició el escaneado y la evacuación de la zona para evitar que el equipo capture información innecesaria.

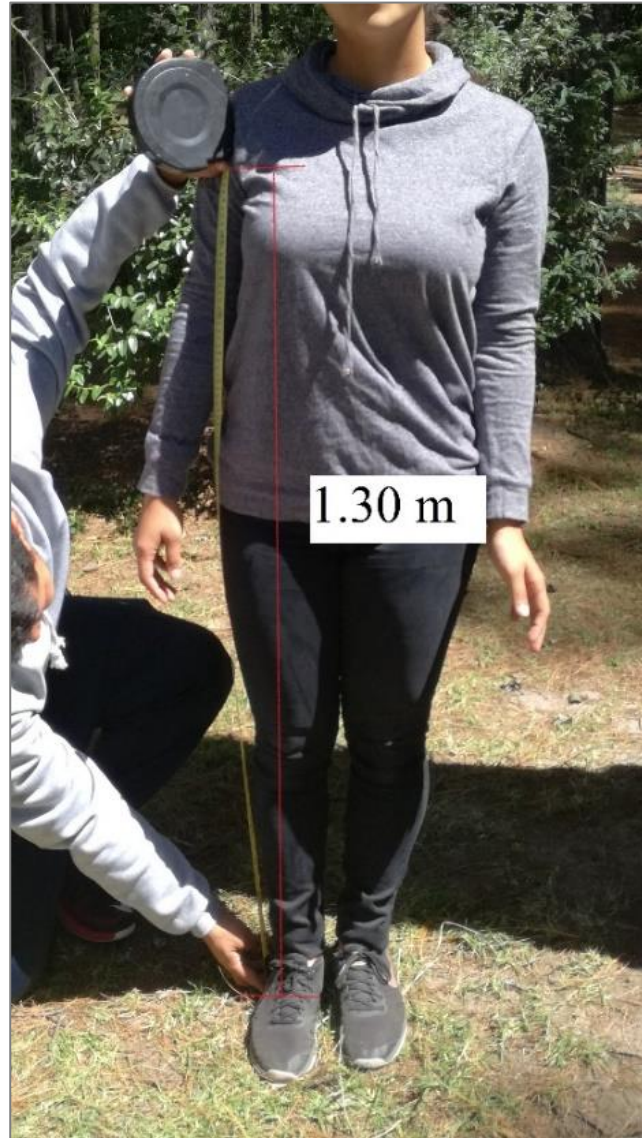
**Nota:** El tiempo aproximado en el que se llevó a cabo este proceso fue de 2 horas por cada parcela.

### **3.2.2. Medición convencional del diámetro normal de los árboles**

La técnica convencional de campo para medir el diámetro normal de los árboles en las parcelas de estudio se basó en el uso de la cinta métrica, como se menciona en el apartado 2.2.2. del presente documento.

La variable dasométrica medida fue:

- El diámetro normal (cm): este parámetro se midió a la altura de 1.3 m de cada uno de los árboles dentro de las parcelas de estudio (ver Figura 39), con la ayuda de una cinta métrica, para lo cual se posicionó a favor de la pendiente donde se encontraba cada árbol, siguiendo la técnica mencionada en el literal 2.2.3. del presente escrito (ver Figura 40) (Diéguez, et al., 2003).



*Figura 39.* Altura del pecho





*Figura 40.* Medición con la cinta métrica

### 3.2.3. Georreferenciación

En este proceso, se obtuvieron las coordenadas de cuatro puntos de control distribuidos en el área de aplicación del proyecto. Se utilizó la tecnología GPS, a través del receptor y la antena Trimble R4 para tomar un punto base, el método establecido fue el estático rápido con un tiempo de toma de 2 horas con 48 segundos y un intervalo de tiempo de 5 segundos, para el procesamiento de éste punto se utilizó el software Trimble Business Center y se realizó el posicionamiento relativo con la base EPEC, perteneciente a la red del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS), ubicada a una distancia de aproximadamente 9 Km del área de estudio, en la provincia de Pichincha, ciudad de Sangolquí, cuyas coordenadas geodésicas oficiales calculadas hasta el 15 de abril del 2016 son  $00^{\circ}18'53.61237''$  S y  $78^{\circ}26'46.76473''$  W.

Debido a que en la zona de aplicación del proyecto existen árboles de alturas superiores a los 30m, la señal GPS se vio interferida por lo que se recurrió a realizar el levantamiento de los tres

puntos de control restantes, mediante el uso de la estación total Trimble 3600, teniendo como base el punto GPS tomado con anterioridad (ver anexo 3), el cual se ubicó en una zona despejada dentro del área de interés para evitar interferencias en la señal GPS.

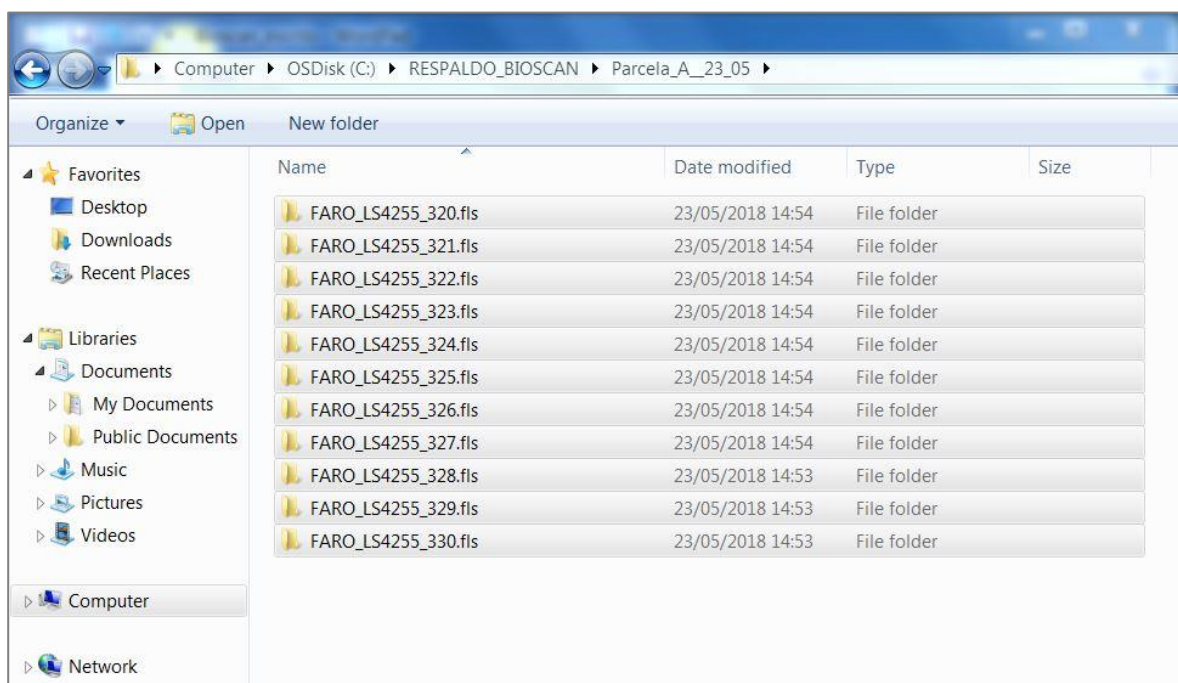
### **3.3. Trabajo de gabinete**

#### **3.3.1. Procesamiento de datos LIDAR**

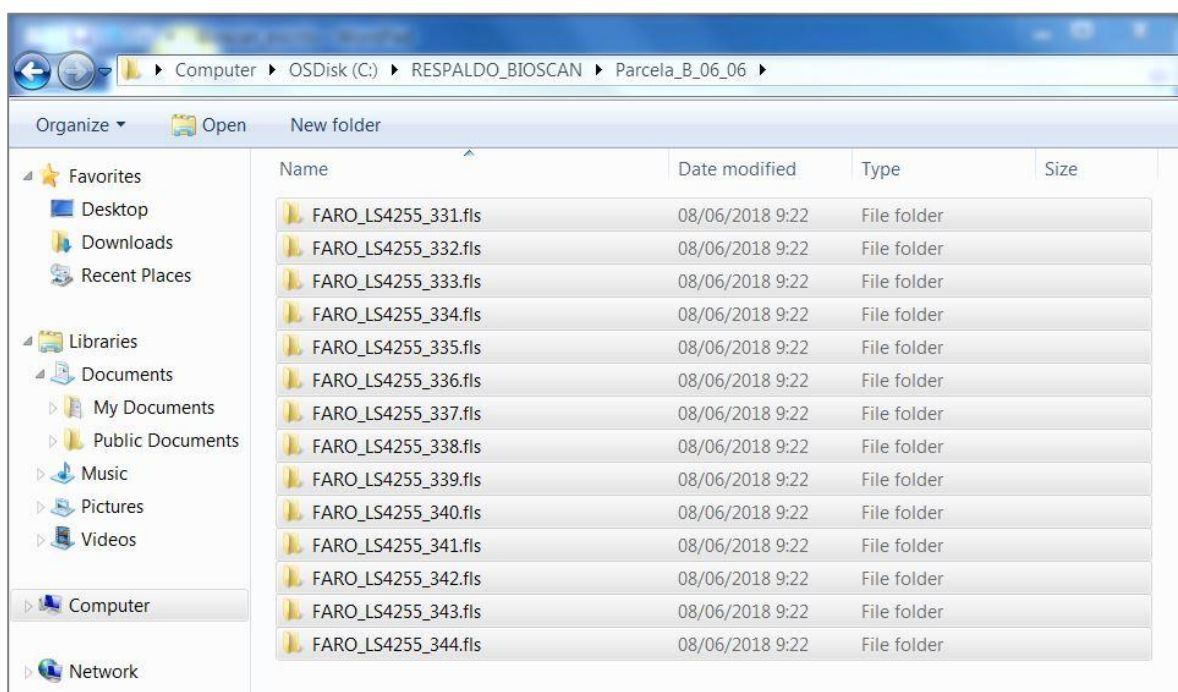
Para el procesamiento de los datos LIDAR capturados con el escáner terrestre Faro Focus 3D, se utilizó el software comercial Scene (propio del equipo Faro Focus 3D), con el cual se generó el modelo tridimensional a partir de la nube de puntos obtenida de cada una de las parcelas de estudio escaneadas. En este proceso se realizó la descarga de los escaneos y la verificación de los mismos, el procesamiento y unión de las escenas, así como también la creación, homogeneización, depuración y exportación de la nube de puntos (Basantes , et al., 2018).

Para garantizar una mejor interoperabilidad, se exportó la nube de puntos a formatos 3D (.xyz ascii), debido a que éste formato es uno de los diversos formatos compatibles con el software Trimble Real Works, el mismo que fue necesario para continuar con la metodología propuesta (Basantes , et al., 2018). El procedimiento para el procesamiento en el software Scene de los datos LIDAR capturados fue el siguiente:

- Se descargaron los escaneos de la tarjeta SD del escáner a la computadora de procesamiento; el formato de los archivos descargados fue .fls (formato nativo del escáner), en las Figuras 41 y 42 se presentan los escaneos descargados de las parcelas de estudio.

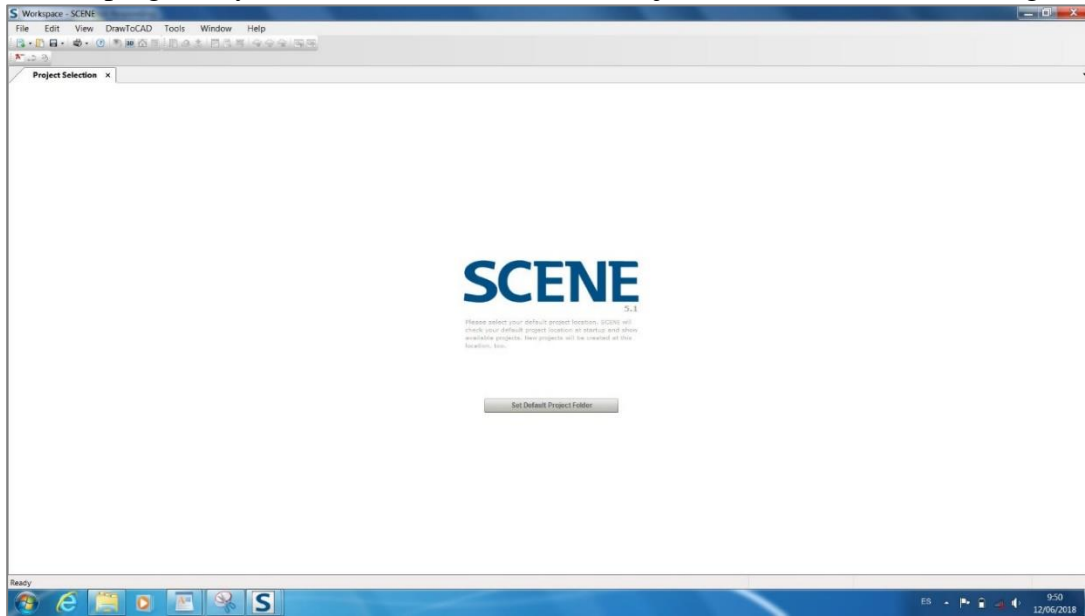


**Figura 41.** Archivos de escaneo – parcela A



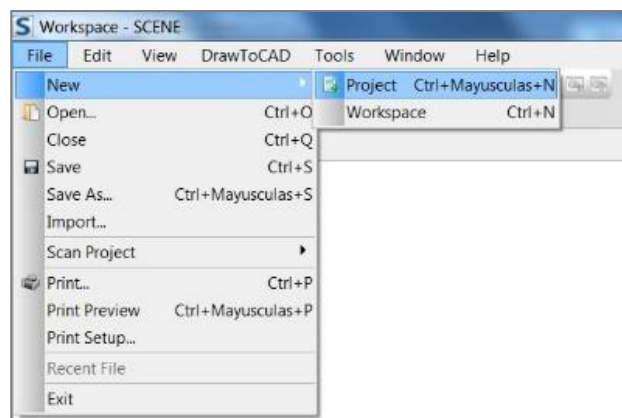
**Figura 42.** Archivos de escaneo – parcela B

- Se abrió el programa y se visualizó el entorno de trabajo del software Scene (ver Figura 43).

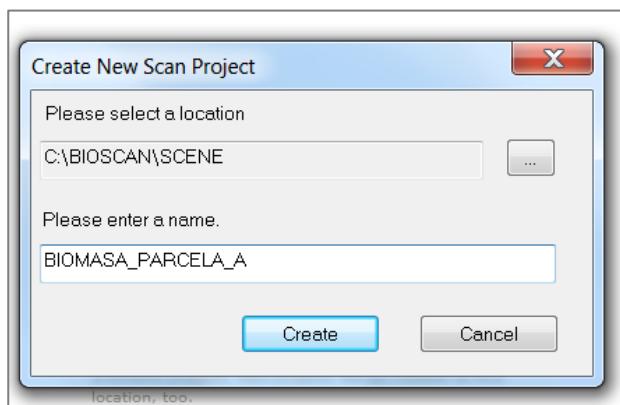


**Figura 43.** Entorno de trabajo software Scene

- Se creó un nuevo proyecto de escaneo: Archivo/nuevo/proyecto (ver Figura 44), en el cual se seleccionó la ubicación de la carpeta donde se guardó el procesamiento, así como también se designó el nombre al nuevo proyecto (ver Figura 45).

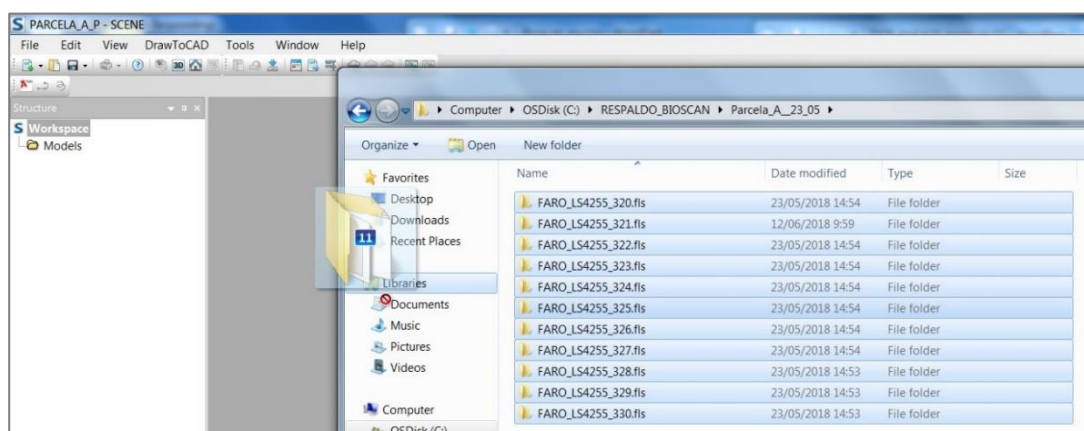


**Figura 44.** Nuevo proyecto de procesamiento



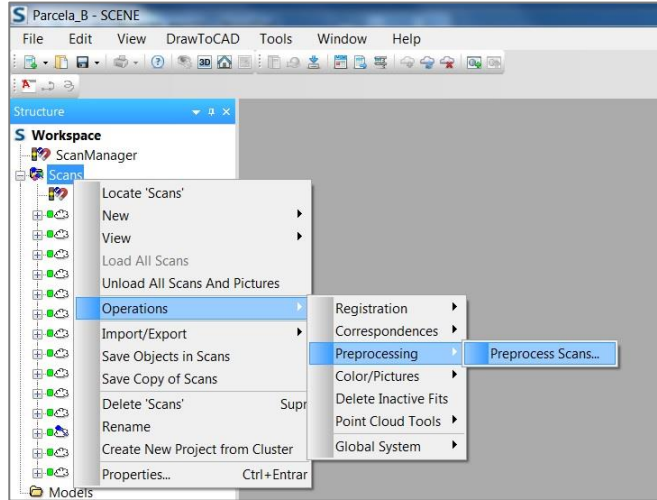
**Figura 45.** Asignación nombre al nuevo proyecto de procesamiento

- En el explorador de archivos se seleccionó los escaneos a procesar y se los arrastró para cargarlos en el entorno de trabajo (ver Figura 46).

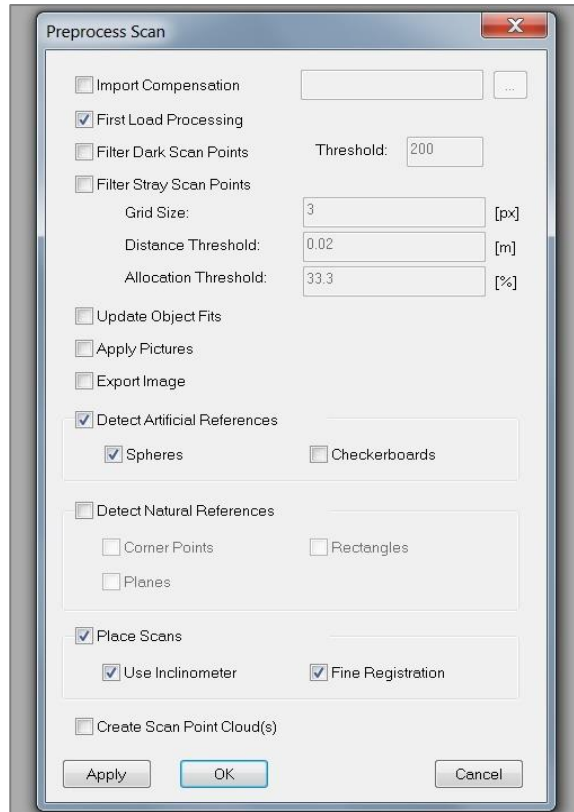


**Figura 46.** Carga de archivos de escaneo

- Se unieron los escaneos de forma automática y manual, para la unión de la parcela A se ejecutó el procesamiento automático y en la parcela B se realizó el procesamiento manual para la unión de las escenas.
  - a) Proceso de unión de escaneos automáticamente: Scans/operaciones/pre-procesando/procesar escaneos previos (ver Figura 47). En dicho proceso se configuraron los siguientes parámetros de pre procesamiento (ver Figura 48).



**Figura 47.** Pre procesamiento de escaneos



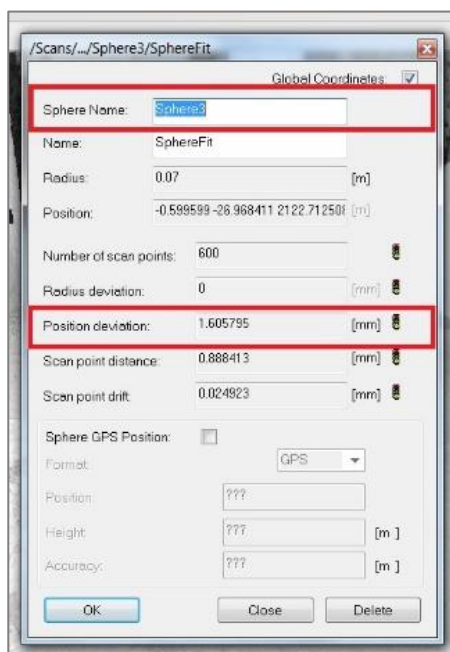
**Figura 48.** Parámetros de pre procesamiento

- b) Proceso de unión de escaneos manualmente: éste proceso se lo realizó debido a que el software no reconoció las esferas de referencia colocadas en campo en la parcela B, por lo tanto se procedió a agregar esferas (ver Figura 49), al momento de pinchar las nuevas

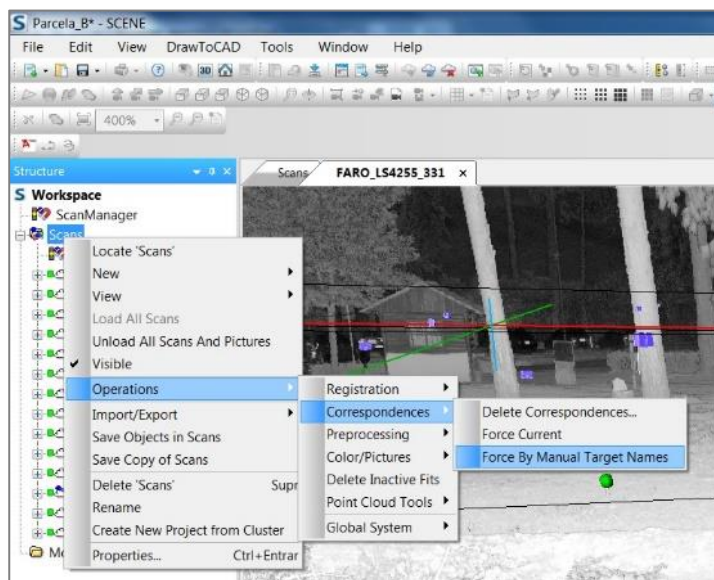
esferas se tuvo en cuenta que la desviación de la posición sea menos que 2 mm y se verificó que el nombre de cada nueva esfera se repita únicamente en su correspondiente esfera de referencia (ver Figura 50), es decir sólo existieron dos esferas con el mismo nombre, cada una en una escena diferente. Luego se seleccionó la opción de forzar unión manual por los nombres de las esferas: Scans/operaciones/correspondencias/forzar manualmente por nombre de etiquetas (ver Figura 51).



**Figura 49.** Herramienta de añadir nuevas esferas de referencia



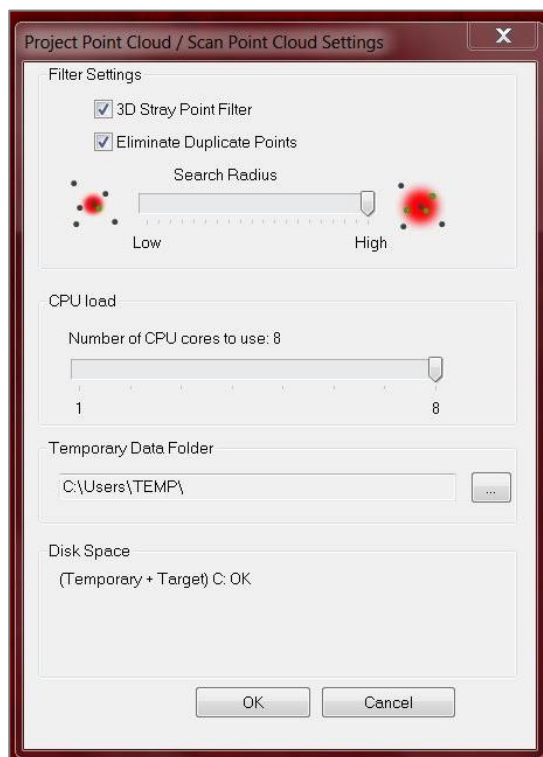
**Figura 50.** Desviación de la posición de las esferas de referencia



**Figura 51.** Unión manual de escaneos

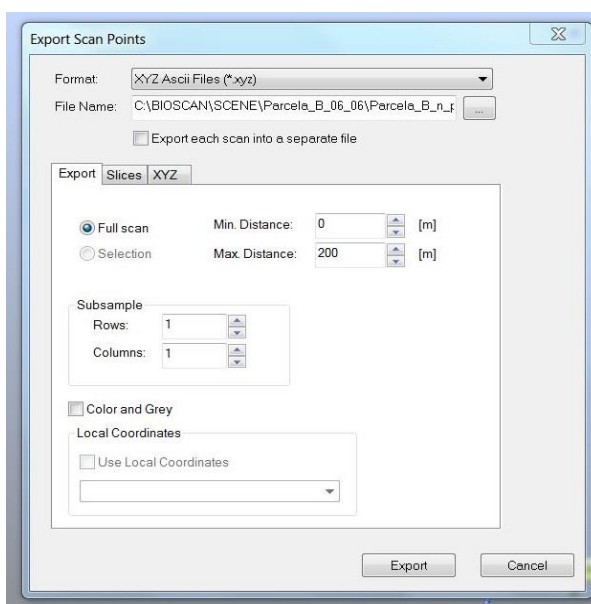
- Una vez unidos los escaneos procesados, se creó la nube de puntos. En este proceso se aplicaron el filtro 3D para puntos dispersos y el filtro de eliminación de puntos repetidos para optimizar la exportación de la nube luego de su creación (ver Figura 52).



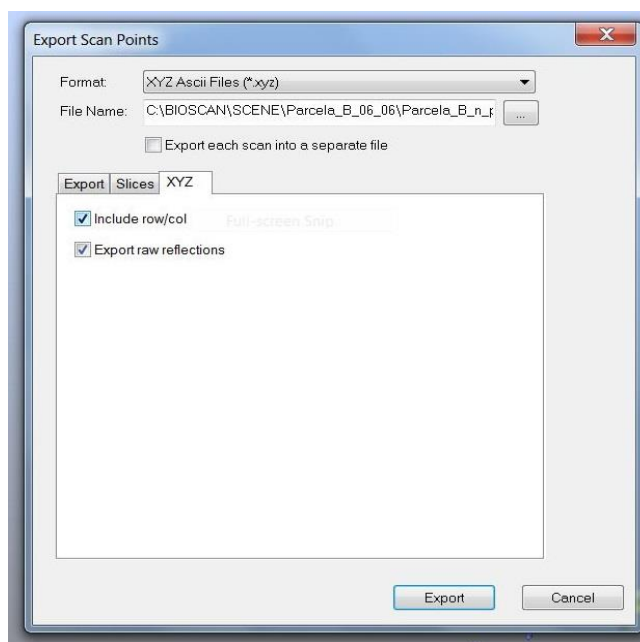


**Figura 52.** Parámetros de creación de la nube de puntos

- Se exportaron los puntos de escaneo que conforman la nube de puntos del proyecto del programa; en este proceso se seleccionó el formato de exportación (.xyz), se designó el nombre para la nube de puntos y se configuraron los siguientes parámetros de exportación (ver Figuras 53 y 54).



**Figura 53.** Parámetros de exportación de la nube de puntos – pestaña “Export”



**Figura 54.** Parámetros de exportación de la nube de puntos – pestaña “XYZ”

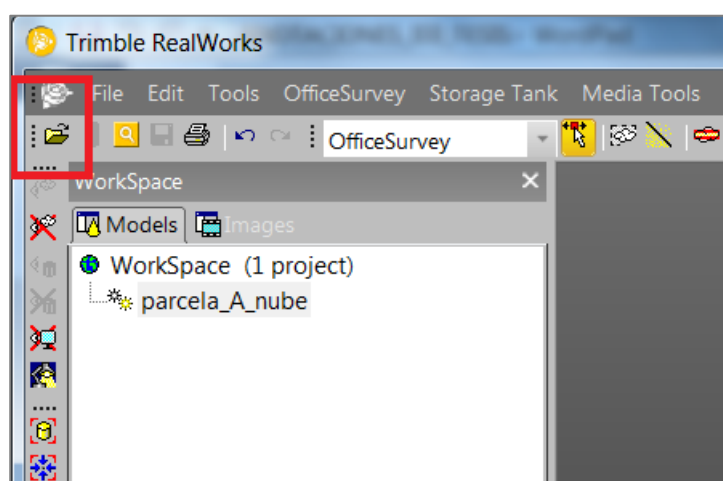
De esta manera el programa permitió la importación de los escaneos para el pre procesamiento de los mismos, la unión automática y manual de todas las escenas, la creación y exportación de la nube de puntos de cada parcela de estudio para la generación de los modelos tridimensionales y así

poder realizar la medición digital del diámetro normal de los árboles ubicados en la zona de aplicación del proyecto.

### 3.3.2. Medición digital del diámetro normal de los árboles

En este proceso se aplicaron diversas herramientas para el manejo de datos 3D que permitieron la edición de los modelos tridimensionales obtenidos de las parcelas de estudio, y así medir digitalmente el diámetro normal de los árboles de interés ubicados dentro de ellas, para lo cual se utilizó el software comercial Trimble Real Works, el procedimiento ejecutado fue el siguiente:

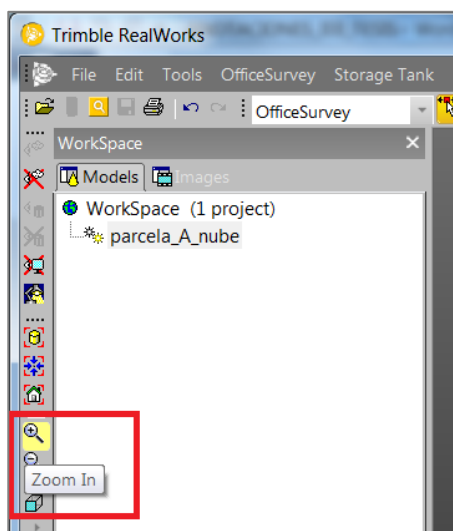
- En un nuevo proyecto, se importó la nube de puntos a través del ícono “abrir” señalado en la Figura 55, en el cual se seleccionó el modelo tridimensional a ser editado.



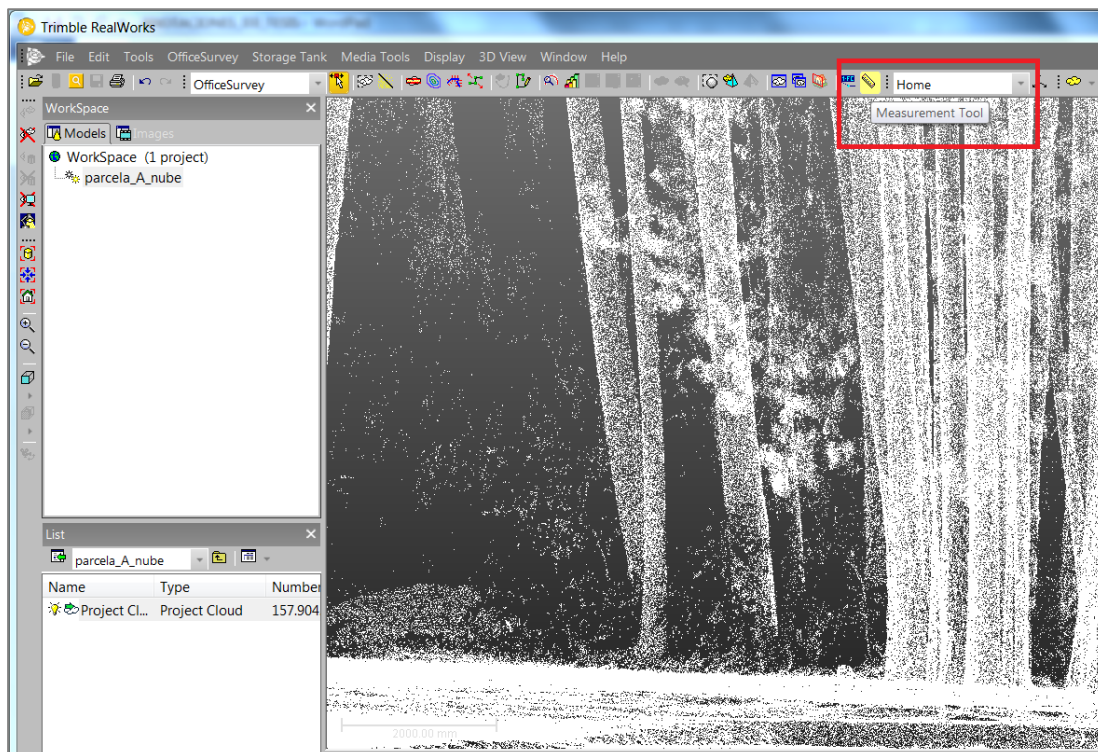
**Figura 55.** Importación de la nube de puntos – software Trimble Real Works

- Se procedió a realizar un corte transversal de la nube de puntos a una altura de 1.30m (altura correspondiente al diámetro normal de un árbol). Mediante el uso de la herramienta zoom (localizada en la parte lateral izquierda de la pantalla de procesamiento del programa como se puede verificar en la Figura 56), se efectuó un acercamiento a dos árboles ubicados en los extremos laterales del modelo tridimensional para realizar la medición de la altura 1.30 m a través del uso la herramienta de mediciones (ver Figura 57) seleccionando la opción de

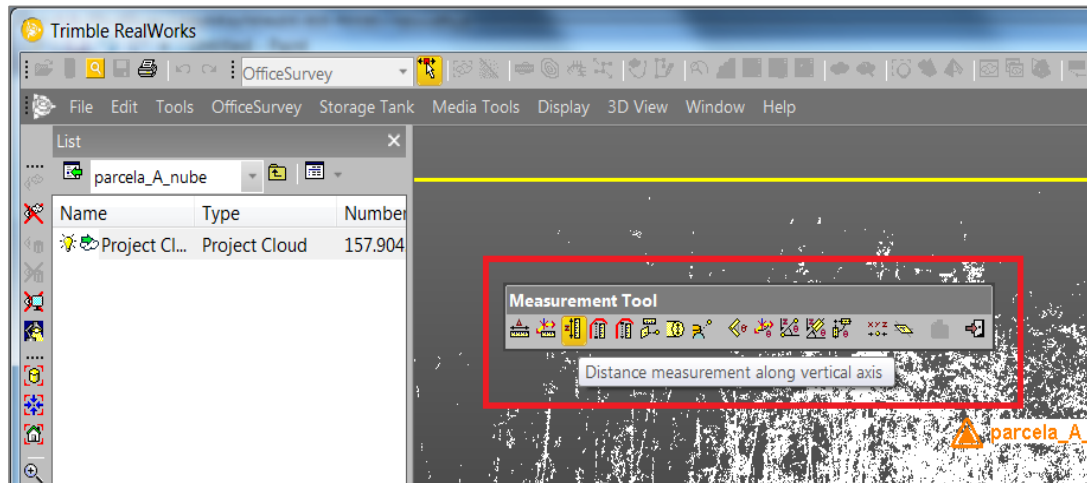
medición de la distancia vertical (ver Figura 58), obteniendo así dos puntos de altura (ver Figuras 59 y 60) para poder unirlos en el proceso contiguo de corte transversal.



*Figura 56.* Herramienta de acercamiento



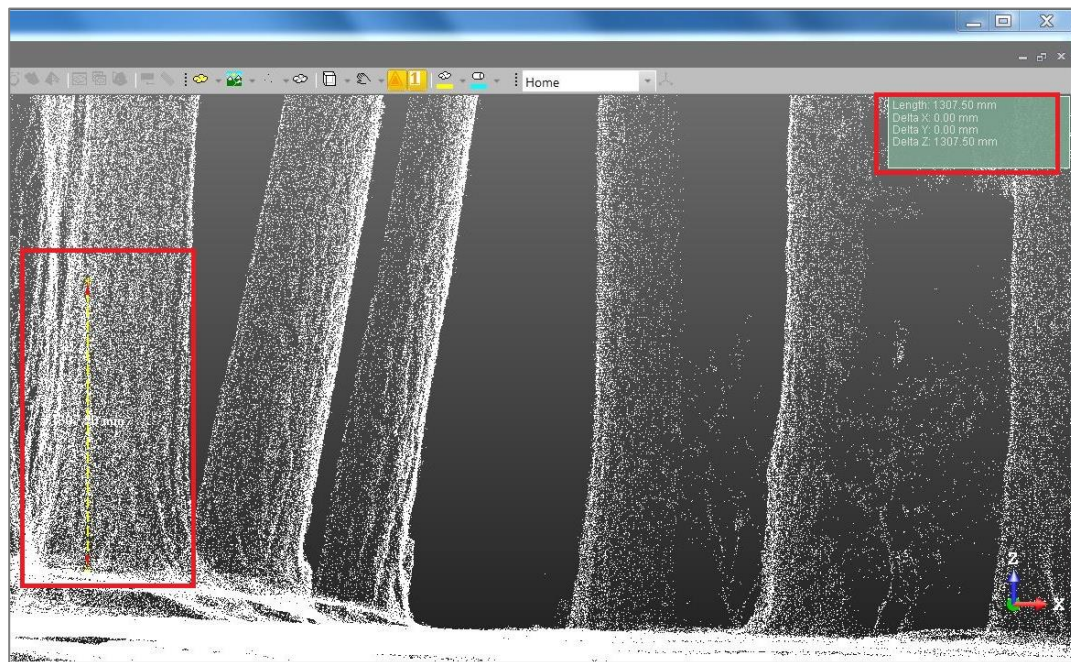
*Figura 57.* Herramienta de mediciones



*Figura 58.* Herramienta medición de distancia vertical

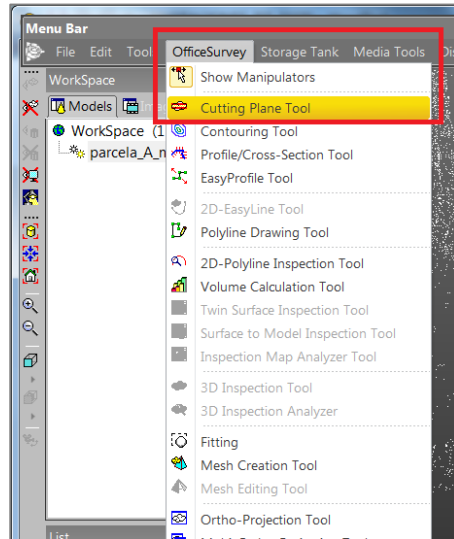


*Figura 59.* Medición de la altura 1

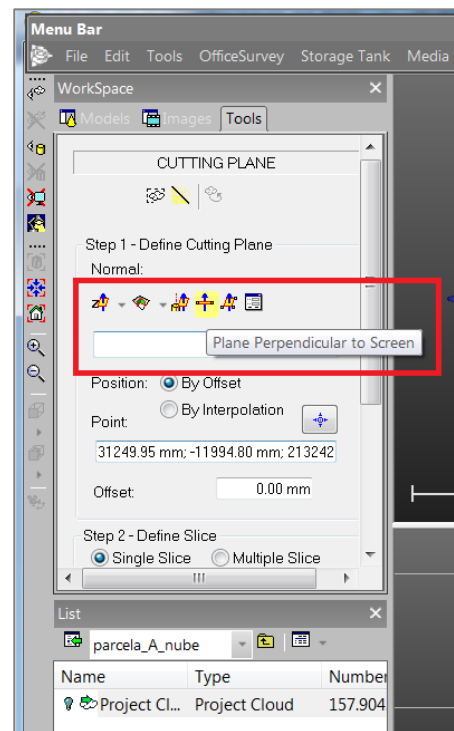


**Figura 60.** Medición de la altura 2

- Usando la herramienta plano de corte localizada dentro de las opciones de OfficeSurvey del programa (ver Figura 61), se procedió a extraer el plano de corte transversal a la altura de 1.30 m, para lo cual se seleccionó la opción plano perpendicular a la pantalla (ver Figura 62) en la que se unieron los dos puntos correspondientes a la altura 1 y a la altura 2 (ver Figura 63).



**Figura 61.** Herramienta plano de corte

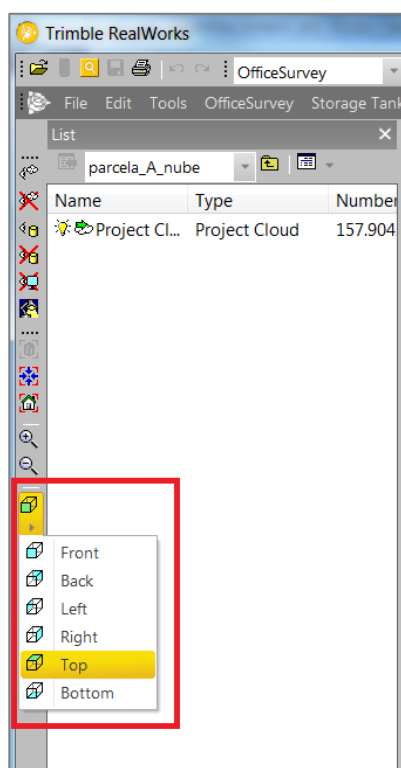


**Figura 62.** Opción plano perpendicular a la pantalla



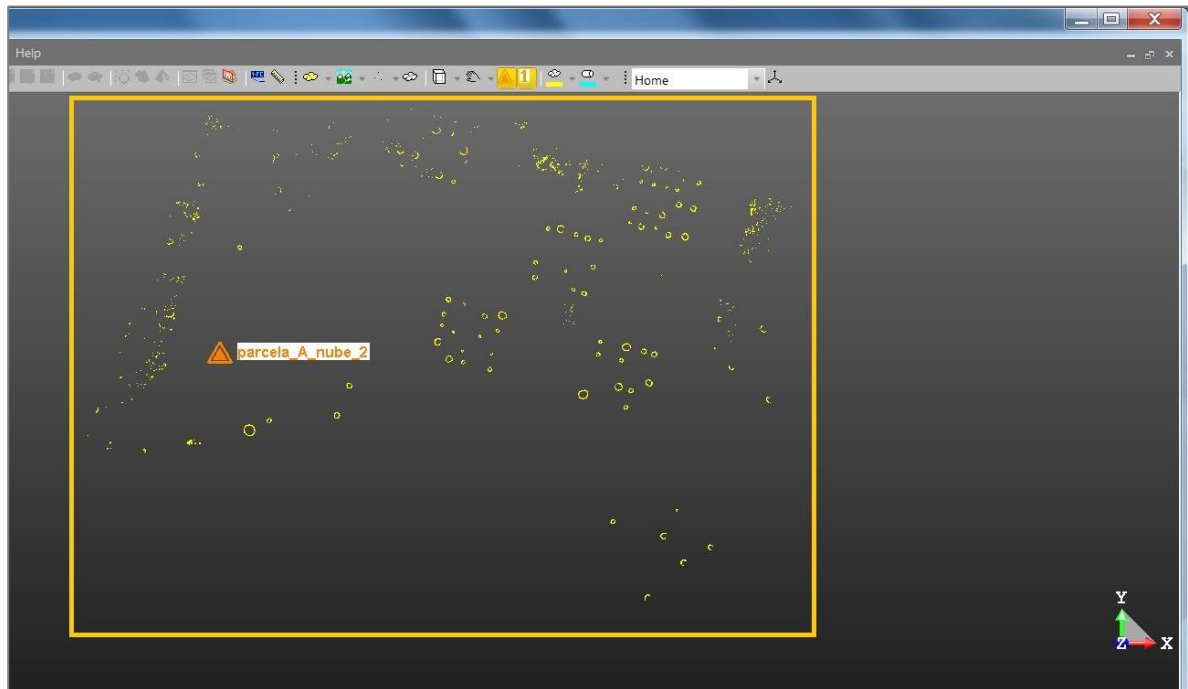
**Figura 63.** Unión de las alturas 1 y 2

- Se procede a visualizar el resultado desde una vista superior del corte, seleccionando dicha opción desde la barra de herramientas localizada en la parte lateral izquierda del entorno de trabajo (ver Figura 64), en la cual se verificó la forma real de cada uno de los árboles, puesto a que éstos no poseen una forma cilíndrica perfecta (ver Figura 65).



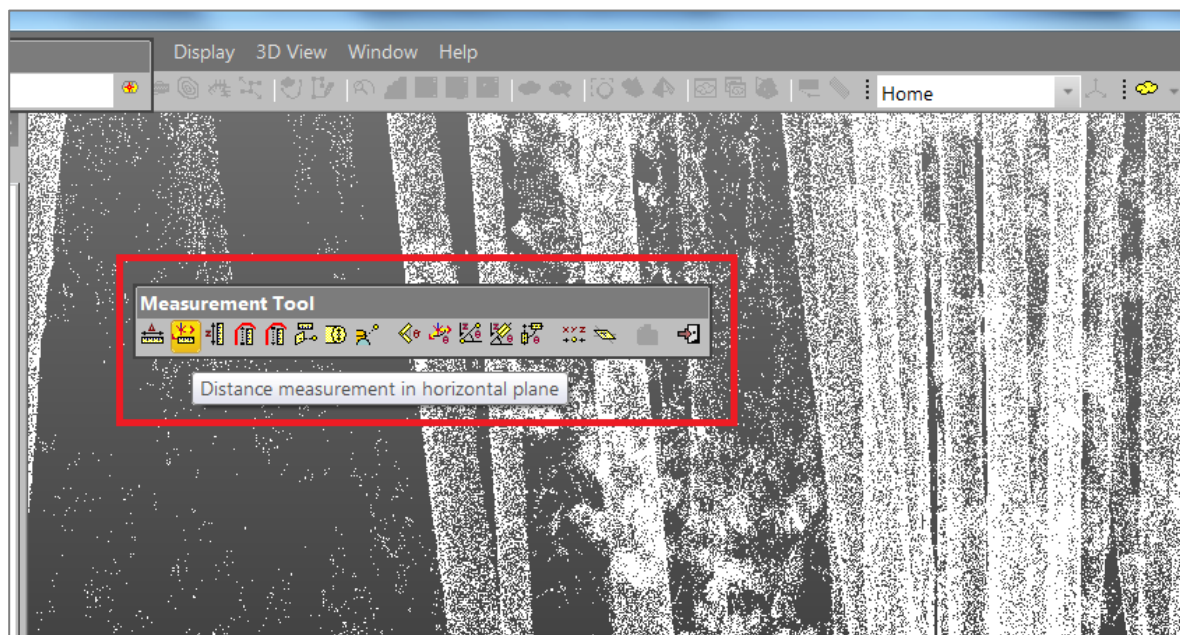
**Figura 64.** Opción de vista superior





*Figura 65.* Plano de corte transversal

- Dentro de la herramienta de mediciones se seleccionó la opción de medición de la medida horizontal (ver Figura 66), puesto a que las medidas del diámetro normal de los árboles de interés se lo realizó en el corte transversal dentro de un plano de dos dimensiones.



**Figura 66.** Herramienta medición horizontal

- Se determinaron dos puntos pertenecientes al diámetro normal de un árbol para ser medidos (ver Figura 67), luego se seleccionó la opción crear dentro de la herramienta de medición para guardar el valor medido (ver Figura 68) y el programa mostró dicho valor en milímetros (ver Figura 69).



**Figura 67.** Distancia entre dos puntos

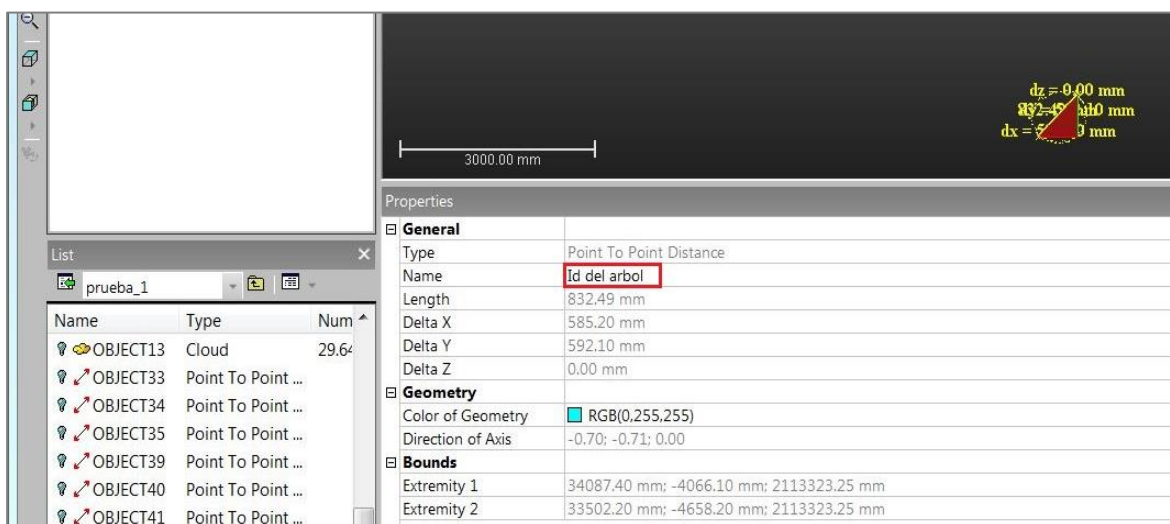


*Figura 68.* Creación de medición



*Figura 69.* Resultado de la medición en mm

- Al abrir las propiedades que se encuentran al dar clic derecho en los objetos que se crean al procesar las nubes de puntos localizados en la parte inferior derecha del entorno de trabajo, se pudo cambiar el nombre para poder identificar cada árbol medido mediante la asignación de un ID, así como también se pudo verificar los valores medidos de los diámetros de cada uno que fueron guardados (ver Figura 70).



**Figura 70.** Propiedades de la medición

De esta manera se midieron digitalmente los valores del diámetro normal de los árboles de interés, ubicados en las parcelas de estudio A y B.

### 3.3.3. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los valores del diámetro normal de los árboles, obtenidos aplicando tecnología escáner láser terrestre y la técnica convencional de campo mediante el uso de la cinta métrica, se realizaron dos procedimientos de análisis basados en la estadística descriptiva e inferencial, para lo cual se utilizó el software libre Rstudio. Cabe recalcar que para los valores medidos mediante el escáner terrestre y usando la cinta métrica se utilizarán las palabras digital y campo respectivamente.

#### a) Estadística descriptiva

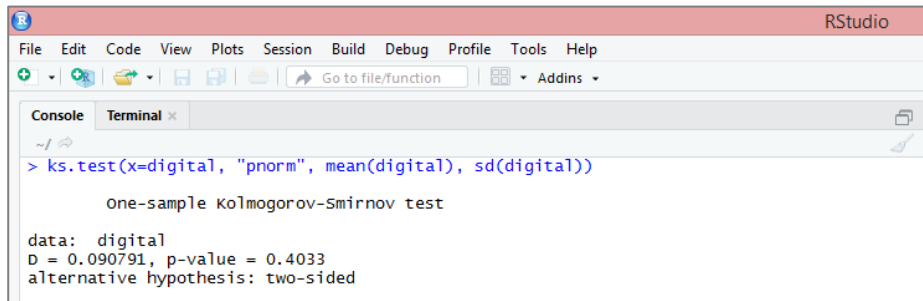
Dentro de este análisis, se determinaron los valores de los parámetros estadísticos de centralización, dispersión y forma que describen el comportamiento de los datos medidas en digital y en campo con base en las Tablas 2, 3 y 4 del literal 2.3.2. del presente documento, así como

también se representaron dichos parámetros mediante gráficos de caja e histogramas. Además para determinar si los datos siguen una distribución normal se obtuvieron los valores de los parámetros de forma mencionados en las ecuaciones 5 y 6 expuestas en el apartado 2.3.2. del presente escrito. Los comandos utilizados en el software Rstudio para llevar a cabo el análisis descriptivo de los datos se presentan en la Tabla 7, y en el anexo 4 se encuentra el código ejecutado para dicho análisis.

**Tabla 7**  
*Comandos en Rstudio para análisis descriptivo*

<b>Comando</b>	<b>Descripción</b>
summary	Resumen estadístico
range	Rango
min	Valor mínimo
max	Valor máximo
mean	Media
median	Mediana
sd	Desviación estándar
var	Varianza
IQR	Rango intercuartílico
skewness	Asimetría
kurtosis	Curtosis
boxplot	Gráfico de caja
hist	Gráfico de histograma

Es importante señalar que para determinar si las variables intervenidas (valores del diámetro normal de los árboles medidos en campo y digital) siguen una distribución normal, se utilizaron los gráficos de histogramas de frecuencia (gráficamente) y se consideraron los valores de los parámetros de forma como son el coeficiente de asimetría y la curtosis, así como también se realizó el test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov (cuantitativamente); en la Figura 71 se presenta el código ejecutado en el software Rstudio para realizar la prueba de normalidad de los datos (Molina Simbaña, 2016).



```

RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
Go to file/function Addins
Console Terminal x
~/
> ks.test(x=digital, "pnorm", mean(digital), sd(digital))

One-sample Kolmogorov-Smirnov test

data: digital
D = 0.090791, p-value = 0.4033
alternative hypothesis: two-sided

```

**Figura 71.** Prueba de normalidad Kolmogorov-Smirnov

Para poder realizar el test de normalidad de las variables intervenidas se consideró:

- $H_0$ : Los valores de las mediciones en campo y digital tienen una distribución normal.
- $H_1$ : Los valores de las mediciones en campo y digital no tienen una distribución normal.
- Nivel de significancia =  $\alpha = 5\% = 0.05$

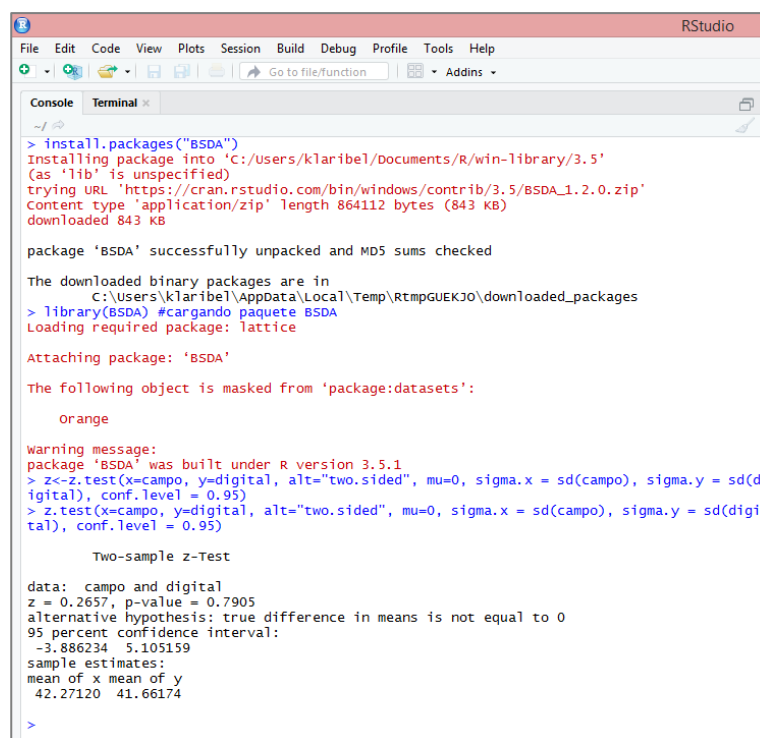
#### **b) Estadística inferencial**

En este análisis se realizaron dos pruebas de hipótesis que son la prueba Z y la prueba de chi cuadrado, siguiendo los pasos establecidos en el literal 2.3.3. del presente documento. Además, se consideró que la hipótesis a demostrar fue la igualdad de los valores del diámetro normal de los árboles (DAP) de estudio, tomados utilizando la tecnología LIDAR terrestre (digitalmente) con respecto a los valores medidos aplicando la técnica convencional de campo mediante la cinta métrica (campo).

Para aplicar el análisis inferencial de los datos se consideró:

- $H_0$ : El DAP medido en campo es el mismo que el DAP medido digitalmente.
- $H_1$ : El DAP medido en campo no es el mismo que el DAP medido digitalmente.
- Nivel de significancia =  $\alpha = 5\% = 0.05$

Se determinaron los valores estadísticos y los valores críticos de las pruebas Z y Chi cuadrado en el software Rstudio para establecer una regla de decisión de aceptación o rechazo de la hipótesis nula o alternativa, como se muestran en las Figuras 72 y 73 respectivamente.



```

RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
Go to file/function Addins
Console Terminal
~/
> install.packages("BSDA")
Installing package into 'C:/Users/klaribel/Documents/R/win-library/3.5'
(as 'lib' is unspecified)
trying URL 'https://cran.rstudio.com/bin/windows/contrib/3.5/BSDA_1.2.0.zip'
Content type 'application/zip' length 864112 bytes (843 KB)
downloaded 843 KB

package 'BSDA' successfully unpacked and MD5 sums checked

The downloaded binary packages are in
  C:\Users\klaribel\AppData\Local\Temp\RTmpGUEKJO\downloaded_packages
> library(BSDA) #cargando paquete BSDA
Loading required package: lattice

Attaching package: 'BSDA'

The following object is masked from 'package:datasets':

  Orange

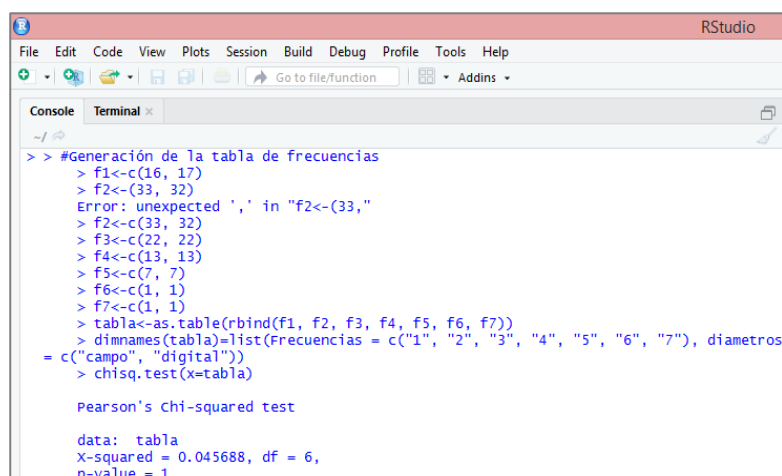
warning message:
package 'BSDA' was built under R version 3.5.1
> z<-z.test(x=campo, y=digital, alt="two.sided", mu=0, sigma.x = sd(campo), sigma.y = sd(d
igital), conf.level = 0.95)
> z.test(x=campo, y=digital, alt="two.sided", mu=0, sigma.x = sd(campo), sigma.y = sd(digi
tal), conf.level = 0.95)

Two-sample z-Test

data: campo and digital
z = 0.2657, p-value = 0.7905
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -3.886234  5.105159
sample estimates:
mean of x mean of y
 42.27120  41.66174
>

```

**Figura 72.** Prueba de hipótesis Z



```

RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
Go to file/function Addins
Console Terminal
~/
> #Generación de la tabla de frecuencias
> f1<-c(16, 17)
> f2<-c(33, 32)
Error: unexpected ',' in "f2<-c(33,"
> f2<-c(33, 32)
> f3<-c(22, 22)
> f4<-c(13, 13)
> f5<-c(7, 7)
> f6<-c(1, 1)
> f7<-c(1, 1)
> tabla<-as.table(rbind(f1, f2, f3, f4, f5, f6, f7))
> dimnames(tabla)=list(Frecuencias = c("1", "2", "3", "4", "5", "6", "7"), diametros
= c("campo", "digital"))
> chisq.test(x=tabla)

Pearson's chi-squared test

data: tabla
X-squared = 0.045688, df = 6,
p-value = 1

```

**Figura 73.** Prueba de hipótesis Chi cuadrado

Para la toma de decisión se consideró que si el valor crítico fue mayor que el valor estadístico, la hipótesis aceptada fue la nula.

Para poder comparar las mediciones en campo y en digital y validar la hipótesis de igualdad planteada en el análisis inferencial, se determinó el coeficiente de correlación lineal de Pearson a través de un modelo de regresión lineal simple, como se expone en la ecuación 7 del literal 2.3.3.; en donde el término “y” toma valores de las mediciones en campo y el término “x” adquiere los valores de las mediciones en digital.

#### **3.3.4. Estimación de biomasa aérea**

Para la estimación de la biomasa aérea fue necesario aplicar el modelo alométrico propuesto por Chave (2005), se consideraron los valores del diámetro normal de los árboles que fueron medidos a través de la técnica convencional basada en el uso de la cinta métrica por ser un método directo de captura de información en campo. Además se incluyeron los valores de la densidad específica de los árboles que fueron obtenidos del estudio realizado por Andrade y Arias (2016); con base a lo mencionado para el cálculo de la estimación de la biomasa aérea en la zona de aplicación del proyecto dentro del bosque de la Armenia se utilizó la ecuación 2, expuesta en el ítem 2.1.4. del presente documento.



## **CAPÍTULO IV**

### **4. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

El presente capítulo abarca los resultados obtenidos del análisis dasométrico realizado mediante la aplicación de la tecnología escáner láser terrestre y las técnicas convencionales de mediciones forestales con el propósito de estimar la biomasa aérea en el área de aplicación del proyecto. Con base a los objetivos y las metas planteadas, los resultados se presentan en tres partes principales que son el modelo tridimensional de las parcelas de estudio, el informe estadístico de las variables intervenidas y el mapa de estimación de biomasa aérea del área de interés.

#### **4.1. Modelo tridimensional de las parcelas de estudio**

El modelo tridimensional es la reconstrucción digital del área de aplicación del proyecto que fue dividida en dos parcelas de estudio A y B (ver Figura 74), con el propósito de facilitar la adquisición, el manejo y el procesamiento de la información; este modelo representa la realidad física del entorno de cada una de las parcelas y está conformado por una nube de puntos que es el resultado de la captura y procesamiento de los datos LIDAR obtenidos a través de la aplicación de la tecnología escáner láser terrestre.



**Figura 74.** Localización parcelas de estudio

La localización de las parcelas de estudio, está delimitada por cuatro puntos en cada una de ellas como se puede verificar en las Tablas 8 y 9.

**Tabla 8**

*Localización parcela A*

Parcela A		
Puntos límite	Este (m)	Norte(m)
1	781950.58	9970315.28
2	781997.85	9970301.49
3	781983.90	9970253.68
4	781936.63	9970267.47

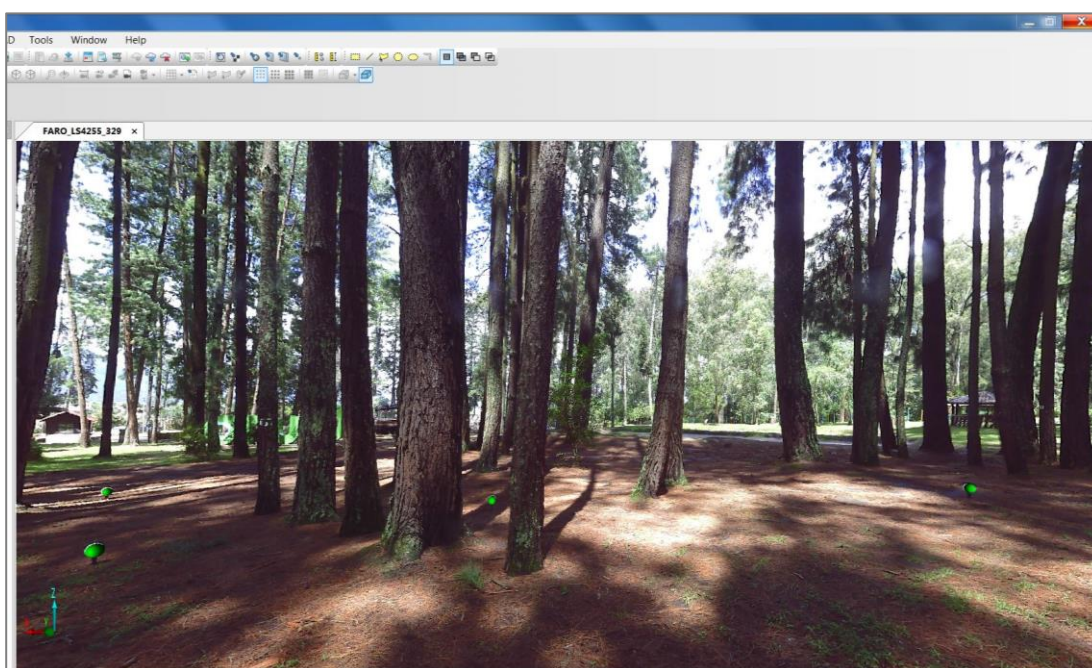
**Tabla 9**

*Localización parcela B*

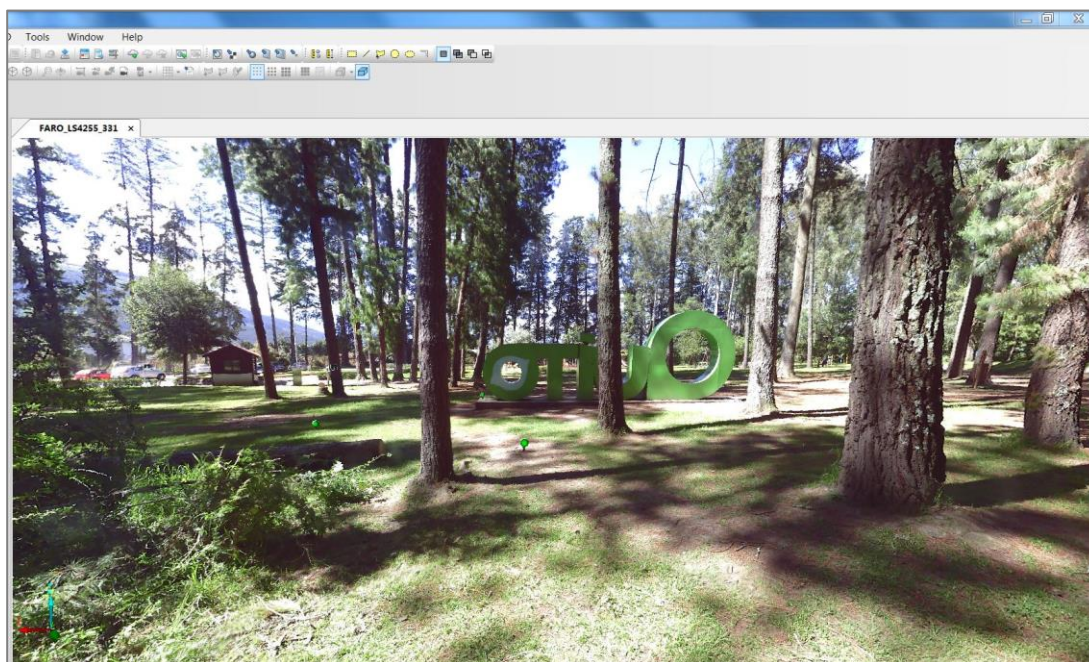
Parcela B		
Puntos límite	Este (m)	Norte(m)
1	781997.85	9970301.49
2	782047.07	9970287.14
3	782033.12	9970239.32
4	781936.63	9970267.47

**Nota:** Debido a que las parcelas de estudio son contiguas, los puntos 2 y 3 de parcela A son los mismos que los puntos 1 y 4 de la parcela B.

Como resultado de la captura de los datos a través del escáner láser terrestre en el área de aplicación del proyecto, se obtuvieron 11 escenas de la parcela A y 14 escenas de la parcela B, que corresponden a la información sin procesar que se descargó luego del trabajo de campo realizado, en las Figuras 75 y 76 se puede verificar una primera visualización en el software Scene de las escenas y en el anexo 1 se encuentran todas las escenas que conforman un escenario de cada una de las parcelas de estudio.

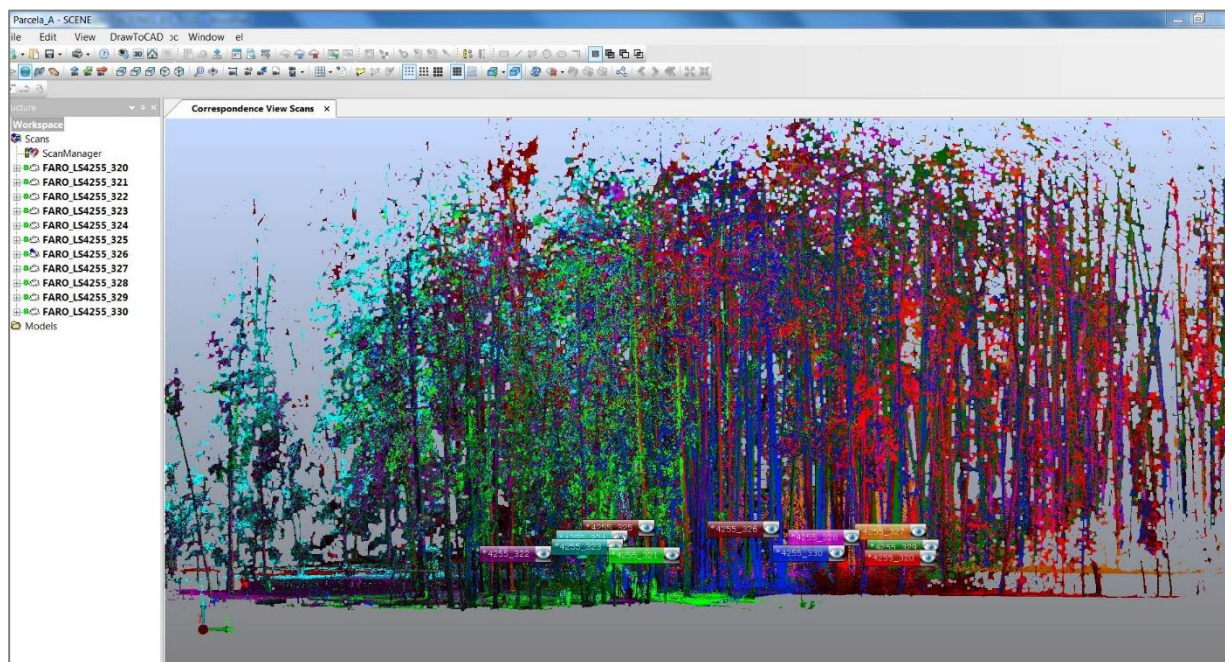


*Figura 75.* Escena sin procesar de la parcela A

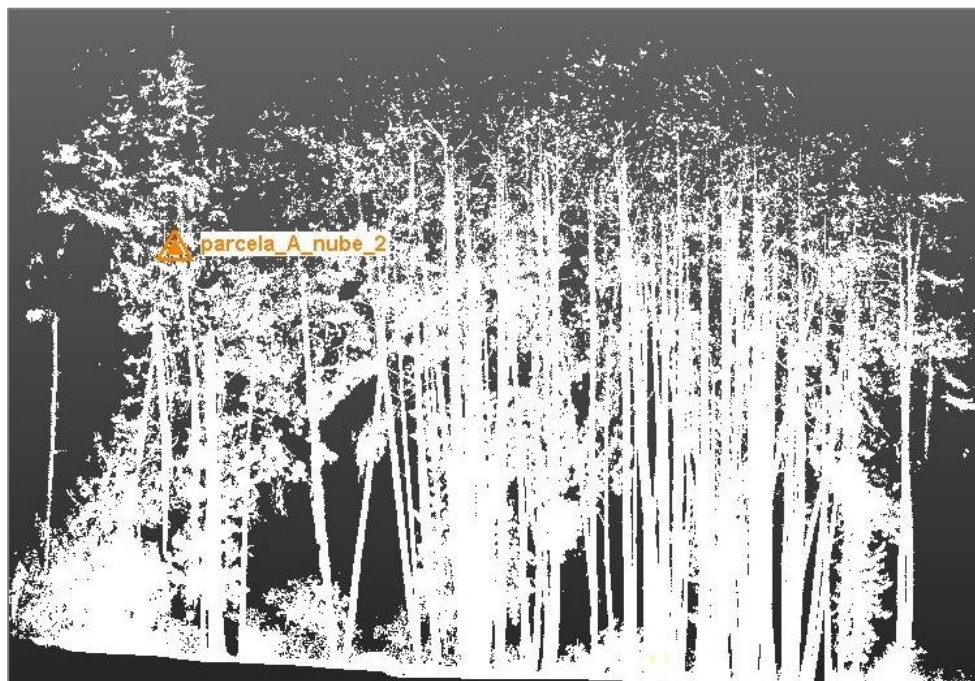


*Figura 76.* Escena sin procesar de la parcela B

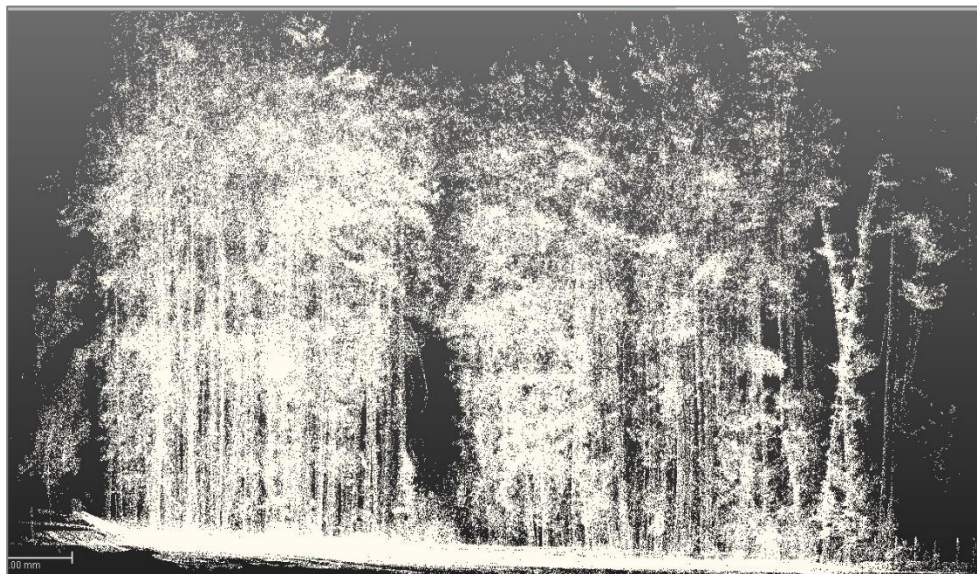
Del procesamiento de los datos LIDAR capturados se obtuvo un escenario de cada una de las parcelas de estudio, que fue el resultado de la unión de todas las escenas (ver Figura 77), así como también la nube de puntos que determinó el modelo tridimensional de la parcela A con un total de 12 275 974 número de puntos (ver Figura 78) y para la parcela B el modelo tridimensional estuvo conformado por 16 184 721 número de puntos (ver Figura 79).



*Figura 77.* Unión de las escenas



*Figura 78.* Modelo tridimensional parcela A



**Figura 79.** Modelo tridimensional parcela B

A partir del modelo tridimensional de cada una de las parcelas de estudio, se editó las nubes de puntos correspondientes en el software Trimble Real Woks, para obtener un plano de corte transversal (ver Figura 80), en el cual se pudo realizar las mediciones digitales del diámetro normal de los árboles de interés ubicados en el área de aplicación del proyecto.



**Figura 80.** Plano de corte transversal

## 4.2. Informe estadístico

El principal objetivo del análisis estadístico de las variables dasométricas fue poder validar la aplicación de la tecnología escáner láser terrestre, como una metodología alternativa a las técnicas convencionales de mediciones forestales, para la estimación de biomasa aérea. Como resultado de las técnicas utilizadas en el presente trabajo, se obtuvieron 93 mediciones digitales y en campo del diámetro normal (DAP) de los árboles ubicados en el área de aplicación del proyecto, dentro del bosque “La Armenia” (ver Tabla 10).

**Tabla 10**

*Diámetro normal de los árboles – Mediciones digitales y de campo*

Diámetro normal (cm)		
Árbol ID	Campo	Digital
1	101.06	100.94
2	38.03	38.53
3	53.82	53.90
4	43.06	44.97
5	33.26	31.35
6	58.98	57.74
7	53.31	54.48
8	31.99	30.56
9	41.22	39.59
10	21.29	19.46
11	20.46	18.93
12	21.07	19.17
13	28.07	25.79
14	71.27	69.24
15	39.69	39.53

**Nota:** Debido a que la extensión de la tabla es muy grande, únicamente se presentan las 15 primeras mediciones digitales y en campo, en el anexo 2 se encuentra la tabla completa que contiene las 93 mediciones realizadas a través de la aplicación de la tecnología escáner láser terrestre y las técnicas convencionales de mediciones forestales.

Mediante el análisis estadístico de las variables dasométricas intervenidas (mediciones en campo y digital), con base en la estadística descriptiva e inferencial se determinaron diferentes parámetros descriptivos y se realizó el contraste de los datos, con el objeto de interpretarlos a través de patrones de comportamiento y el planteamiento de hipótesis.

### a) Análisis descriptivo

Los resultados de este análisis están basados en la interpretación de los parámetros de centralización, dispersión, posición y forma de las variables intervenidas.

En la Tabla 11, se presentan los parámetros de centralización que incluyen el tamaño de la muestra (N), la media ( $\bar{x}$ ), la mediana (Me), el valor mínimo (Min) y máximo (Max) de las mediciones en campo y digital del DAP de los árboles de estudio.

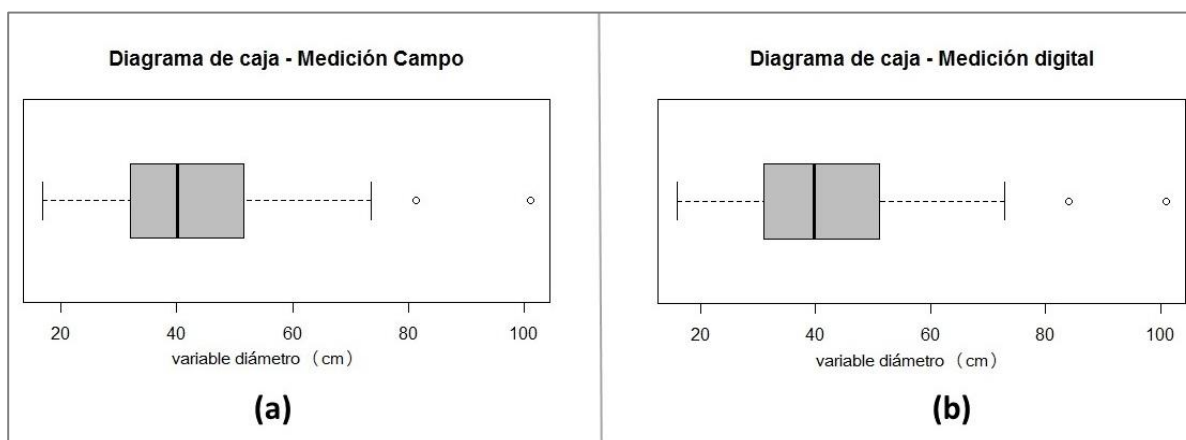
**Tabla 11**

*Parámetros de centralización – DAP*

<b>Parámetro</b>	<b>Campo</b>	<b>Digital</b>
N	93	93
$\bar{x}$	42.27 cm	41.66 cm
Me	40.17 cm	39.78 cm
Min	16.93 cm	16.01 cm
Max	101.63 cm	100.94 cm

Como se expone en la tabla, los valores de la media y la mediana son muy próximos en ambos grupos de mediciones (campo y digital), indicando así que los datos analizados siguen una distribución normal; además se tiene que para las mediciones en campo los valores mínimo y máximo son 16.93 cm y 101.63 cm respectivamente, y en el caso de las mediciones digitales el mínimo y máximo valor son 16.01 cm y 100.94 cm respectivamente, como se puede verificar en la Figura 81.





**Figura 81.** Diagramas de caja para mediciones de campo (a) y digital (b)

En la figura se visualiza que existen dos valores atípicos superiores a los 80 cm para el conjunto de datos de las mediciones en campo y digital, así como también se encuentran representados los valores de la media, el mínimo y el máximo valor de ambos casos.

En la Tabla 12, se muestran los valores del rango (R), la desviación estándar (s), la varianza ( $s^2$ ) y el coeficiente de variación que describen los parámetros de dispersión de las variables analizadas.

**Tabla 12**

*Parámetros de dispersión – DAP*

<b>Parámetro</b>	<b>Campo</b>	<b>Digital</b>
R	84.12 cm	84.93 cm
s	15.50 cm	15.77 cm
$s^2$	240.39 $cm^2$	248.91 $cm^2$
CV	36.67 %	37.87 %

La diferencia entre los mínimos y máximos valores del DAP de los árboles para ambos grupos de mediciones (campo y digital) es de aproximadamente 84 cm, la variabilidad de los datos respecto a la media en ambos casos es de aproximadamente 15 cm, y en cuanto a las mediciones en campo, presentan un coeficiente de variación alto (36.67 %), que indica que los

datos están distribuidos espacialmente de manera homogénea, al igual que los correspondientes a las mediciones digitales que tienen un coeficiente de variación de 37.87%.

La Tabla 13 expone los parámetros de posición, dentro de los cuales se encuentran el primer y tercer cuartil para los dos grupos de mediciones (campo y digital).

**Tabla 13**

*Parámetros de posición – DAP*

<b>Parámetro</b>	<b>Campo</b>	<b>Digital</b>
1er cuartil	31.99 cm	31.01 cm
3er cuartil	51.57 cm	51.11 cm

En el caso de las mediciones del DAP de los árboles en campo, se tiene que el 25% y 75% de los datos son menores o iguales que 31.99 cm y 51.57 cm respectivamente; y para las mediciones digitales del DAP de los árboles, el 25% y 75% de los datos corresponden a valores menores o iguales que 31.01 cm y 51.11 cm respectivamente.

La Tabla 14 muestra los coeficientes de asimetría y curtosis que son parte de los parámetros de forma de la distribución de los datos analizados.

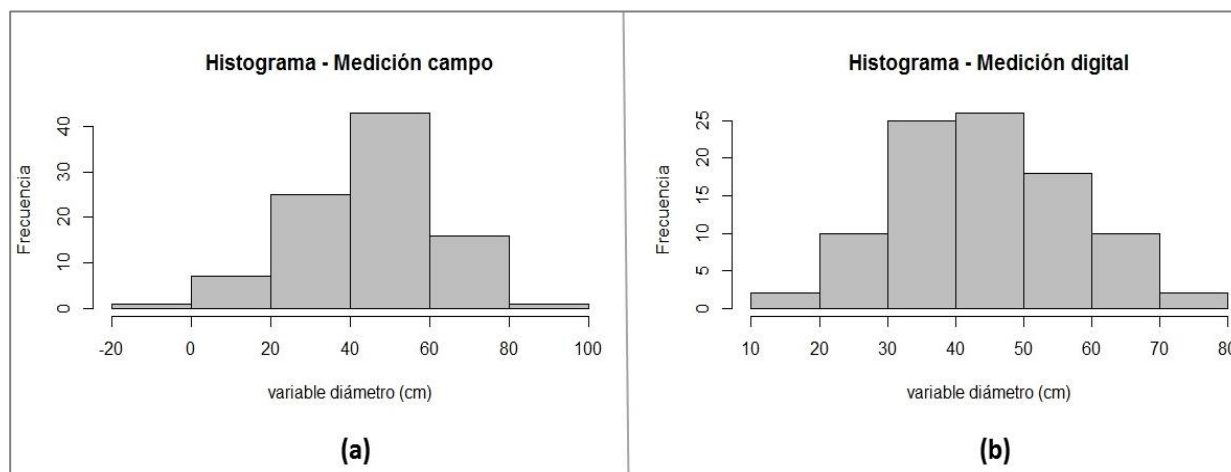
**Tabla 14**

*Parámetros de forma – DAP*

<b>Parámetro</b>	<b>Campo</b>	<b>Digital</b>
Coefficiente de asimetría	0.86	0.85
Coefficiente de curtosis	1.06	1.06

El conjunto de datos de mediciones de campo y digital presentan coeficientes de asimetría (0.86 y 0.85 respectivamente) y curtosis (1.06 y 1.06 respectivamente) positivos, debido a que los valores de los coeficientes se aproximan 0, significa que los datos se encuentran ligeramente acumulados hacia la derecha y concentrados cercanos a la media de las variables, tendiendo a una

forma normal de distribución; mediante la Figura 82 en la cual se exponen los histogramas, se confirma que los datos siguen una distribución normal para ambos grupos de mediciones.



**Figura 82.** Histogramas de distribución de las mediciones en campo (a) y digital (b)

Además, para comprobar la afirmación de que los datos siguen una distribución normal se realizó el test de normalidad Kolmogorov-Smirnov para los dos grupos de mediciones (campo y digital) de acuerdo con la metodología descrita en el apartado 3.3.3. del presente documento, para las mediciones de campo se obtuvo un valor estadístico ( $D=0.08$ ) y un valor crítico ( $p\text{-value}=0.49$ ), y para las mediciones digitales se determinó un valor estadístico ( $D=0.09$ ) y un valor crítico ( $p\text{-value}=0.40$ ). Como el valor crítico ( $p\text{-value}$ ) resultó ser mayor que el valor estadístico ( $D$ ) en los dos de grupos de datos analizados, no se rechaza la hipótesis de normalidad y se afirma que los valores de las mediciones en campo y digital tienen una distribución normal.

## **b) Análisis inferencial**

Dentro de este análisis se presentan los resultados de las pruebas de hipótesis Z y Chi cuadrado, que se realizaron siguiendo la metodología expuesta en el literal 3.3.3. del presente escrito, para comprobar que los valores del DAP de los árboles medidos utilizando la tecnología LIDAR terrestre (digitalmente) son los mismos, con respecto a los valores obtenidos aplicando la técnica convencional de campo mediante la cinta métrica (campo).

Para realizar las pruebas de hipótesis Z y Chi cuadrado se tuvo en cuenta:

- $H_0$ : El DAP medido en campo es el mismo que el DAP medido digitalmente.
- $H_1$ : El DAP medido en campo no es el mismo que el DAP medido digitalmente.
- Nivel de significancia =  $\alpha = 5\% = 0.05$

### **Prueba de hipótesis Z**

El valor crítico de Z con un nivel de significancia del 5% es de 0.79, dado que el valor estadístico obtenido es 0.26 y resultó ser menor que el valor crítico, se acepta la hipótesis nula; afirmando que el DAP de los árboles medidos en campo son los mismos que el DAP de los árboles medidos digitalmente (ver Figura 72).

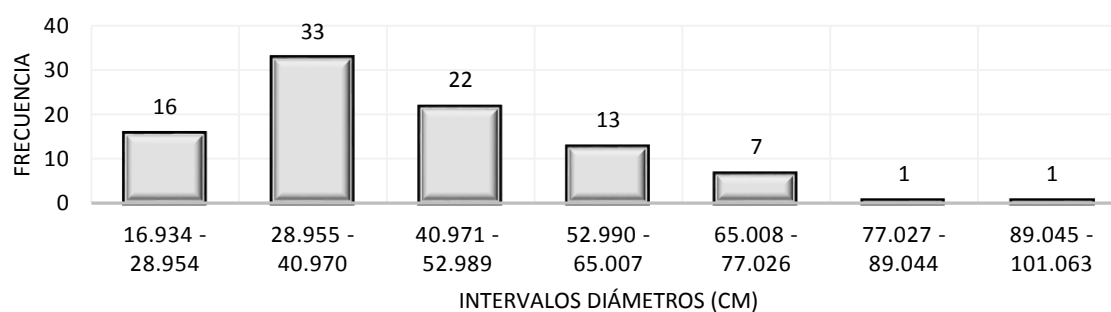
### **Prueba de Chi cuadrado**

Para poder llevar a cabo la prueba, previamente se determinó la tabla y el gráfico de frecuencia de la distribución de datos agrupados para las mediciones en campo y digital respectivamente. En las Tablas 15 y 16 se encuentran los intervalos del DAP con su correspondiente frecuencia de los grupos de datos, y en las figuras 83 y 84 se representan gráficamente los datos agrupados de las variables intervenidas.

**Tabla 15***Frecuencia de datos agrupados – DAP mediciones en campo*

Intervalos	Distribución (cm)	Frecuencia
1	16.93 - 28.95	16
2	28.95 - 40.97	33
3	40.97 - 52.98	22
4	52.99 - 65.00	13
5	65.00 - 77.02	7
6	77.02 - 89.04	1
7	89.04 - 101.06	1

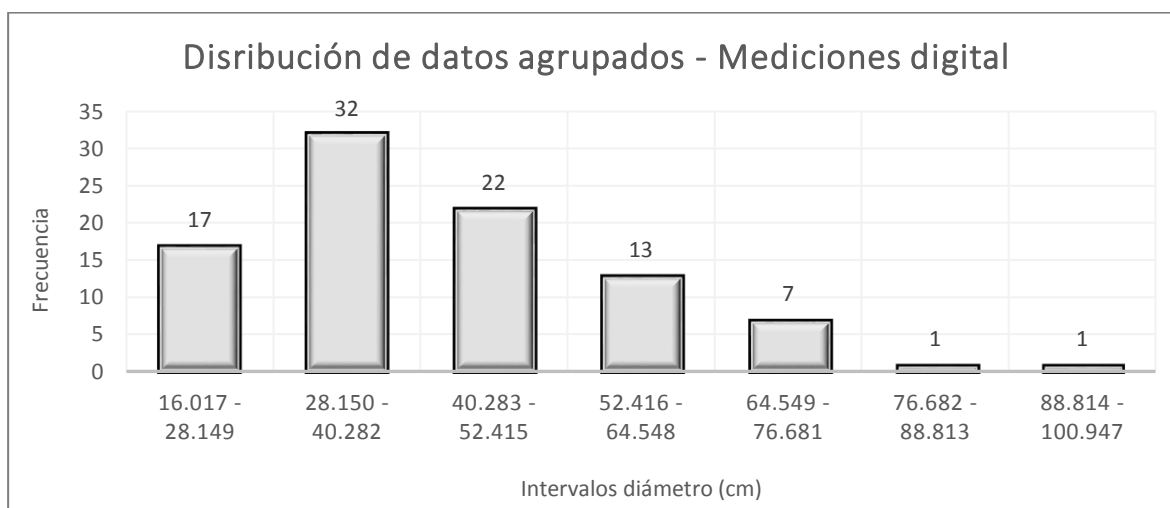
### Disribución de datos agrupados - Mediciones campo

**Figura 83.** Distribución de datos agrupados – Mediciones en campo

La distribución de las mediciones realizadas en campo, muestra que la mayoría de los valores se concentran entre 28.95 cm y 40.97 cm, con un total de 33 datos agrupados en dicho intervalo.

**Tabla 16***Frecuencia de datos agrupados – DAP mediciones en digital*

Intervalos	Distribución (cm)	Frecuencia
1	16.01 - 28.14	17
2	28.15 - 40.28	32
3	40.28 - 52.41	22
4	52.41 - 64.54	13
5	64.54 - 76.68	7
6	76.68 - 88.81	1
7	88.81 - 100.94	1



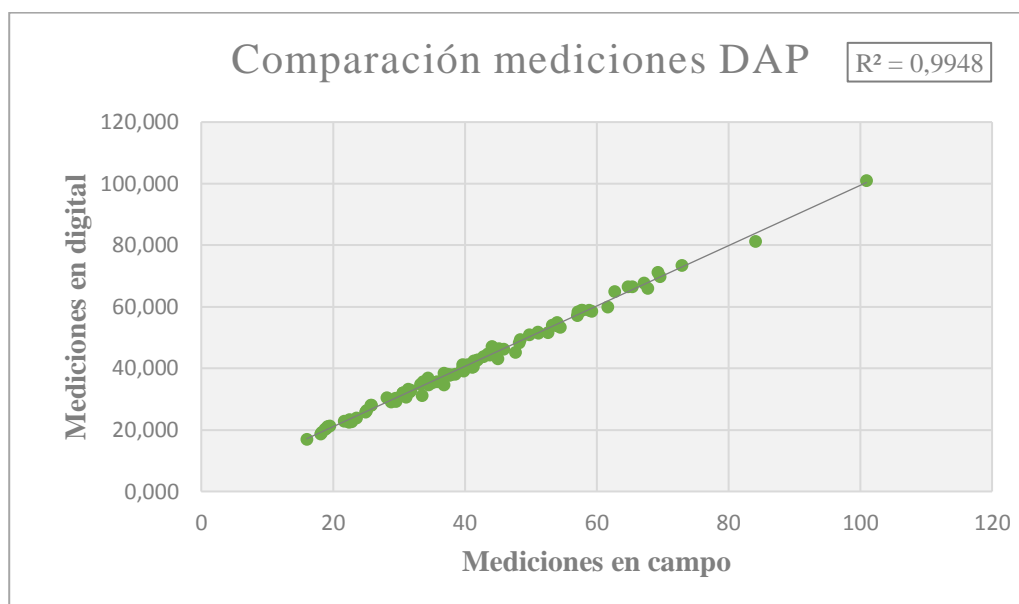
**Figura 84.** Distribución de datos agrupados – Mediciones en digital

Al analizar la distribución de las mediciones en digital, se tiene que existen 32 datos agrupados en el intervalo de 28.15 cm y 40.28 cm, teniendo así que la mayoría de los valores se concentran dentro del intervalo mencionado.

Una vez determinada la distribución de frecuencias de los datos agrupados de las variables, se obtuvo que el valor crítico de Chi cuadrado con 6 grados de libertad y un valor de significancia del 5% (1), resultó ser mayor que el valor estadístico (0.045) calculado, por lo que se acepta la hipótesis nula. Es decir, mediante esta prueba se afirma que el DAP de los árboles medidos en campo es el mismo que el DAP de los árboles medidos digitalmente.

### **Coefficiente de correlación lineal de Pearson**

Mediante el modelo de regresión lineal simple de comparación de las variables intervenidas (mediciones en campo y en digital), se obtuvo un coeficiente de correlación lineal de Pearson  $R^2 = 0.99$ , cuyo valor indica una alta correlación entre los datos analizados como se puede verificar en la Figura 85 (Pita Fernández y Pértega Díaz, 2001).



**Figura 85.** Correlación lineal de Pearson

Dado que al realizar el contraste de hipótesis Z y Chi cuadrado se determinó la aceptación de la hipótesis nula, y al calcular del coeficiente de correlación lineal de Pearson ( $R^2 = 0.99$ ) se obtuvo un valor aceptable, se demostró estadísticamente que los valores del diámetro normal de los árboles (DAP) de estudio, tomados utilizando la tecnología LIDAR terrestre (digitalmente) son muy similares con respecto a los valores medidos aplicando la técnica convencional de campo mediante la cinta métrica (campo).

#### **4.3. Mapa de Estimación de biomasa aérea**

La biomasa aérea total estimada para el área de aplicación del proyecto, corresponde a la suma de la biomasa calculada de cada árbol mediante la aplicación del modelo propuesto por Chave (2005), cuyos valores son expresados en toneladas por hectárea ( $\frac{Ton}{Ha}$ ). En la Tabla 17, se muestran los cálculos de la biomasa aérea estimada, que incluyen los valores del DAP y la densidad específica de los árboles dentro de la zona de interés.

**Tabla 17***Estimación de biomasa aérea del área de aplicación del proyecto*

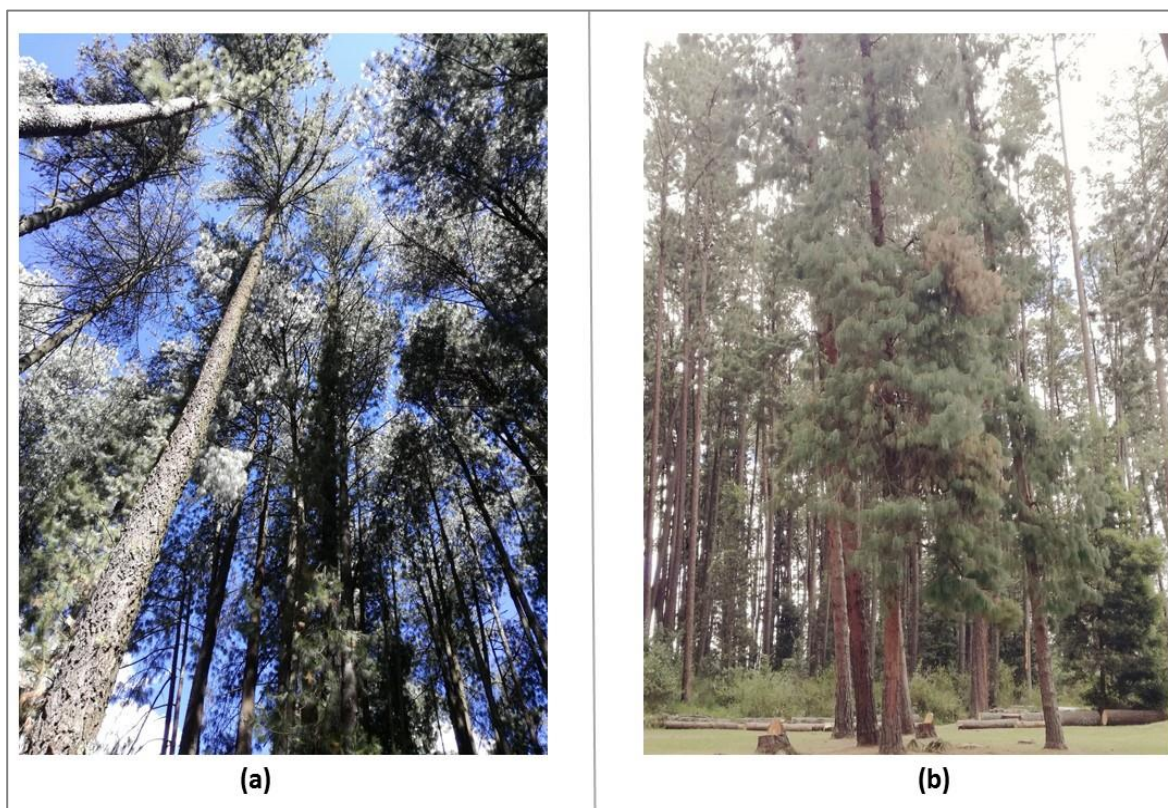
Id	Diámetro normal (cm)		Densidad específica ( $\frac{g}{cm^3}$ )	Biomasa ( $\frac{Ton}{Ha}$ )
	Campo	Digital		
1	101.06	100.94	0.53	24.85
2	38.03	38.53	0.53	2.34
3	53.82	53.90	0.53	5.59
4	43.06	44.97	0.53	3.21
5	33.26	31.35	0.53	1.66
6	58.98	57.74	0.48	6.34
7	53.31	54.48	0.48	4.95
8	31.99	30.56	0.48	1.36
9	41.22	39.59	0.48	2.60
10	21.29	19.46	0.48	0.47
11	20.46	18.93	0.48	0.42
12	21.07	19.17	0.48	0.46
13	28.07	25.79	0.48	0.97
14	71.27	69.24	0.48	9.99
15	39.69	39.53	0.48	2.37

**Biomasa aérea total estimada = 334.11 ( $\frac{Ton}{Ha}$ )**

**Nota:** Dado que la extensión de la tabla es muy grande, solo se muestran los 15 primeros valores de estimación de biomasa aérea de la zona de interés, el anexo 2 contiene la tabla completa de la estimación.

La mayoría de los árboles dentro del área de aplicación del proyecto son coníferas, y se encuentran en plena edad adulta. Las especies encontradas corresponden al pino insigne (*Pinus radiata*) y al pino australiano (*Casuarina equisetifolia*) como se puede verificar en la Figura 86.





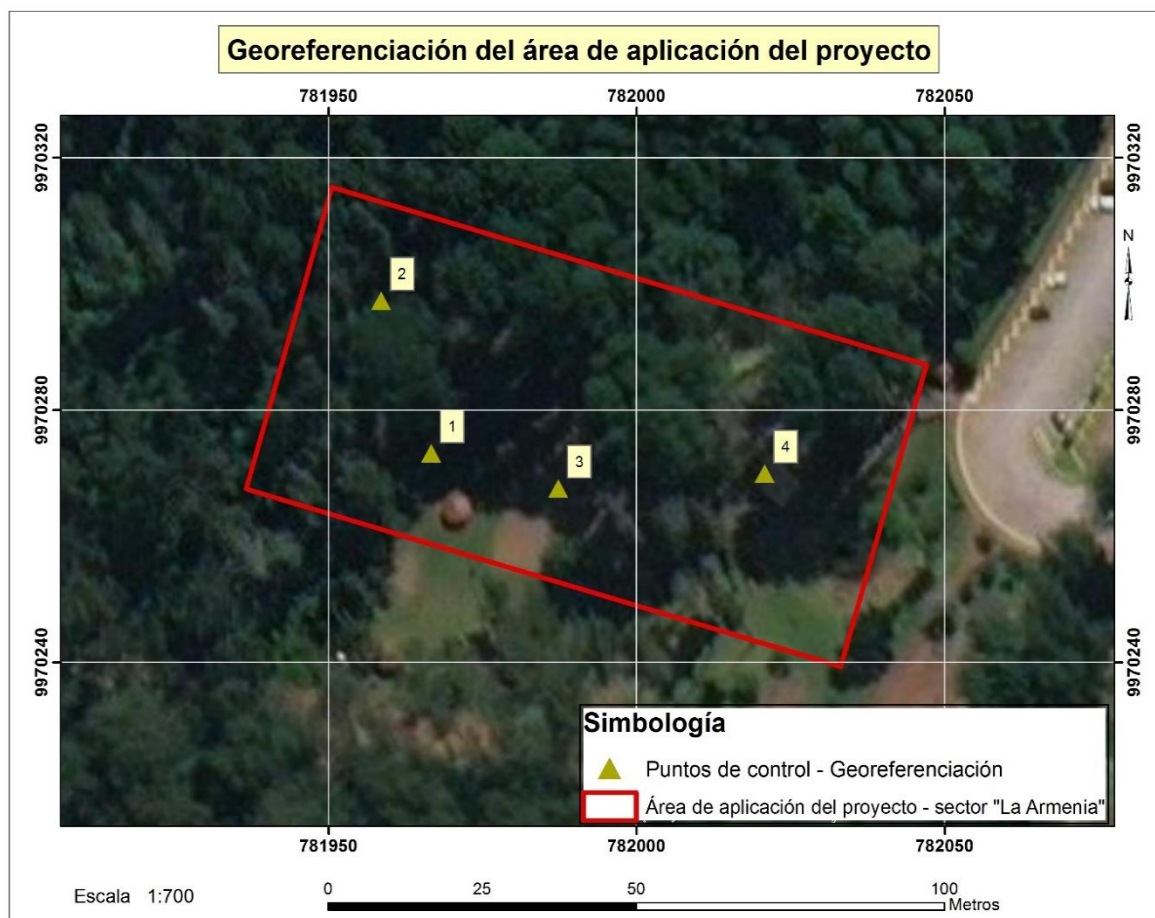
**Figura 86.** *Pinus radiata* (a) y *Casuarina equisetifolia* (b)

Para realizar el mapa de estimación de biomasa aérea, previamente se obtuvieron los puntos de control que se muestran en la Tabla 18 y se encuentran representados en la Figura 87, con el propósito de georeferenciar los resultados de la estimación dentro del área de aplicación del proyecto.

**Tabla 18**

*Puntos de control*

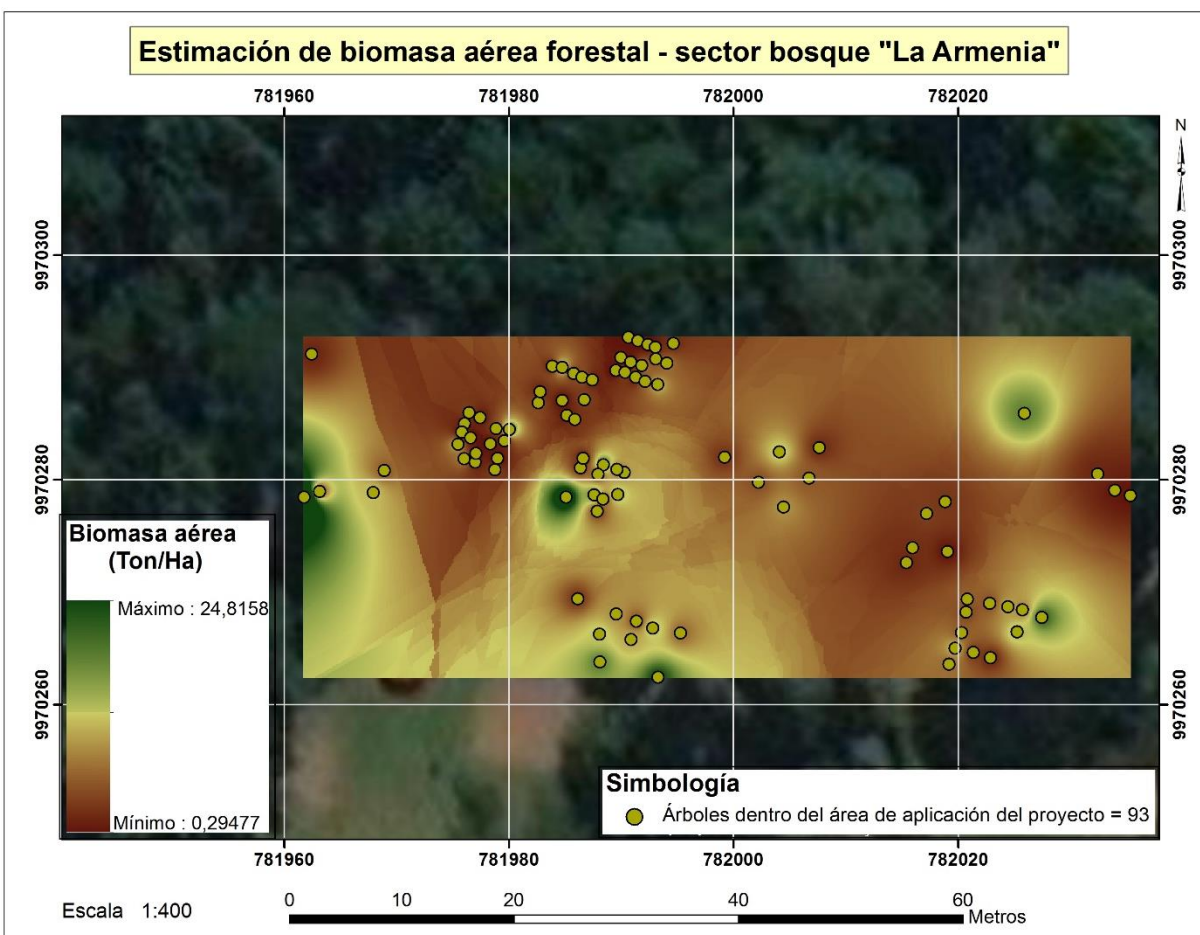
<b>Punto</b>	<b>Este (m)</b>	<b>Norte (m)</b>
1	781966.71	9970273.12
2	781958.57	9970297.29
3	781987.32	9970267.52
4	782020.81	9970269.91



**Figura 87.** Puntos de control del área de aplicación del proyecto

En la Figura 88, se presenta el mapa de estimación de biomasa aérea forestal del área de aplicación del proyecto localizada dentro del bosque “La Armenia”, además se incluye la ubicación de los árboles de estudio analizados en el presente trabajo.

El área de aplicación del proyecto presenta una escala de valores de estimación de biomasa aérea que va desde  $0.29 \left(\frac{\text{Ton}}{\text{Ha}}\right)$  hasta  $24.81 \left(\frac{\text{Ton}}{\text{Ha}}\right)$ , los mismos que fueron calculados con base a la información dasométrica de cada uno de los árboles de estudio.



**Figura 88.** Mapa de estimación de biomasa aérea

El área se caracteriza en su mayoría por tener valores bajos de biomasa aérea distribuidos en la zona central y en la zona Este, lo que significa que en dicha parte del bosque existe materia orgánica aérea homogénea, mientras que en una pequeña extensión de la zona Oeste los valores de estimación de biomasa aérea son altos, pues la vegetación a partir de esa zona empieza a densificarse hacia la dirección Oeste. El total de biomasa aérea estimada en el área de interés con una extensión de 0.5 Ha fue de  $334.11 \left(\frac{\text{Ton}}{\text{Ha}}\right)$ .

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este último capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones con base a los objetivos planteados y metas establecidas. En cada una de las técnicas de medición empleadas en el proyecto, se valida estadísticamente el uso potencia del sistema escáner láser terrestre ante las técnicas convencionales de campo en la medición de variables dasométricas para estimar biomasa aérea en un sector del bosque “La Armenia”.

#### 5.1. Conclusiones

Dentro del ámbito forestal, la tecnología escáner láser terrestre es una alternativa potencial ante las técnicas convencionales de mediciones forestales, que optimiza tiempo y ahorro de costos para realizar mediciones de las variables dasométricas empleadas en los modelos alométricos de estimación de biomasa aérea.

La tecnología LIDAR terrestre es uno de los métodos indirectos de mediciones que no es agresivo con las masas forestales además que cuenta con la capacidad y eficiencia de obtener modelos tridimensionales de bosques (ver apartado 4.1), para determinar las variables dasométricas como el diámetro normal y la densidad específica de los árboles, utilizadas en la estimación de biomasa aérea (ver Tabla 17).

Se comprobó estadísticamente que los valores del diámetro normal de los árboles medidos aplicando la tecnología escáner láser terrestre son muy similares a los obtenidos empleando la técnica convencional de campo (ver Tabla 10), dado que al realizar el contraste de las hipótesis Z y Chi cuadrado se aceptó la hipótesis de igualdad y al calcular el coeficiente de correlación lineal de Pearson ( $R^2 = 0.99$ ), se obtuvo un valor aceptable que indica una fuerte correlación entre las

variables intervenidas (ver apartado 4.2), con lo cual se garantiza que la tecnología LIDAR terrestre brinda resultados confiables en corto tiempo para la estimación de biomasa aérea.

En el área de aplicación del proyecto dentro del bosque “La Armenia” se estimó un total de 334.11  $\left(\frac{\text{Ton}}{\text{Ha}}\right)$  de biomasa aérea forestal (ver apartado 4.3). Los valores más altos de la estimación se distribuyen en una pequeña extensión de la zona Oeste, pues a partir de esa dirección la vegetación empieza a densificarse; los valores bajos de estimación predominan el área indicando así, la existencia de materia orgánica aérea distribuida homogéneamente (ver Figura 88). La mayoría de los árboles ubicados dentro de la zona de interés son coníferas en plena edad adulta. Las especies encontradas (ver Figura 86) corresponden al pino insigne (*Pinus radiata*) y al pino australiano (*Casuarina equisetifolia*).

La cantidad de biomasa estimada es un indicador de la fijación del carbono de los bosques que favorece a la reducción de los gases de efecto invernadero, además aporta información fundamental para el desarrollo adecuado de los planes de manejo en recursos naturales y la toma de decisiones para implementar políticas sobre el manejo forestal del país.

## **5.2.Recomendaciones**

La aplicación de la tecnología escáner láser es una alternativa a las técnicas convencionales de mediciones forestales para la estimación de biomasa aérea que optimiza costos y ahorro de tiempo, por lo que es recomendable su uso y aplicación para obtener una reconstrucción digital del área, facilitando así un monitoreo forestal desde gabinete.

En la captura de datos aplicando la tecnología escáner láser terrestre que se realiza en campo, se debe planificar la ubicación de las esferas de referencia a distancias no mayores a los 10m del equipo, debido a que el procesamiento de la información se ve afectado porque las esferas no son

reconocidas por el software. Es importante señalar que una vez iniciado el escaneo, se requiere evacuar la zona de interés, para evitar que el equipo capture información innecesaria.

Para la aplicación de los modelos alométricos de estimación de biomasa aérea propuestos en el proyecto, se deben tomar en cuenta únicamente los árboles que se encuentran dentro del rango de 5cm a 156 cm de diámetro normal (DAP). Además, cabe recalcar que las variables dasométricas deben ser ingresadas en cm para el DAP y ( $\frac{g}{cm^3}$ ) para la densidad específica de los árboles de estudio, y mediante conversiones de unidades la cantidad de biomasa total estimada se recomienda expresarla en ( $\frac{Ton}{Ha}$ ).

Finalmente, en este proyecto se han aplicado métodos directos e indirectos no destructivos, para realizar la medición del diámetro normal de los árboles de estudio y así poder estimar la biomasa aérea dentro de un área de interés, por lo que es adecuado mejorar la precisión de estimación considerando otras variables dasométricas como la altura total de los árboles, reduciendo así el error estándar de estimación de 19.5% a 12.5 %.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEFECC. (2015). *¿Toda la biomasa es leña? Otros tipos de biomasa*. España: AEFECC.

Aldana Pereira, E. (Noviembre de 2008). *Medición Forestal*. Pinar del Río , Cuba: Integrated Food Security Phase Classification.

Andrade Calva, F., & Arias Perugachi, J. (Junio de 2016). *Cálculo de la absorción de carbono por ecuaciones alométricas y determinación del factor de equilibrio entre emisión y absorción de carbono en los 11 sumideros del D. M. de Quito*. Quito, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.

Andrade, H., & Cerda, R. (Agosto de 2014). *Dasometría y medición de sombra*. CATIE - Soluciones para el ambiente y desarrollo.

Arévalo, W. (2015). Las energías sustentables y sostenibles en el departamento de Nariño. *La Biomasa: Una alternativa energética proveniente de la vida misma*. Colombia: Universidad de Nariño.

Balseca, M., Balseca, E., Cabrera, A., Garrido, E., Moya, T., Palacios, W., . . . Zambrano, I. (Marzo de 2016). Manual para presentar documentos escritos de trabajo de titulación. *Modalidad proyectos de investigación e intervención*. Quito, Pichincha, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.

Barrantes, G., Chaves, H., & Vinuesa, M. (2010). El bosque en el Ecuador. *Una visión transformada para el desarrollo y la conservación*. Quito, Ecuador: Comafors.

- Barrios Calmaestra, L. (2005). Unidad didáctica: Estadística. *Distribuciones Unidimensionales*. España: Descartes 2D.
- Basantes, J., Godoy, L., Carvajal, T., Castro, R., Toulkeridis, T., Fuertes, W., . . . Addison, A. (2018). *Capture and Processing of Geospatial Data with Laser Scanner System for 3D Modeling and Virtual Reality of Amazonian Caves*. IEEE Xplore digital library, 73-78.
- Cámara Forestal de Bolivia. (2016). *El aporte de la deforestación al cambio climático*. Bolivia: Finanzas Carbono.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chambers, J., Eamus, D., . . . Yamakura, T. (2005). *Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests*. *Ecosystem Ecology*, 145(1), 87-99.
- CIEFAP. (Agosto de 2017). Conocimiento e innovación en bosques Patagónicos. *Visualización de nube de puntos con 3D Forest - Bosque de lenga*. Argentina: CIEFAP.
- Cladera, M. (2012). *Análisis estadístico básico (I)*. Universitat de les Illes Balears.
- Comisión Europea - CORDIS. (Mayo de 2014). *La Biomasa y el reto del Desarrollo Sostenible*. Europa: CORDIS.
- Condés Ruíz, S., & Riaño Arribas, D. (2005). *El uso del escáner láser aerotransportado para la estimación de la biomasa foliar del Pinus Sylvestris L. en Canencia (Madrid)*. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 19(1), 63-70.



- Contreras Echebarría, A. (2014). *Obtención del modelo 3D de la azotea de la escuela técnica superior de ingenieros de telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid, mediante tecnología escáner 3D*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Cordero, D. (julio de 2011). Proyecto regional de energía y clima. *Los bosques en América Latina*. Friedrich Ebert Stiftung.
- Coromines Munt , M., Blanco Casellas, E., & Ruíz García, A. (2005). Aplicación de la tecnología LIDAR al estudio de la cubierta vegetal. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 19(1), 71-77.
- DANE. (2008). *Estimación interpretación del coeficiente de variación de la encuesta Cocensal*. Colombia.
- Dávila Martínez, F., & Camacho, E. (2012). *Georreferenciación de documentos cartográficos para la gestión de Archivos y Cartotecas*. Obtenido de Propuesta Metodológica.
- Diéguez, A., Barrio, A., Castedo, D., Ruíz, G., Álvarez, T., Álvarez, G., & Rojo, A. (2003). Dendrometría. En *Estado y tendencias de la ordenación forestal en 17 países de América Latina* (pág. 109). España: Ediciones Mundi Prensa.
- Diéguez, U., Castedo, F., Barrio, M., Álvarez, J., Rojo, A., & Ruíz, A. (Octubre de 2005). *Prácticas de Dasometría*. Lugo.
- Domínguez Hernández, F., & Huerta Ortega, F. (2012). *Análisis dasométrico y propuesta de ordenamiento agroforestal del bosque en Tetela de Ocampo, Puebla*. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 16(3), 75-82.

- Emanuelli, P. (2014). Principios básicos de medición forestal. *Inventarios forestales*. Costa Rica: REDD-CCAD-GIZ.
- Enviogreen. (Mayo de 2012). Proyectos de carbono forestal. *Definición de bosque*. Medellín, Colombia.
- EPMMOP. (julio de 2011). *La Armenia, nuevo parque metropolitano para Quito*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Escudero, I. (2016). Estadística aplicada con R y Rstudio para la investigación biométrica. *Estadística inferencial*.
- FAO. (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010*. Roma, Italia: FAO Departamento Forestal.
- FAO. (2010). *Volumen y Biomasa*.
- Fonseca, W., Alice, F., & Rey, J. (2009). *Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica*. *Bosque*, 30(1), 36-47.
- FPIinnovations. (Mayo de 2012). *Inventaire forestier*. Francia.
- García Alonso, M. (2017). Introducción a la tecnología LIDAR. En *Evaluación del uso de la tecnología LIDAR en la estimación del contenido de carbono forestal* (págs. 2-3). Madrid: Universidad de Alcalá.

- García Garrido, S. (2012). Tipos de Biomasa. En *Centrales termoeléctricas de Biomasa* (págs. 17-25). Madrid: Renovetec.
- Goyoso, J., Guerra, J., & Schlegel, B. (Enero de 2000). *Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial*. Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Chile: Universidad Austral de Chile.
- Grijpma, I. (2008). Producción forestal. En *Manuales para la educación agropecuaria* (pág. 108). México: SEP. Trillas.
- Guascal Sanguña , L. (2018). *Análisis de la estimación de biomasa forestal mediante imágenes radar y vehículos aéreos no tripulados - UAV del Parque Metropolitano La Armenia*. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Guerrero, F., & Velastegui, D. (2013). *Uso y procesamiento del sistema escáner láser para el modelamiento 3d de datos geoespaciales en las áreas de la construcción, patrimonio cultural y espeleología*. Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Guinea de Salas , A., & Jorrín, S. (2010). *Las Infraestructuras de Datos Espaciales y los Formatos Emergentes de Datos Geográficos*. IDEE.
- Hernández, J., De los Santos, M., Valdez, J., Tamarit, J., Ángeles, G., Hernández, A., . . . Carrero, O. (2017). *Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de Eucalyptus urophylla S. T. Blake*. *Agrociencia*, 51(1), 921-938.
- Holmgren, J. (2003). *Estimation of Forest Variables using Airborne Laser Scanning*. *Agriculturae Sueciae*, 278-286.

Huerta, E., Mangiaterra, A., & Noguera, G. (2005). *GPS Posicionamiento Satelital*. Rosario: UNR - Universidad Nacional de Rosario.

Indacochea, B., Jiménez, A., & Parrales, J. (2015). *Impactos del manejo de bosques y percepción debienes y servicios ambientales en comunidadesdel cantón Jipijapa, Ecuador*. Sinapsis, 7(1), 301-312.

IPCC. (2007). En *Task Force on National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC.

IUFRO. (1969). *La normalización de los símbolos en Dasometría*.

Jung, S., Kwak, D., Park, T., Lee, W., & Yoo, S. (2011). *Estimating Crown variables of individual tres using airborne and terrestrial laser scanners*. Remote Sensing, 3(1), 2346-2363.

López Noguero, F. (2002). *El análisis de contenido como método de investigación*. Educación, 4(1), 167-179.

López Peña, C. (2008). Dasometría. En *Introducción a la Dasometría*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

López Puga, J. (2013). Análisis estadístico con R . *Dispersión y Forma*. Universidad Católica de Murcia.

López Serrano, A., & García Morote, A. (2009). Dasometría. *Análisis de datos en dasometría*. España: Universidad de Castilla - La Mancha.

- López, J., & Acosta, A. (2014). *Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del diámetro del tocón para Quercus laurina, en Ixtlán, Oxaca, México*. *Madera y Bosques*, 20(1), 59-70.
- MAE. (2017). *MAE fortalece conservación y monitoreo forestal en el país*. Quito, Ecuador: MAE.
- Merlo, A. (2015). En *Levantamiento digital y modelación 3D*. Valencia: Universidad de Valencia.
- Molina Simbaña, P. (2016). *Geografía del carbono en alta resolución en bosque tropical amazónico del Ecuador mediante sensores remotos aerotransportados*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Moskal, L. (2009). *LIDAR Applications in Precision Forestry*. *Proceedings of Silvilaser*, 154-163.
- Mostacedo, B., & Fredericksen, T. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: El país.
- Murcia García, U., Marín Corba, C., Alonso, C., Arguelles Cárdenas, J., Salazar Cardona, C., Gutiérrez Rey, F., . . . Castro Pulido, W. (2007). *Sistema de información ambiental territorial de la amazonía colombiana*. Bogotá: Instituto Sinchi.
- Navarro, j., Fernández, A., Condés, S., & Algeet, N. (2017). *Estimación de biomasa con tecnología LIDAR aerotransportada en las áreas boscosas del Parque Nacional Volcán Poás (Costa Rica)*. *Sociedad española de Ciencias Españolas*, 71-86.
- Navarro Rodríguez, F. (Mayo de 2012). *Espectro electromagnético*. España.

- Nieto, S. (2016). *Variación del vapor de agua en las estaciones BOGA y TUNA a través de observable GPS*. Bogotá: Universidad Distrital San Francisco de Caldas.
- Oliva Contero, J. (2010). *Medidas de forma: Asimetría y Curtosis*. Universidad Central de Venezuela.
- Olivero, F. (2016). *Pruebas de hipótesis*. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Universidad de Guayaquil.
- ONU. (2015). *El Acuerdo de París: El Mundo se une para luchar contra el cambio climático*. Paris: ONU.
- Paipa, N., & Triana, M. (2017). *Estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea de un bosque húmedo tropical en Paimadó, Chocó*. Ingenierías USBMed, 9(1), 18-29.
- Patiño Martínez, P. (2014). *Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual*. Innovaciencia Universidad de Santander, 2(1), 45-52.
- Pita Fernández, S., & Pértega Díaz, S. (2001). *Relación entre variables cuantitativas*. Coruña, España: Fistierra.
- Posada Hernández, G. (2016). *Elementos básicos de estadística descriptiva para el análisis de datos*. Medellín, Colombia: Fundación Universitaria Luis Amigó.
- Quinceno Urbina, N., Tangarife Marín, G., & Álvarez León, R. (2016). *Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco Chiguiro-Chátare de Barrancominas, Departamento del Guainía (Colombia)*. Luna Azul, 43(1), 171-202.

- Ramos Galván, C. (2012). *Prueba de hipótesis*. Coahuila, México: Universidad Tecnológica de Torreón.
- Salas , C., Reyes, M., & Bassaber, E. (2005). *Medición de diámetros fustales con relascopio y forcípula finlandesa: efectos en la estimación de volumen*. *Bosque (Valdivia)*, 26(2), 81-90.
- Schlegel, B. (2001). *Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde*. Chile: Universidad Austral de Chile.
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo . (2013). *Buen vivir: plan nacional 2013-2017: todo el mundo mejor*. Ecuador.
- Suárez, J., & Martín, G. (2010). *Producción de agroenergía a partir de biomasa en sistemas agroforestales integrados: una alternativa para lograr la seguridad alimentaria y la protección ambiental*. *Pastos y Forrajes*, 33(3), 54-60.
- Sulbarán, D. (2009). *Conceptos fundamentales para el análisis estadístico de los datos*. Venezuela: Universidad central de Venezuela.
- Sumida , A., Miyaura , T., & Torii, H. (2013). *Relationships of tree height and diameter at breast height revisited: analyses of stem growth using 20-year data of an even-aged Chamaecyparis obtusa stand*. *Tree Physiology*, 33(1), 106-118.
- Tech Advisor. (Abril de 2018). *The best cheap drones of 2018*. United Kingdom: IDG.
- Uzquiano Pérez, S. (2017). *Mediciones dendrométricas y dasométricas mediante técnicas LIDAR y Fotogramétricas*. Palencia: Universidad de Valladolid.

Vignote, S. (2016). *La biomasa: Importancia, tipos y características y formas de preparación.*

Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.

Wehr, A., & Lohr, U. (1999). *Airborne laser scanning - an introduction and overview.* ISPRS

Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54(1), 68-82.

Williams , M., & Schreuder , H. (2000). *Guidelines for choosing volume equations in the presence*

*of measurement error in height.* Can J For Res, 30(1), 306-310.