



**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 INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO  
AMBIENTE**

**TEMA: ANÁLISIS DE LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA  
FORESTAL MEDIANTE IMÁGENES RADAR Y  
VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS - UAV DEL  
PARQUE METROPOLITANO LA ARMENIA**

**AUTOR: GUASCAL SANGUÑA, ESTHER LILIANA**

**DIRECTOR: ING. KIRBY POWNEY, EDUARDO PATRICIO MG**

**SANGOLQUÍ**

**2018**

**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN****DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN****CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE****CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “*ANÁLISIS DE LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA FORESTAL MEDIANTE IMÁGENES RADAR Y VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS - UAV DEL PARQUE METROPOLITANO LA ARMENIA*” realizado por la señorita *Guascal Sanguña, Esther Liliana* ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido y/o plagio requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto, me permito acreditar y autorizar a la señorita *Esther Liliana Guascal Sanguña* para que lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 25 de Enero del 2018****Ing. Eduardo Patricio Kirby Powney, Mg.**

C. I.: 010261181-1

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD****DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN****CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE****AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, *Guascal Sanguña, Esther Liliana*, con cédula de identidad N° 172455149-2 declaro que este trabajo de titulación, *“Análisis de la estimación de biomasa forestal mediante imágenes Radar y Vehículos Aéreos no Tripulados - UAV del Parque Metropolitano La Armenia”* ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

**Sangolquí, 30 de Enero del 2018****Esther Liliana Guascal Sanguña**

C.C.: 172455149-2

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN POR PARTE DE LA ESPE****DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN****CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE****AUTORIZACIÓN**

Yo, **Guascal Sanguña, Esther Liliana**, con C.I. N° 172455149-2 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en su totalidad en el repositorio Institucional el trabajo de titulación **Tema: “Análisis de la estimación de biomasa forestal mediante imágenes Radar y Vehículos Aéreos no Tripulados - UAV del Parque Metropolitano La Armenia”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 30 de Enero del 2018****Esther Liliana Guascal Sanguña**

C.C.: 1724551492-2

## DEDICATORIA

*Esta tesis se la dedicó primeramente a Dios, por acompañarme en cada momento de mi vida; a quienes me aman incondicionalmente y brindaron todo su esfuerzo para cumplir con mis metas.*

*A mis padres Ramón y María, porque ellos han dado razón a mi vida, por sus consejos, su apoyo y su paciencia, todo lo que hoy soy es gracias a ellos; de igual manera a mis hermanos David, Edison y Dayana.*

***Liliana***

## AGRADECIMIENTO

Agradezco:

A mis padres y hermanos, por la confianza y apoyo incondicional y una persona en especial, Jonathan.

A mis amigos y compañeros, por todos los momentos compartidos durante la carrera; entre alegrías y tristezas.

También, no quiero dejar pasar la oportunidad para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a las personas y organizaciones que han colaborado directa o indirectamente en la realización de este trabajo:

A nuestros queridos docentes: Ing. Santiago Rojas, Ing. Eduardo Kirby, Dr. Marco Luna y Dr. Oswaldo Padilla por sus acertadas orientaciones, seguimiento y asesoramiento en todas las etapas de la investigación.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, que abrió su puerta para formarme como profesional de excelencia.

A la consultora Geokoncept, a través del Ing. Alberto Andrade y Adrián Carrera, por su tiempo y auspiciantes del vuelo con UAV, herramienta clave en este proyecto.

Aquí se termina mi tesis, y con ella una etapa difícil y a la vez apasionante de mi vida, que marca el inicio de otra llena de expectativas y nuevos retos.

*Liliana Guascal*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	ii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN POR PARTE DE LA ESPE.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT .....	i
CAPITULO I.....	1
1.    GENERALIDADES .....	1
1.1.    Introducción.....	1
1.2.    Estudios relacionados.....	3
1.3.    Planteamiento del problema .....	4
1.4.    Justificación e importancia.....	5
1.5.    Área de influencia.....	6
1.6.    Objetivos .....	6
1.6.1.    Objetivo General.....	6
1.6.2.    Objetivos Específicos.....	7
1.7.    Metas.....	7
CAPITULO II.....	8
2.    MARCO TEÓRICO.....	8
2.1.    Teledetección.....	8
2.1.1.    Definición.....	8
2.1.2.    Componentes de un Sistema de Teledetección .....	8
2.1.3.    Espectro Electromagnético.....	9
2.1.4.    Sensores.....	10
2.1.5.    Resolución de un sistema sensor .....	11
2.2.    Radar .....	12
2.2.1.    Definición.....	12

2.2.2.	Fundamentos Básicos.....	13
2.3.	Radar de apertura sintética (SAR) .....	18
2.3.1.	Interacción de las ondas Radar con la superficie terrestre .....	19
2.3.2.	Distorsiones de las imágenes.....	23
2.4.	Plataformas Radar.....	24
2.4.1.	Imágenes Radar del Satélite ALOS – PALSAR.....	25
2.5.	Software para tratamiento de imágenes geospaciales .....	28
2.5.1.	Sentinel Application Platform (SNAP Desktop) .....	28
2.5.2.	ENVI.....	28
2.6.	Tratamiento de imágenes SAR.....	28
2.6.1.	Corrección geométrica y radiométrica.....	29
2.7.	Vehículos aéreos no tripulados (UAV).....	30
2.7.1.	Clasificación de los UAV.....	31
2.7.2.	DJI Matrice 100 .....	32
2.7.3.	Software fotogramétrico para UAV.....	35
2.7.4.	Puntos de control terrestre.....	35
2.7.5.	Plan de Vuelo .....	36
2.8.	Modelos del Digitales y Ortomosaico.....	36
2.8.1.	Modelos Digitales de Terreno (MDT) .....	36
2.8.2.	Modelos Digitales de Superficie (MDS).....	36
2.8.3.	Modelo de Superficie de Cultivo (CSM) .....	36
2.8.4.	Ortomosaico .....	36
2.9.	Biomasa.....	37
2.9.1.	Definición.....	37
2.9.2.	Métodos de estimación de biomasa forestal.....	38
2.10.	Estimación de biomasa por ecuaciones alométricas .....	38
2.10.1.	Ecuación alométrica Potencial .....	39
2.11.	Estimación de biomasa mediante Radar .....	41
2.11.1.	Modelo para estimar biomasa mediante Radar .....	41
2.12.	Estimación de biomasa mediante alta resolución espacial.....	42
2.12.1.	Uso de índices de vegetación .....	42
2.13.	Métodos básicos de muestreo en ecología vegetal .....	43
2.13.1.	Diseño de muestreo.....	43

2.13.2.	Tipos de muestreo de vegetación.....	43
2.13.3.	Tamaño de la muestra .....	45
2.14.	Estadísticos de control de calidad.....	46
2.14.1.	Coefficiente de Correlación lineal de Pearson.....	46
2.14.2.	Coefficiente de Determinación .....	47
CAPITULO III .....		48
3.	METODOLOGÍA.....	48
3.1.	Generalidades .....	48
3.2.	Recopilación y levantamiento de la información geoespacial .....	50
3.2.1.	Recopilación de imagen Radar .....	50
3.2.2.	Captura y proceso de imágenes UAV (Unmanned Aerial Vehicle) .....	53
3.2.3.	Recopilación y almacenamiento de CB y MDT de la zona de estudio.....	58
3.3.	Análisis de las metodologías de estimación de biomasa.....	60
3.3.1.	Estimación de biomasa mediante ecuaciones alométricas .....	60
3.3.2.	Estimación de biomasa mediante imagen Radar .....	67
3.3.3.	Estimación de biomasa mediante imágenes UAV.....	69
3.4.	Control de calidad.....	73
3.4.1.	Análisis de la comparación de las diferentes metodologías.....	74
3.4.2.	Validación de modelos para estimar biomasa .....	77
CAPÍTULO IV .....		80
4.	RESULTADOS .....	80
4.1.	Información geoespacial recopilada y levantada.....	80
4.1.1.	Resultado de la imagen Radar tratada y/o estandarizada.....	80
4.1.2.	Resultado del procesamiento de imágenes con UAV .....	81
4.1.3.	Resultado de la información secundaria recopilada (mapa base y MDT) .....	83
4.2.	Resultados del análisis de estimación de biomasa con alometría.....	84
4.3.	Resultados del análisis de estimación de biomasa con imagen Radar.....	85
4.4.	Resultados del análisis de estimación de biomasa mediante UAV .....	88
4.4.1.	Resultado de la estimación de biomasa por CMS (Crop Model Surface) .....	88
4.4.2.	Resultado de la estimación de biomasa por GNDVI .....	92
4.5.	Resultados estadísticos de la comparación y validación.....	95
4.5.1.	Resultado de la comparación de modelos .....	95
4.5.2.	Resultado del análisis de datos .....	96

4.5.3.	Resultado de la correlación entre modelos.....	103
4.5.4.	Resultado de la validación de los modelos 1, 2 y 3 .....	104
CAPITULO V .....		108
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	108
5.1.	Conclusiones.....	108
5.2.	Recomendaciones .....	110
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		112

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Espectros más empleados en Teledetección.....	9
Tabla 2 Longitudes de Ondas más empleadas en la imagen Radar.....	13
Tabla 3 Combinación de polarización .....	18
Tabla 4 Factores que influyen en la retrodispersión.....	20
Tabla 5 Comparación de Sistema SAR.....	24
Tabla 6 Especificaciones técnicas ALOS .....	26
Tabla 7 Características técnicas PALSAR.....	26
Tabla 8 Productos PALSAR .....	27
Tabla 9 Características técnicas del Matrice 100 .....	33
Tabla 10 Características técnicas de la cámara Zenmuse X3 BGNIR y RGB.....	35
Tabla 11 Resumen de las técnicas para la estimación de biomasa.....	38
Tabla 12 Parámetros de estimación de biomasa.....	40
Tabla 13 Cálculo de la abscisa de la curva normal para un valor (Z) .....	46
Tabla 14 Bondad de ajuste en función del valor $R^2$ .....	47
Tabla 15 Parámetros iniciales y resultantes del plan de vuelo.....	53
Tabla 16 Agrupación de datos obtenida por diferentes metodologías.....	76
Tabla 17 Coordenadas de los GCP postprocesadas con el TBC y sus precisiones ....	81
Tabla 18 Resumen de la estimación de biomasa por ecuaciones alométricas .....	84
Tabla 19 Estimación de biomasa por imagen Radar .....	87
Tabla 20 Resumen de la estimación de biomasa por CMS.....	90
Tabla 21 Resumen de la estimación de biomasa por GNDVI.....	93
Tabla 22 Resultado de Biomasa Aérea Forestal obtenida por diferentes métodos ....	95
Tabla 23 Resultado de Biomasa Aérea Forestal obtenida para la validación .....	104

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Parque Metropolitano La Armenia .....	6
Figura 2 Componentes de un sistema de Teledetección .....	8
Figura 3 Rango del Espectro Electromagnético .....	9
Figura 4 Principio de medición de distancia Radar .....	12
Figura 5 Funciones primordiales para capturar una imagen .....	13
Figura 6 Identificación de objetos independientemente .....	15
Figura 7 Geometría de un sistema Radar .....	15
Figura 8 Formación del ángulo de incidencia .....	16
Figura 9 Amplitud de la onda.....	16
Figura 10 Diferencia de fase entre ondas.....	17
Figura 11 Tipos de polarización.....	17
Figura 12 Radar de apertura sintética SAR.....	18
Figura 13 Comportamiento reflectivo de superficies ideales.....	21
Figura 14 Tipos de reflexión según su relación geométrica .....	22
Figura 15 Reflexión de las microondas según tipo de cubierta.....	22
Figura 16 Diferencia de distorsiones de las imágenes.....	23
Figura 17 Geometría de las distorsiones topográficas .....	29
Figura 18 Clasificación de UAVs por el tipo de Aeronave .....	31
Figura 19 Plataformas UAV- Ala rotatoria.....	32
Figura 20 Matrice 100.....	32
Figura 21 a) Cámara Zenmuse X3 RGB b) Cámara Zenmuse X3 BGNIR.....	34
Figura 22 Muestreo aleatorio simple .....	43
Figura 23 Punto - Centro – Cuadrado.....	44
Figura 24 Metodología general del proyecto .....	49
Figura 25 Imagen Radar Alos Palsar .....	50
Figura 26 Módulo de Range Doppler Terrain Correction.....	51
Figura 27 Imagen Radar corregida geoméricamente y radiométricamente .....	52
Figura 28 Captura y proceso de imágenes obtenidas por UAV .....	53
Figura 29 Plan de vuelo en el software PrecisionFlight .....	54
Figura 30 Distribución de puntos de control fotogramétrico .....	55

Figura 31 Objetos identificables "marca" .....	56
Figura 32 Toma GCP .....	56
Figura 33 Tie points generado por PhotoScan .....	57
Figura 34 Puntos de control (GCP) del proyecto .....	58
Figura 35 Modelo Lógico de la base de datos geográfica.....	59
Figura 36 Metodología para Estimación de la Biomasa Forestal alometria .....	60
Figura 37 Mallado de 100x100 m. (1ha).....	61
Figura 38 Cobertura forestal al 20%.....	62
Figura 39 Selección de parcelas para muestreo.....	63
Figura 40 Metodología punto - centro – cuadrado .....	64
Figura 41 Medición del DAP .....	65
Figura 42 Cálculo de biomasa individual de la parcela 1 .....	66
Figura43 Metodología para Estimación de la Biomasa Forestal mediante Radar .....	67
Figura 44 Nivel Digital del pixel.....	68
Figura45 Metodología para Estimación de la Biomasa Forestal mediante CMS.....	69
Figura 46 Obtención del CMS (Modelo de superficie de cultivo) .....	70
Figura47 Metodología para estimación de la Biomasa Forestal mediante GNDVI...71	
Figura 48 Generación del GNDVI.....	72
Figura 49 Modelo GNDVI del PresicionMapper .....	72
Figura 50 Metodología de la Fase 3 del proyecto .....	73
Figura 51 Proceso para la obtención de AGB acumulada .....	74
Figura 52 Parámetros estadísticos utilizados .....	75
Figura 53 Modulo Coeficiente de correlación.....	77
Figura 54 Subparcelas de validación de modelos.....	78
Figura 55 Agrupación de datos.....	79
Figura 56 Herramienta de correlación $R^2$ .....	79
Figura 57 Imagen Radar estandarizada.....	80
Figura 58 Imágenes UAV guardadas en la Geodatabase.....	81
Figura 59 Ortomosaico RGB.....	82
Figura 60 Ortomosaico BGNIR.....	82
Figura 61 MDS de la zona de estudio.....	83
Figura 62 MDT de la zona de estudio.....	84

Figura 63 Estimación de parámetros .....	85
Figura 64 Análisis ANOVA.....	86
Figura 65 Estimación de AGB mediante Radar .....	87
Figura 66 Coeficientes de la Regresión logarítmica.....	89
Figura 67 Modelo de regresión logarítmica .....	89
Figura 68 Estimación de AGB mediante CMS .....	91
Figura 69 Coeficientes de la Regresión Cuadrática.....	92
Figura 70 Modelo de regresión cuadrática.....	93
Figura 71 Estimación de AGB mediante GNDVI.....	94
Figura 72 Resumen estadístico (Alometría).....	96
Figura 73 Histograma de datos (Alometría).....	97
Figura 74 Diagrama de caja de datos (Alometría).....	97
Figura 75 Resumen estadístico (Modelo 1) .....	98
Figura 76 Histograma de datos (Modelo 1) .....	99
Figura 77 Diagrama de caja de datos (Modelo 1) .....	99
Figura 78 Resumen estadístico (Modelo 2) .....	100
Figura 79 Histograma de datos (Modelo 2) .....	100
Figura 80 Diagrama de caja de datos (Modelo 2) .....	101
Figura 81 Resumen estadístico (Modelo 3) .....	101
Figura 82 Histograma de datos (Modelo 3) .....	102
Figura 83 Diagrama de caja de datos (Modelo 3) .....	102
Figura 84 Resultados de las correlaciones .....	103
Figura 85 Estadísticos descriptivos .....	105
Figura 86 Resumen del modelo ajustado .....	106
Figura 87 Ajuste de validación de los modelos:Modelo 1; Modelo 2;Modelo 3.....	106

## RESUMEN

El objetivo del estudio, fue analizar dos metodologías en la estimación de biomasa: mediante el uso de imagen Radar y UAV. El área de estudio fue el Parque Metropolitano “La Armenia”, en el cual se establecieron 13 parcelas (1ha), se estimó la biomasa forestal aérea y por ende su fijación de carbono aéreo. Se aplicó la metodología modificada de Saatchi et al. (2007), desarrollando los algoritmos semi-empíricos propuestos para la estimación de biomasa, con el fin de correlacionar los datos de campo con los niveles digitales de la imagen Radar; alcanzándose un coeficiente de correlación de 0.74, proporcionando así una clara relación entre datos de campo y los coeficientes de retrodispersión; mientras que en la metodología usada para UAV: en la estimación de biomasa aérea forestal mediante CMS (modelo 2 ) se ajustó a una regresión logarítmica con un coeficiente de determinación  $r^2 = 0,67$ ; en cambio en la obtención del modelo 3 por GNDVI se ajustó a una regresión cuadrática, con un coeficiente de determinación  $r^2 = 0,57$  y se asemeja al estudio realizado por Moges, et al.,(2004). El ajuste de los tres modelos se define como una bondad de ajuste positiva; concluyendo que el modelo 1 es mejor; sin embargo, es necesario indicar que el modelo 1 no se ajusta a la realidad, ya que existe una gran diferencia entre las fechas de toma de la imagen Radar versus los datos adquiridos en campo. Por lo tanto el modelo 2 representa mejor la realidad, ya que puede caracterizar de mejor manera cambios abruptos de la variable altura del árbol, debido a factores antrópicos y/o naturales, como tala, quema, caída de un rayo en el árbol, etc., que el modelo 3 no puede realizar. La estimación de biomasa y fijación de carbono en base a observaciones directa del territorio a través de técnicas de teledetección, pueden aportar información más fiable para la toma de decisiones en el desarrollo de las políticas relacionadas con el manejo forestal sostenible de nuestro país.

### PALABRAS CLAVE:

- BIOMASA
- RADAR
- RETRODISPERSION
- CMS
- GNDVI

## ABSTRACT

The objective of the study was to analyze two methodologies in the estimation of biomass: through the use of Radar image and UAV. The study area was the Metropolitan Park "La Armenia", in which 13 plots were established (1ha), the aerial forest biomass was estimated and therefore its fixation of aerial carbon. The modified methodology of Saatchi et al. (2007), developing the semi-empirical algorithms proposed for the estimation of biomass, in order to correlate the field data with the digital levels of the Radar image; reaching a correlation coefficient of 0.74, thus providing a clear relationship between field data and the backscattering / backscattering coefficients; while in the methodology used for UAV: in the estimation of forest aerial biomass by means of CMS (model 2) it was adjusted to a logarithmic regression with a coefficient of determination  $r^2 = 0.67$ ; On the other hand, in the obtaining of model 3 by GNDVI, it was adjusted to a quadratic regression, with a coefficient of determination  $r^2 = 0.57$  and it is similar to the study carried out by Moges, et al., (2004). The adjustment of the three models is defined as a goodness of positive adjustment; concluding that model 1 is better; however, it is necessary to indicate that model 1 does not conform to reality, since there is a great difference between the dates of taking the Radar image versus the data acquired in the field. Therefore model 2 represents reality better, since it can better characterize abrupt changes of the tree's height variable, due to anthropic and / or natural factors, such as felling, burning, lightning falling on the tree, etc. ., that model 3 can't perform. The estimation of biomass and carbon fixation based on direct observations of the territory through remote sensing techniques, can provide more reliable information for decision making in the development of policies related to sustainable forest management in our country.

### KEY WORDS:

- **BIOMASS**
- **RADAR**
- **BACKSCATTERING**
- **CMS**
- **GNDVI**

## CAPITULO I

### 1. GENERALIDADES

#### 1.1. Introducción

El calentamiento global es uno de los principales problemas ambientales que afecta al planeta, debido a que este puede ocasionar cambios en el comportamiento climático global, generando pérdida de biodiversidad, sequías, eventos de lluvias torrenciales, desertificación entre otros. Se ha evidenciado que el incremento en las temperaturas globales podría estar ligado al aumento de las concentraciones de gases del efecto invernadero en especial el CO<sub>2</sub>, ya que, a medida que se incrementan sus concentraciones en la atmosfera se han registrado mayores temperaturas medias y máximas (Gutiérrez, 2010).

Como consecuencia, han surgido estrategias para reducir las concentraciones de gases, algunas de estas consisten en conservar y aumentar las masas boscosas, no solo por su capacidad de fijar CO<sub>2</sub> naturalmente en forma de biomasa sino por las funciones ecosistémicas que estos cumplen (Martinez & Fernandez, 2004).

Por esta razón, conocer la distribución y almacenaje de biomasa contribuye a mitigar problemáticas de interés global como son el cambio climático y la desertificación. Durante las últimas décadas, la estimación de carbono almacenado en la biomasa ha despertado gran interés a partir de los compromisos internacionales como la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y el Protocolo de Kyoto (Lucas, et al., 2010). Si bien existen numerosos métodos para estimar biomasa, estos varían en la precisión de la estimación y en los costos para llevarlos a cabo.

Actualmente, existen diversos métodos para la estimación de la biomasa. Los métodos de campo tradicionales proporcionan medios consistentes para evaluar la biomasa, pero por lo general a un alto costo, consume mucho tiempo y presenta un carácter local que es impreciso llevarlo a otras escalas, ya que a menudo implica un

muestreo destructivo en una cobertura geográfica limitada (Popescu, 2007). Dada estas limitaciones en la estimación de biomasa de forma tradicional, los sensores remotos han sido ampliamente usados con este objetivo en las últimas décadas.

Dentro de estas herramientas, en los últimos años se ha estudiado la potencialidad de las imágenes de radar de apertura sintética (SAR) para este fin (Nguyen, 2010), a partir de la intensidad del coeficiente de retrodispersión del SAR de las distintas longitudes de onda, polarizaciones y su relación con la biomasa. Estudios indican que a las longitudes de onda mayores (banda L y P) son las que presentan mayor sensibilidad a la biomasa (Ghasemi, et al., 2011), esta característica hace que las imágenes de Radar sean muy interesantes para estudiar propiedades intrínsecas de la estructura vertical del bosque. Según Areu & Martínez (1997), Otra característica positiva del Radar es su relativa independencia de la situación meteorológica y, que, al ser un sistema activo que emite su propia señal, aporta un conjunto de datos más controlado.

Por otro lado, el interés reciente de utilizar vehículos aéreos no tripulados, Drones o UAV, por su sigla en inglés (Unmanned Aerial Vehicle), en el estudio de forestal se debe a gran medida a los grandes beneficios que se obtienen mediante la implementación de ellos; bajos precios y una logística fácil comparados con productos satelitales, una alta resolución espacial y temporal como la posibilidad de tener información espectral en diferentes regiones (visible e Infrarrojo) hacen de ellos una gran herramienta para realizar monitoreo y seguimiento. Además los productos resultantes son un insumo de primera mano para los estudios aplicados en agricultura de precisión (AP) o en Sistemas de Información Geográfica (SIG) (García & Herrera, 2015).

Los métodos basados en sensores remotos aerotransportados con vehículos aéreos no tripulados, pueden ser utilizados para generar la información necesaria y estimar la biomasa en un amplio rango de escalas. Estas estimaciones se pueden lograr con los índices de vegetación y modelos de superficies de cultivos (CMS) (Bending, et

al., 2014). Estas herramientas son una fuente de información importante para el conocimiento, gestión y monitoreo del territorio, teniendo como objetivo la toma de decisiones en el desarrollo de las políticas relacionadas con el manejo forestal sostenible de un país.

## 1.2. Estudios relacionados

Varios autores han desarrollado investigaciones relacionadas a la estimación de biomasa, utilizando técnicas de teledetección (Radar y UAV) aplicadas al área forestal; la mayoría de ellos se han elaborado en otros países como tesis de maestría y doctoral, estos se exponen a continuación:

Drake, et al., (2003) en su proyecto de investigación titulado “*Above-ground biomass estimation in closed canopy neotropical forests using lidar remote sensing: factors affecting the generality of relationships*” menciona que: la biomasa es la cantidad total de material vegetativo presente en un área específica.

De igual manera Sola, et al., (2012), en su proyecto de investigación titulado “Resumen del manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción” menciona que: existen diversos métodos para estimar biomasa forestal, estos pueden ser clasificados como destructivos o directos (cortar, secar y pesar el árbol) y no destructivos o indirectos (ecuaciones alométricas). En cambio Hamdan, et al.,(2014), en su proyecto de investigación titulado “*L-Band ALOS PALSAR for biomass estimation of Matang Mangroves*” dice que las ecuaciones alométricas suelen incluir tres variables: diámetro a la altura del pecho o DAP, altura del árbol y densidad de la madera; a través de las cuales podemos obtener la biomasa forestal estimada en campo.

En los últimos años, Koch (2013) en su proyecto de investigación titulado “*Remote Sensing supporting national forest inventories NFA*” indica que; la biomasa aérea estimada mediante la combinación de datos de campo y sensores remotos, ha ido ganando terreno, debido a que reduce costos, además de obtener información en zonas

de difícil acceso. Pero, a pesar de la gran información espacial existente y accesible, el tema de estimación de biomasa forestal mediante sensores remotos sigue siendo un desafío, sobre todo en ecosistemas tan complejos, como pueden ser en zonas de permanente cobertura nubosa.

### **1.3.Planteamiento del problema**

Hoy en día, la posibilidad de estimar la cantidad de biomasa forestal, en zonas dominadas por especies forestales, resulta fundamental por su valor energético y su relación directa con el carbono (Barrio, et al., 2006). Con el avance de la tecnología geoespacial, la biomasa forestal ha sido estimada mediante la combinación de datos de campo y sensores remotos, debido que reduce costos, además de obtener información en zonas de difícil acceso.

Pero a pesar de la gran cantidad de información espacial accesible, el tema de la estimación de la biomasa mediante la teledetección, especialmente por imágenes Radar y UAV, sigue siendo un tema desconocido en el Ecuador; no obstante, la geografía del país, presenta muchas regiones tropicales y bosques nublados, donde la adquisición de la información, mediante sensores pasivos, son por decir, inaplicables, provocando un alto costo en trabajos de campo, causando así, una mala gestión integral de los bosques y espacios verdes.

Por tal razón, el desarrollo de esta investigación sirve de orientación al momento de adaptar nuevas metodologías de estimaciones de biomasa forestal en nuestro país; el cual, en los últimos años ha vivido un cambio radical en políticas ambientales y gestión sostenible, es así, como este proyecto da inicio con el objetivo de implementar e investigar metodologías de estimación de biomasa a través del uso de imágenes Radar y UAV, para lograr una gestión sostenible de los recursos de los bosques y espacios verdes, reduciendo costo y tiempo, para la toma de decisiones en el desarrollo de las políticas relacionadas con el manejo forestal sostenible.

#### **1.4. Justificación e importancia**

En el Plan Nacional del “Buen Vivir” establece dentro del objetivo 7 lo relevante de conservar el patrimonio natural para el Buen Vivir de la población (SENPLADES, 2013); en la declaración de Durban (Congreso Forestal Mundial, 2015), estableció una visión de la contribución de los bosques al logro de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, haciendo hincapié en el siguiente aspecto:

Los bosques gestionados de forma sostenible incrementan la resiliencia de los ecosistemas y de las sociedades y permiten aprovechar de manera óptima la función de los bosques y los árboles como sumideros y almacenes de carbono al mismo tiempo que proporcionan otros servicios ambientales (Congreso Forestal Mundial, 2015).

Los parques metropolitanos sirven como áreas de recreación, mitigación al cambio climático y reducción de la contaminación, siendo este último servicio crucial para la ciudad (EPMOP, 2012). Estos espacios verdes se les consideran como descontaminantes naturales de las ciudades principalmente porque ayudan a purificar el aire y proveen de oxígeno a las urbes (Sorensen, et al., 1998). Por otro lado, la posibilidad de estimar la cantidad de biomasa forestal, en zonas dominadas por especies forestales, resulta fundamental por su valor energético y su relación directa con el carbono (Barrio, et al., 2006)

Pero a pesar de la gran cantidad de información espacial accesible, el tema de la estimación de la biomasa mediante la teledetección, especialmente por imágenes Radar y UAV, sigue siendo un tema desconocido en el Ecuador; no obstante, la geografía del país, presenta muchas regiones tropicales y bosques nublados, donde la adquisición de la información, mediante sensores pasivos, son por decir, inaplicables, provocando un alto costo en trabajos de campo, causando así, una mala gestión integral de los bosques y espacios verdes. Es así, como este proyecto da inicio con el objetivo de implementar e investigar metodologías de estimación de biomasa a través del uso de imágenes Radar y UAV, para lograr una gestión sostenible de los recursos forestales.

## 1.5. Área de influencia

El área de influencia comprende 48 ha., el mismo que abarcan el Parque Metropolitano “La Armenia”, ubicado en el sector La Armenia del Valle de “Los Chillos”, en la provincia de Pichincha, a 25 km Sur-Oeste de la ciudad de Quito (ver Figura 1).



*Figura 1 Parque Metropolitano La Armenia*

Fuente: (Google Earth Pro, 2012)

## 1.6. Objetivos

### 1.6.1. Objetivo General

Analizar dos técnicas de teledetección con imágenes radar y vehículos aéreos no tripulados – UAV en la estimación de biomasa forestal del Parque Metropolitano La Armenia.

### **1.6.2. Objetivos Específicos**

1. Recopilar y levantar la información geoespacial que forme parte de la zona de estudio.
2. Analizar dos metodologías de estimación de biomasa mediante el uso de imagen radar y vehículos aéreos no tripulados – UAV.
3. Comparar y validar la estimación de biomasa forestal obtenidos mediante imágenes radar y vehículos aéreos no tripulados – UAV con datos provenientes de ecuaciones alométricas (parámetros en campo).

### **1.7. Metas**

- Una base de datos geográfica en relación a toda la información recopilada.
- 1 Imagen Radar procesada/estandarizada.
- 1 Ortofoto y 1 MDS generado por UAV de la zona de estudio.
- 1 registro de trabajo de campo de la estimación de biomasa forestal.
- 2 Mapas temáticos de la estimación de la biomasa forestal: imágenes radar y UAV.
- 1 tabla de resultados de la comparación de las técnicas aplicadas en este estudio.
- 1 artículo estructurado científicamente para ser publicado en al menos una revista indexada.

## CAPITULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

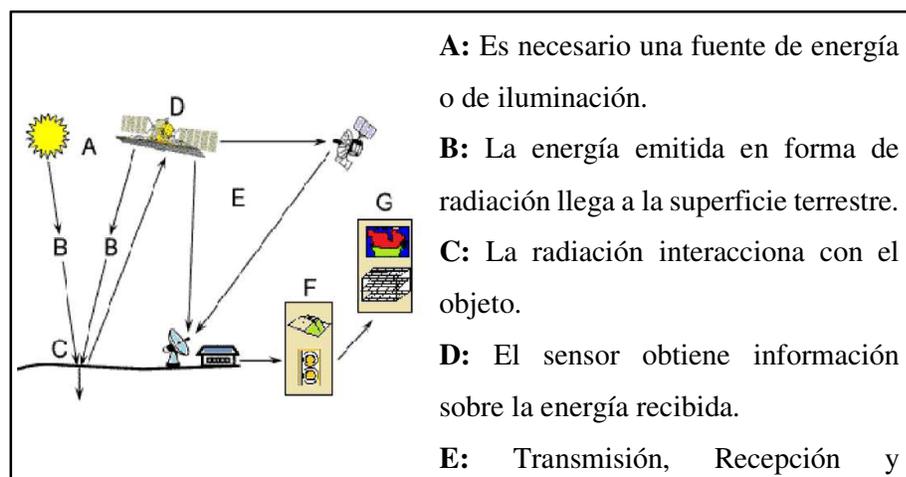
#### 2.1. Teledetección

##### 2.1.1. Definición

Es la ciencia y arte de obtener información con respecto de un objeto, área fenómeno por el análisis de datos adquiridos por un sistema que no se encuentra en contacto con el objeto, área o fenómeno de la investigación (Lillesand, et al., 2004). De acuerdo con Chuvieco, (2007), la palabra “Teledetección” es una traducción latina del término inglés Remote Sensing, ideado a principios de los sesenta para designar cualquier medio de observación de un objeto o fenómeno sin establecer un contacto físico con el mismo.

##### 2.1.2. Componentes de un Sistema de Teledetección

Existe una fuente emisora de luz, que por lo general es el sol, que emite energía como radiación electromagnética, que interactúa con la superficie terrestre en forma de refracción, emisión o reflexión emisión y esta energía es captada por satélites que convierten en datos y éstos son transmitidos a la tierra, ver Figura 2 (Chuvieco, 2007).

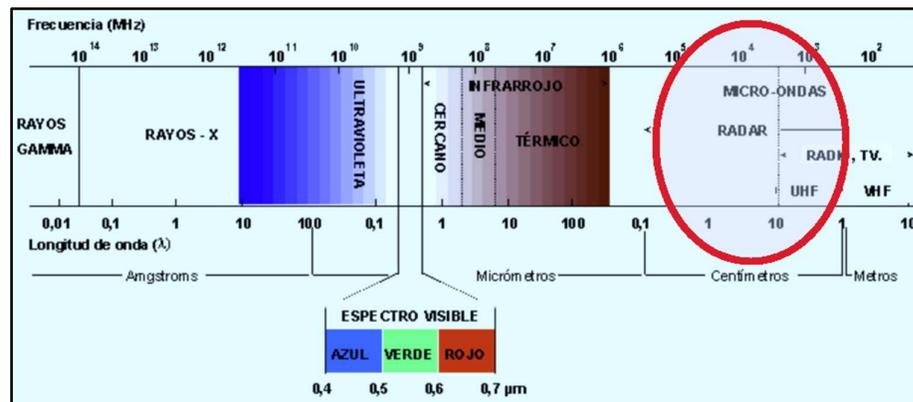


*Figura 2 Componentes de un sistema de Teledetección*

Fuente: (C.C.R.S, 2011)

### 2.1.3. Espectro Electromagnético

Según Chuvieco, (2007), de acuerdo con la teoría ondulatoria, menciona que: “la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de los campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético”. Por sus características, el espectro electromagnético puede definir cualquier tipo de energía según su longitud de onda y frecuencia, comprende desde muy pequeñas como: rayos gama, x, pasando por el espectro visible e infrarrojo hasta las muy grandes (kilométricas), de frecuencia muy alta como enlaces de radio de gran distancia, con variados esquemas de aplicaciones y utilidades, como se puede ver en la Figura 3.



**Figura 3 Rango del Espectro Electromagnético**

Fuente: (C.C.R.S, 2011).

En la Tabla 1, se describen los principales espectros que son empleadas en sistemas y plataformas de teledetección:

**Tabla 1**

#### *Espectros más empelados en Teledetección*

Región o Banda Espectral		Aplicación	Longitud de Onda (λ)
Visible	Azul	- Es la única radiación que puede captar el ojo humano.	0.4 - 0.5 μm
	Verde	- En combinación de los tres rangos del espectro visible se puede discriminar principalmente:	0.5 - 0.6 μm


➔ Continua

	Rojo	suelo, agua, vegetación, nieve.	0.6 - 0.7 $\mu\text{m}$
<b>Infrarrojo Cercano</b>		Puede detectarse mediante películas o sensores especiales y ayuda a discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.	0.7 - 1.3 $\mu\text{m}$
<b>Infrarrojo medio</b>		En este espectro se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.	1.3 - 8 $\mu\text{m}$
	Infrarrojo de Onda Corta (SWIR)	Discrimina de manera efectiva humedad en la vegetación y en los suelos.	1.3 - 2.5 $\mu\text{m}$
	Infrarrojo Medio (IRM)	Discrimina focos de alta temperatura como quemas y volcanes activos.	Alrededor de 3.7 $\mu\text{m}$
<b>Infrarrojo Lejano o Térmico</b>		Incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.	8 a 14 $\mu\text{m}$
<b>Microondas</b>		Con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa. (Radar)	Por encima de 1 mm a 1m

Fuente: Modificado de (Chuvioco, 1996)

#### 2.1.4. Sensores

Según Cortéz (2010), los sensores remotos pueden ser clasificados de acuerdo a diferentes criterios, entre ellos:

- Banda del espectro electromagnético utilizada
- Fuente emisora de energía
- Ubicación espacial de la fuente emisora y receptora de energía
- Información registrada
- Mecanismos utilizados para captar la información

Haciendo referencia al tema de estudio, se clasificará en función de la ubicación espacial de la fuente emisora y de la fuente receptora de energía, de la siguiente manera:

- **Sensor mono-estático**

Es aquel sensor que posee tanto la fuente de emisión de energía como la fuente de recepción de energía. Es decir ambas fuentes, de emisión y recepción de energía, ocupan la misma posición espacial. Ej. Sistema de radar.

- **Sensor bi-estático**

Es aquel sensor que posee solamente la fuente de recepción de energía. La fuente de emisión de energía (el sol) tiene una posición espacial diferente. Es decir ambas fuentes, de emisión y de recepción de energía, tienen posiciones diferentes. Ej. Cámara fotográfica.

### 2.1.5. Resolución de un sistema sensor

Se define como la habilidad para discriminar información de detalle. El concepto de resolución implica diversas manifestaciones, las más importantes se detallan a continuación:

- **Resolución espacial**

Es la identificación por dimensión del objeto más pequeño que es posible distinguir en una imagen. Viene definida por la mínima unidad espacial para la que el sensor registra los datos, es decir lo que se denomina "píxel" (Chuvieco, 2007).

- **Resolución espectral**

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor (Chuvieco, 2007).

- **Resolución radiométrica**

Esta mide el grado de susceptibilidad del sensor, es decir su capacidad para detectar las variaciones en la intensidad de la energía que llega hasta él, la misma se expresa en bits ("bit" es el acrónimo de dígito binario, que se expresa en valores de 0 y 1).

- **Resolución angular**

Es la capacidad de un sistema de observar el mismo objeto desde distintos ángulos (Chuvieco, 2007).

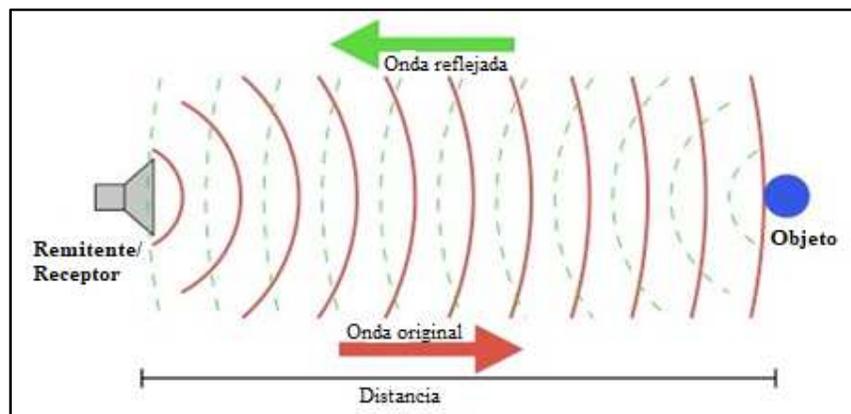
- **Resolución temporal**

También conocido como frecuencia de cobertura o periodo de revisita, es el espacio de tiempo o recurrencia de tiempo para capturar imágenes de una zona en concreto de la superficie terrestre (Chuvieco, 2007).

## 2.2. Radar

### 2.2.1. Definición

El Radar es un término que se deriva del acrónimo inglés (Radio Detection and Ranging), es un sistema que usa ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos móviles o estáticos, basando su funcionamiento en la emisión de un pulso de onda de radio, que se refleja en el objeto y se recibe en el transmisor, a partir del eco obtenido se puede extraer una gran cantidad de información (ver Figura 4) (Skolnik & McGraw, 1980).



**Figura 4 Principio de medición de distancia Radar.**

Fuente: (Wiora, 2005).

## 2.2.2. Fundamentos Básicos

- **Características de las ondas**

El Radar captura información en el espectro electromagnético, donde se presentan las microondas, que abarcan un rango de longitudes de onda entre 1 mm y 1 m. En la Tabla 2 se observa las longitudes de ondas más empleadas.

**Tabla 2**

*Longitudes de Ondas más empleadas en la imagen Radar*

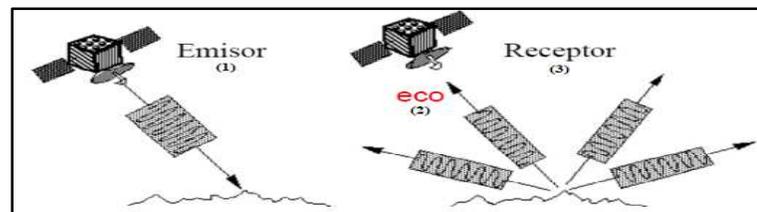
Banda	Longitud de Onda (cm)	Frecuencia (GHz)	Utilización en Radar	Ventaja
Banda P	30 - 100	0,3 - 1	Exploración de muy largo alcance	Longitudes de onda más largas, permiten la penetración en nieve, en coberturas vegetales; en determinadas condiciones, la penetración en la arena y en el suelo.
Banda L	15 - 30	1 - 2	Exploración de largo alcance	
Banda C	3.75 - 7.5	4 - 8	Seguimiento de corto alcance	La radiación en estas bandas tienden a reflejarse más en los doseles de la vegetación, en la acumulación de nieve, y en coberturas de suelo, permitiendo la caracterización de estos tipos de superficies
Banda X	2.4 - 3.75	8 - 12,5	Seguimiento de muy corto alcance	

Fuente: modificado de (IGN, 2015)

La capacidad de penetrar a través de las nubes o a través de la capa superior de la corteza terrestre aumenta con la longitud de onda.

- **Proceso de captura de las imágenes Radar**

En la Figura 5 se describe el proceso de captura de un sistema Radar, es decir que dispone de su propia fuente de luz; realizando tres funciones primordiales para capturar una imagen:



**Figura 5 Funciones primordiales para capturar una imagen**

Fuente: (IGN, 2015)

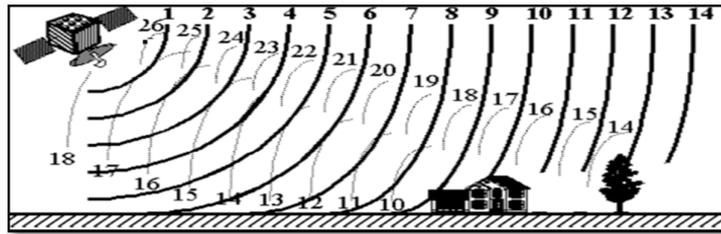
- 1) **Transmitir** señales de microondas hacia la Tierra: el sensor Radar emite su propio flujo de energía en sensor activo. Esta emisión se hace mediante pulsos muy controlados en cuanto a: longitud de onda-frecuencia, amplitud de la onda (energía), polarización y fase.
- 2) El sensor recoge la parte del pulso que ha sido reflejada en su dirección, denominada “**eco**”. El sensor mide con exactitud la cantidad de energía recibida, la polarización y la fase, y además mide el tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y el eco recibido. Con estos datos se formarán las imágenes Radar.
- 3) **Recibir o Receptar** la porción de la energía transmitida, que se refleja hacia el sensor desde la superficie iluminada.

- **Geometría de la imagen y conceptos básicos**

En cuanto a la geometría, los sistemas Radar se caracterizan porque capturan las imágenes lateralmente, puesto que se consideran dos direcciones (ver Figura 6): la dirección paralela a la trayectoria del satélite y la dirección perpendicular a su trayectoria que darán lugar a dos resoluciones distintas; por tanto la resolución del sensor tiene dos dimensiones:

- **Resolución en Azimut:**

En un Radar convencional, la resolución en la dirección de azimut se determina por el ancho angular del haz. Para que dos objetos puedan ser identificados independientemente, deben estar separados en la dirección del azimut por una distancia mayor al ancho del haz en el terreno. La anchura del haz es inversamente proporcional a la longitud de la antena (también denominada apertura) del instrumento radar, de modo que una mayor antena o apertura producirá un haz más estrecho y una mayor resolución.

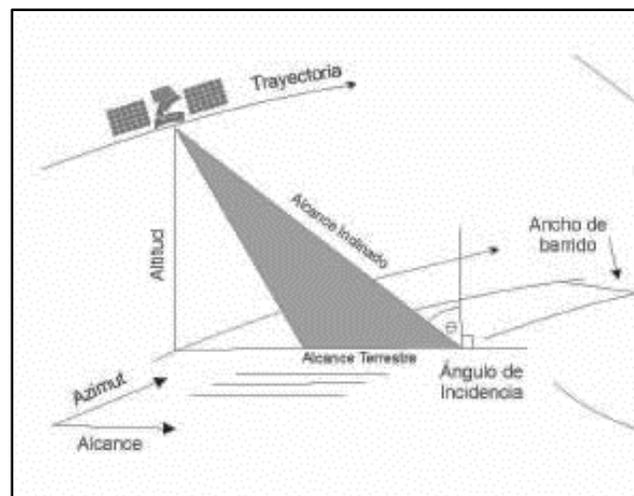


**Figura 6** Identificación de objetos independientemente

Fuente: modificado de (IGN, 2015)

- **Resolución en Alcance:**

La resolución en la dirección del alcance se determina por las características del Radar y depende de la longitud de onda del pulso transmitido; un pulso corto proporciona mejor resolución. La señal del radar se graba en el dominio del alcance. Esta señal, ya en forma digital, se proyecta al plano del terreno al procesar la imagen (ver Figura 7).



**Figura 7** Geometría de un sistema Radar

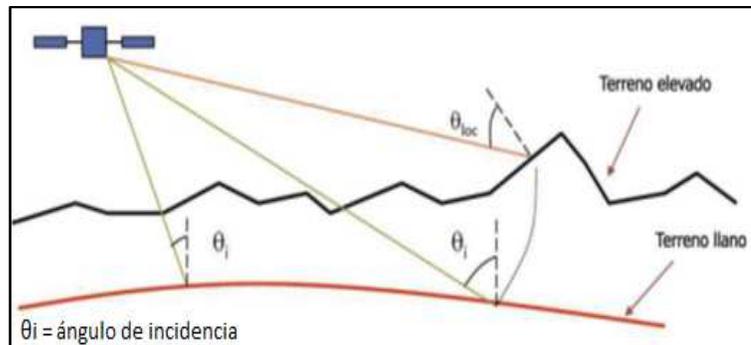
Fuente: (IGN, 2015)

También es importante definir conceptos básicos en la geometría Radar, como son:

- **Ángulo de incidencia**

Es el ángulo formado entre el vector de iluminación del Radar y la normal a la superficie de la Tierra en cada punto concreto del terreno. La superficie en cada punto

depende de la orientación y de la pendiente del terreno en ese punto y por tanto, el ángulo de incidencia es distinto en superficies llanas que elevadas. El ángulo de incidencia cambia a lo largo de la dirección de alcance, por tanto, la geometría de visualización en una misma imagen, es distinta en esta dirección (ver Figura 8) (IGN, 2015).



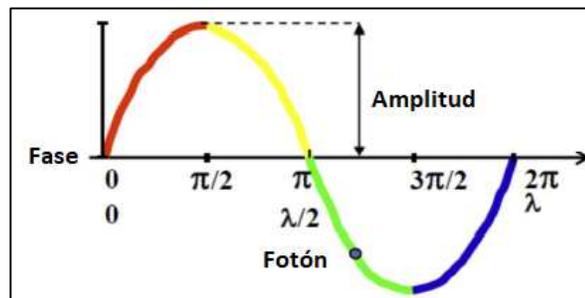
**Figura 8 Formación del ángulo de incidencia**

Fuente: (IGN, 2015)

En cuanto a las características de las ondas Radar, además de la longitud de onda y frecuencia, hay que conocer otros conceptos:

- **Amplitud de la onda**

Determina la capacidad o contenido de energía de la onda. Inversamente relacionado con la longitud de onda (a mayor longitud de onda, el contenido energético es menor).

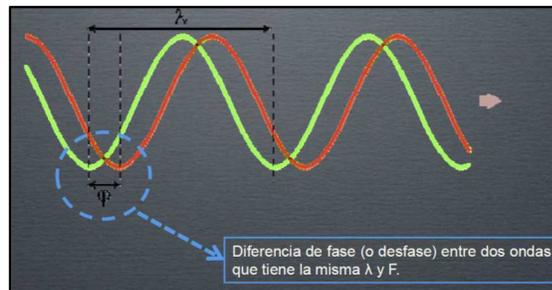


**Figura 9 Amplitud de la onda**

Fuente: (IGN, 2015)

### - Fase de la onda

Fracción del periodo transcurrido desde el instante correspondiente al estado tomado como referencia. En teledetección Radar la fase se utiliza para comparar dos ondas (es decir, para calcular el desfase)

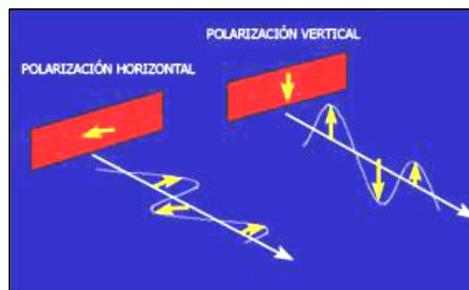


**Figura 10 Diferencia de fase entre ondas**

Fuente: (IGN, 2015)

### - Polarización

Los sistemas Radar según Lira (2010), transmiten comúnmente ondas planas polarizadas ya sea, horizontal o verticalmente; estas ondas corresponden a la orientación del vector eléctrico de la onda electromagnética. Las antenas Radar envían y reciben energía polarizada. Esto significa, que el pulso de energía es filtrado de modo que la onda eléctrica vibre en un único plano perpendicular a la dirección de propagación (ver Figura 11).



**Figura 11 Tipos de polarización.**

Fuente: (EORC, 2010)

Cuando la energía transmitida es polarizada en la misma dirección que la recibida, al sistema se le conoce como de polarización similar, en cambio si la energía

transmitida se polariza en una dirección ortogonal a la recibida, al sistema se le conoce como de polarización cruzada. En la Tabla 2.3 se observan las distintas combinaciones de polarización.

**Tabla 3**

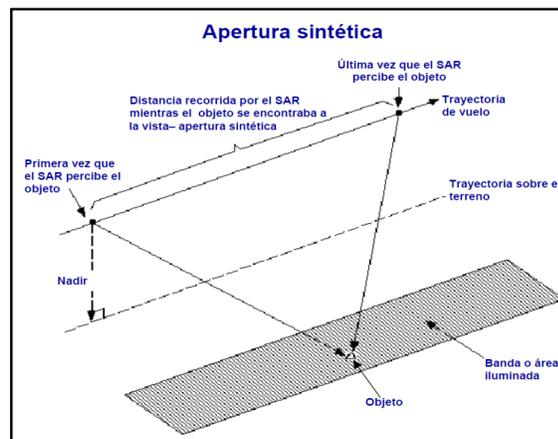
***Combinación de polarización***

Combinaciones	Nombre	Ventaja
HH	Transmisión horizontal / recepción horizontal	Tienden a detectar la difusión de los objetos orientados en la misma dirección que la onda incidente y sus retornos de retrodispersión son más fuertes.
VV	Transmisión vertical / recepción vertical	
HV	Transmisión horizontal / recepción vertical	Sirven para detectar la respuesta de retorno a partir de dispersiones múltiples, tales como, la difusión en el dosel de bosques, o la de rebote múltiple (v.g. suelo-árbol la que determina la respuesta de retorno del tronco)
VH	Transmisión vertical / recepción horizontal	

Fuente: modificado de (Birk, et al., 1995)

**2.3. Radar de apertura sintética (SAR)**

El Radar de apertura sintética SAR, es un radar activo que emite la energía en el intervalo de frecuencias de microondas (unos centímetros), en un período pequeño de tiempo y recibe los ecos provenientes de reflexiones de la señal en los objetos dando lugar a una apertura sintética; es decir, debido a la gran velocidad de desplazamiento del vehículo espacial (7,5 Km/s aproximadamente), la antena del dispositivo SAR se convierte en una antena virtual de mayor tamaño (ver Figura 12).



**Figura 12 Radar de apertura sintética SAR**

Fuente: (IGN, 2015)

Los Sistemas SAR pueden ser aerotransportados o satelitales, con cobertura regional y mundial, con una periodicidad que se puede ajustar a las necesidades. Son sistemas coherentes que conservan tanto la fase y la magnitud de cada señal de retorno; algunos parámetros de funcionamiento del sistema, tales como; la incidencia y el ángulo de aspecto, la frecuencia con la que opera el sistema, y las polarizaciones del mismo, afectan a la amplitud del eco, así como las características de retrodispersión del objetivo (Birk, et al., 1995).

### 2.3.1. Interacción de las ondas Radar con la superficie terrestre

- **Coefficiente de retrodispersión ( $\sigma^0$ /Sigma0)**

Como ya se ha mencionado antes, los sensores Radar emiten un pulso de radiación electromagnética y miden el pulso o eco de retorno que recibe la antena. La relación entre la potencia del pulso de retorno y la del pulso emitido inicialmente (sección transversal de Radar) describe la interacción entre la radiación y el objeto iluminado (Alvarez, 2005); por lo tanto, el coeficiente de retrodispersión es el reflejo de la onda enviada por el Radar que contiene la información sobre la superficie en la que rebota. En tal virtud, se puede definir también como la respuesta de todas las cubiertas presentes en una imagen.

Sin embargo, en teledetección se utiliza el concepto de coeficiente de retrodispersión ( $\sigma^0$ ), que corresponde a la  $\sigma$  por unidad de área del terreno y representa el comportamiento dispersivo de los elementos presentes dentro de un pixel. El valor de  $\sigma^0$  depende de las propiedades físicas y del material iluminado; así como, de la longitud de onda, la polarización y el ángulo de incidencia (Henderson & Lewis, 1998). Es una magnitud adimensional ( $m^2/m^2$ ), pero debido a que puede variar diversos órdenes de magnitud, se suele expresar de forma logarítmica en decibelios (dB).

Su expresión en la forma adimensional se suele referir a menudo como en unidades lineales (ver Ecuación 1) (Alvarez, 2005).

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A} \left( \frac{m^2}{m^2} \right) \rightarrow \sigma_{dB}^0 = 10 * \log_{10} \sigma^0 (dB) \quad [1]$$

Según Chuvieco (2007), el coeficiente de retrodispersión toma valores mayores cuanto más intensa sea la señal de retorno.

- **Características que influyen en  $\sigma^0$**

A continuación en la Tabla 4, se ilustra los factores que influyen en el coeficiente de retrodispersión agrupados en dos bloques: factores intrínsecos que dependen del propio sistema radar y factores extrínsecos que dependen de las características de las cubiertas/superficies:

**Tabla 4**

***Factores que influyen en la retrodispersión***

<b>Factores que afectan a la retrodispersión</b>	
<b>Factores que dependen del sensor (intrínsecos)</b>	<b>Factores que dependen de las cubiertas (extrínsecos)</b>
Longitud de onda	Rugosidad de la superficie
Distancia antena-objeto terrestre Observado	Humedad (contenido en agua)
Ángulo de incidencia	Geometría del terreno
Polarización	

Fuente: (IGN, 2015)

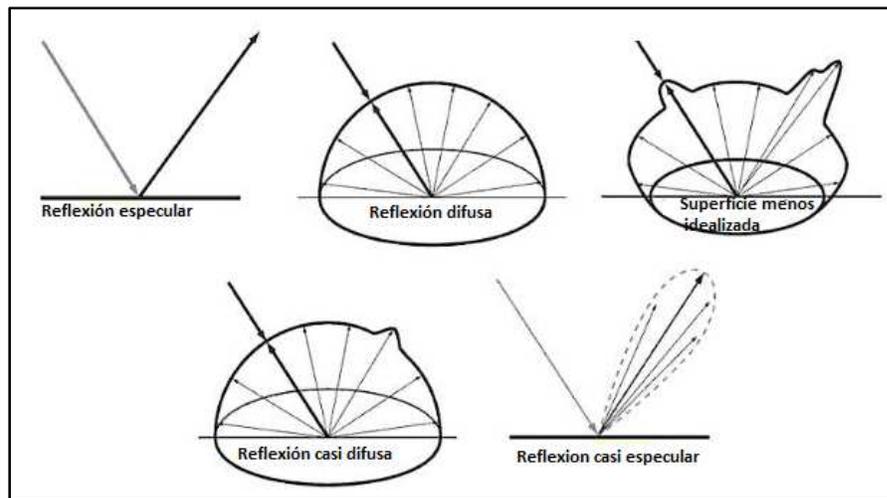
**Factores que no dependen de las cubiertas:**

- La **longitud de onda** de la señal emitida por el sensor Radar, determina la capacidad de la señal para penetrar: en la cubierta nubosa o en la lluvia (cuanto mayor sea  $\lambda$ , mejor penetración), en la cubierta vegetal y en el suelo desnudo (grandes  $\lambda$  son capaces de penetrar en el suelo varios metros). Y rugosidad relativa de la superficie considerada.
- El **ángulo de incidencia** influye en la capacidad de retorno de la señal: a mayor ángulo menor será el pulso de retorno puesto que la dispersión será también menor y viceversa. Pero con ángulos bajos aumenta el efecto sombra y las deformaciones del relieve.
- La **distancia antena-objeto**, está relacionada con la observación lateral: la intensidad de la señal observada decrece con la distancia a la antena SAR (mayor respuesta en superficies cercanas).
- **La polarización** de las ondas también afecta a la retrodispersión: por ejemplo, la polarización HH tiene mayor capacidad de penetración en el suelo, la polarización VV es más sensible cuando la vegetación se distribuye en hileras,

y las polarizaciones cruzadas (HV o VH) son más sensibles a elementos que aparecen aislados o sin una disposición espacial clara.

**Factores que dependen de las cubiertas/superficie:**

- La rugosidad de la superficie influye en la reflexión de la energía de las microondas, lo que provoca la brillantez de una imagen de Radar. En la Figura 13, se observa el comportamiento reflectivo de superficies ideales



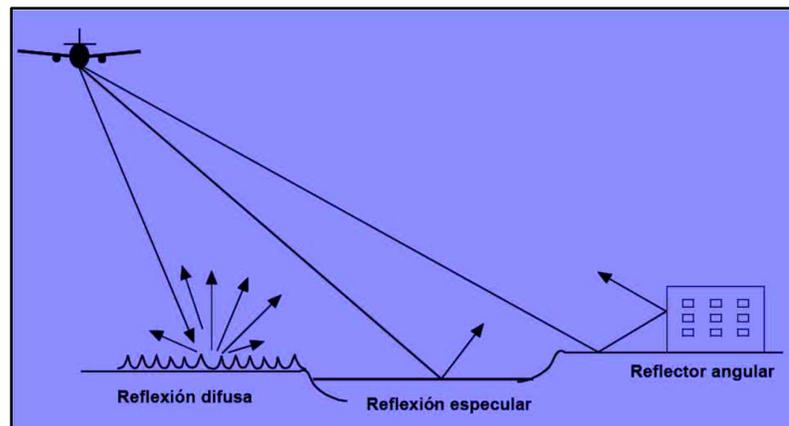
**Figura 13 Comportamiento reflectivo de superficies ideales**

Fuente: (Schott, 2009)

Generalmente, una superficie se considera lisa si sus variaciones de altura son considerablemente menores que la longitud de onda del Radar. Para una longitud de onda determinada, una superficie es relativamente más rugosa al aumentar el ángulo de incidencia; en cambio una superficie rugosa se define como: aquella que tiene variaciones de altura del orden de la mitad de la longitud de onda del Radar. En las imágenes Radar las superficies rugosas aparecen más brillantes que en las superficies lisas, aunque estén compuestas de los mismos materiales (Chuvienco, 2007).

- La relación entre la **geometría** del Radar y la de la superficie

Algunos objetos pequeños pueden aparecer extremadamente brillantes en las imágenes de Radar, dependiendo de su **configuración geométrica** que son los **reflectores angulares**. El lado de un edificio o un puente, combinado con reflexión procedente del terreno es un ejemplo de reflector angular (ver Figura 14).

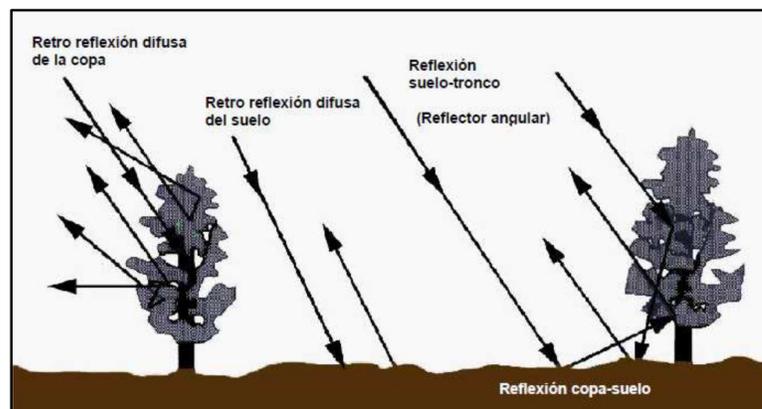


**Figura 14 Tipos de reflexión según su relación geométrica**

Fuente: (IGN, 2015)

- El contenido en **humedad** de la superficie

La presencia de humedad aumenta la constante dieléctrica de un material, esta constante se define como una medida de la permitividad estática relativa de un material. Esto hace que la apariencia de materiales idénticos pueda ser diferente, según la cantidad de humedad que contengan. La reflectividad, y en consecuencia, la brillantez de la imagen de la vegetación y de las superficies naturales aumenta con el contenido en agua (superficies y cubiertas vegetales húmedas poseen alto coeficiente de retrodispersión y las cubiertas secas poseen bajo coeficiente de retrodispersión) (ver Figura 15).

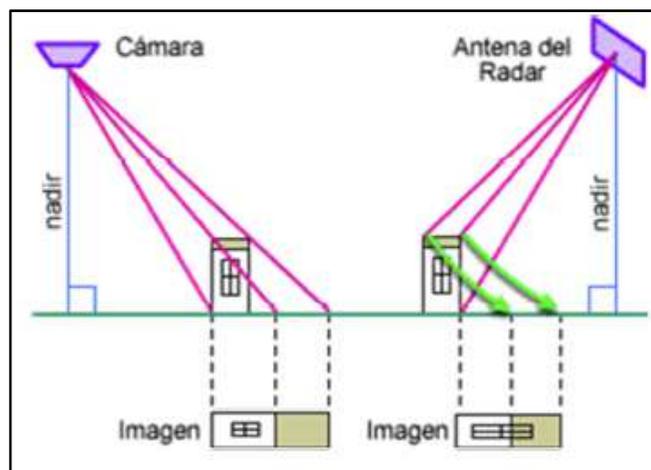


**Figura 15 Reflexión de las microondas según tipo de cubierta**

Fuente: (IGN, 2015)

### 2.3.2. Distorsiones de las imágenes

Debido a que la dirección de observación de los radares es oblicua, se producen ciertas distorsiones que no aparecen en las imágenes capturadas con sensores ópticos (ver Figura 16). En la imagen óptica y más pronunciada en fotos aéreas, los objetos altos se observan desplazados radialmente alejándose del nadir. En cambio, en las imágenes de radar la distorsión del terreno es perpendicular a la trayectoria del vuelo o del satélite; es decir, los objetos más altos se observan desplazados hacia el sensor.



*Figura 16 Diferencia de distorsiones de las imágenes*

Fuente: (IGN, 2015)

A continuación se describen las distorsiones más comunes que se pueden producir en las imágenes Radar:

- **Sombras:** la región de la superficie del terreno que no se ilumina por el Radar se representa como sombra en la imagen. Ya que no se recibe señal a partir de estas regiones, las sombras aparecen con tonos muy oscuros (IGN, 2015).
- **Moteado (o efecto speckle):** es el factor dominante en las imágenes Radar. Confiere a las imágenes una apariencia de tipo granular (alta frecuencia de cambio: tipo “sal y pimienta”); éste es debido a la suma de ondas electromagnéticas con diferentes fases que provocan constantes interferencias constructivas y destructivas debidas a las continuas difracciones de la señal recibido en un píxel. (Schubert & Small, 2008).

- **Inversión por relieve:** se produce cuando la energía reflejada por la porción superior de un objeto se recibe antes que la que proviene de la porción inferior. En este caso, al procesar la imagen, la parte superior del objeto se verá desplazada, o ‘puesta por encima’ de su base (C.C.R.S, 2011).

## 2.4. Plataformas Radar

En la actualidad, la mayoría de los satélites con instrumentos son de uso militar, aunque están aumentando cada día las aplicaciones civiles y científicas de las imágenes Radar; por otro lado, la mayoría de plataformas de observación de la Tierra llevan a bordo sensores ópticos aunque también están en aumento el número de plataformas Radar (López & Denore, 1999). En la Tabla 5 se van describir algunas de estas plataformas.

**Tabla 5**

### *Comparación de Sistema SAR*

Sistema	Frecuencia de Banda	Cobertura	Ángulo de Incidencia	Resolución	Altitud	Geometría Orbital	Inclinación	Colección de datos	Repetición de ciclo
AIRSAR/ TOPSAR	P (0.4 GHz) L (1.25 GHz) C (4.6 GHz)	12 km de ancho x 60 km de largo	0° - 70° Seleccionable	Alcance: 4 - 8 m Azimuth: 4 - 8 m	8 - 12 km	N/A	N/A	6 horas por vuelo	Según requerimiento
IFSARE	X (9,6 GHz)	5 - 16 km (10 km normalmente)	30° - 60° (45° normalmente)	Alcance: 3 m Azimuth: 3 m Precisión de altura: 1 - 3 m	6.1 - 12.2 km	N/A	N/A	3 horas por 5 horas de misión	Según requerimiento
P-3/SAR	L (1.28 GHz) C (5.3 GHz) X (9.35 GHz) UWB(350 MHz)	4.9 - 9.8 km	20° - 70°	Alcance: 1.5 o 3 m	5, 10, 20 kft	N/A	N/A	7 - 10 horas	Según requerimiento
STAR-2	X (9.4 GHz)	Modo 1: 65 km x 2 Modo 2: 100 km x 2	60° - 85°	Modo 1: Alcance: 15 m Azimuth: 15 m > 10 vistas	12 km	N/A	N/A	6 horas por vuelo	Según requerimiento
ALMAZ-1	S (3.125 GHz)	25 km	30° - 55°	Alcance: 15 - 30 m Azimuth: 15 m	270 - 380 km	N/A	73°	Fuera de servicio	5 - 7 días



Continua

ERS-1	C (5.3 GHz)	100 km	19.35° - 26.5°	Alcance: < 33 m Azimuth: < 30 m	785 km	Polar, Sincronizada con el sol	98.5°	12 minutos por órbita	35 días
JERS-1	L (1.275 GHz)	75 km	38.5°	Alcance: 18 m Azimuth: 18 m	568 km	Polar, Sincronizada con el sol	97.7°	20 minutos por 96 minutos de órbita	44 días
RADARS AT	C (5.3 GHz)	45 - 500 km (depende del modo de operación)	10° - 60° (depende del modo de operación)	Alcance: 11 - 100 m Azimuth: 9 - 100 m	798 km	Circular, Sincronizada con el sol	98.6°	28 minutos por 100 minutos de órbita	24 días
SIR-C	L (1.28 GHz) C (5.3 GHz)	15 - 90 km	17° - 63°	Alcance: 8 - 30 m Azimuth: 30 m	225 km	Órbita terrestre baja	57°	50 horas por vuelo	N/A
X-SAR	X (9.6 GHz)	15 - 40 km	17° - 63°	Alcance: 30 m Azimuth: 30 m	225 km	Órbita terrestre baja	57°	50 horas por vuelo	N/A

Fuente: tomado de (Birk, et al., 1995)

#### 2.4.1. Imágenes Radar del Satélite ALOS – PALSAR

Según la European Space Agency, el satélite avanzado de observación terrestre (ALOS), fue lanzado el 24 de enero del 2005 y cuenta con tres instrumentos de teledetección:

- Instrumento de mapeo estéreo con sensor remoto pancromático (PRISM), para la cartografía digital de elevación con una resolución de 2,5 metros.
- Un radiómetro avanzado tipo 2, en rango visible e infrarrojo cercano (AVNIR- 2) para la observación precisa de la cobertura del suelo.
- Radar de Apertura Sintética de colección de fases de banda L (PALSAR), encargado de permitir la observación de la Tierra durante todo el tiempo (European Space Agency, 2007).

En la Tabla 6 se presenta las especificaciones técnicas para ALOS.

**Tabla 6****Especificaciones técnicas ALOS**

CARACTERÍSTICAS SENSOR ALOS	
<b>Fecha de lanzamiento</b>	Enero 24, 2006
<b>Vehículo de lanzamiento</b>	H-IIA
<b>Sitio de lanzamiento</b>	Centro Espacial Tanegashima
<b>Peso de plataforma</b>	Aprox. 4 ton
<b>Energía generada</b>	Aprox. 7 kW (hasta fin de operación)
<b>Tiempo de vida</b>	3 -5 años
<b>Órbita</b>	Sincronizado con el sol, sub recurrente Ciclo de repetición: 46 días Sub ciclo: 2 días Altitud: 691.65 km (desde el Ecuador) Inclinación: 98.16
<b>Determinación de la precisión de actitud</b>	$2.0 \times 10^{-4}$ °(with GCP)
<b>Determinación de la precisión de posición</b>	1m (fuera de línea)
<b>Transferencia de datos</b>	240Mbps (via relevo de datos en tecnología satelital) 120Mbps (Transmisión directa)
<b>Memoria de datos en plataforma</b>	Disco sólido (90Gbytes)

Fuente: modificado de (EORC, 2010).

El Radar de Apertura Sintética por fases de banda L (PALSAR), es un sensor de microondas activo que utiliza frecuencias de banda L, que permite la observación de la Tierra ya sea de día o de noche; penetrando nubes, niebla o lluvia (Birk, et al., 1995). Además dispone de un modo de observación ScanSAR, el que permite adquirir imágenes con ancho de 250 a 350 km; en la Tabla 7 se describen las características del sistema.

**Tabla 7****Características técnicas PALSAR**

CARACTERÍSTICAS SISTEMA PALSAR				
Modo	Fino	ScanSAR		Polarimetría experimental (modo 1)*
<b>Centro de frecuencia</b>	1270 MHz(L-band)			
<b>Ancho de banda del eco</b>	28 MHz	14 MHz	14 MHz, 28 MHz	14 MHz
<b>Polarización</b>	HH o VV	HH+HV o VV+VH	HH o VV	HH+HV+VH+VV
<b>Ángulo incidente</b>	8° - 60°	8° - 60°	18° - 43°	8° - 30°
<b>Alcance</b>	7 - 44 m	14 - 88 m	100 m (multi look)	24 - 89 m



Continua

<b>Franja de observación</b>	40 - 70 km	40 - 70 km	250 - 350 km	20 - 65 km
<b>Longitud de Bit</b>	5 bits	5 bits	5 bits	3 o 5bits
<b>Velocidad de datos</b>	240 Mbps	240 Mbps	120 Mbps, 240 Mbps	240 Mbps
<b>NE sigma zero **</b>	< -23 dB (ancho de franja 70 km) < -25dB (ancho de franja 60 km)	< -25 dB	< -29 dB	
<b>S/A **,***</b>	> 16dB (ancho de franja 70 km) > 21dB (ancho de franja 60 km)	> 21 dB	> 19 dB	
<b>Precisión radiométrica</b>	Escena: 1 dB / órbita: 1.5 dB			

Fuente: modificado de (EORC, 2010)

El sistema PALSAR no puede observar las zonas más allá de 87,8 grados de latitud norte y 75,9 grados de latitud sur, cuando el ángulo fuera del nadir es de 41,5 grados.

\* Debido al consumo de energía, el tiempo de operación será limitado.

\*\* Válido para el ángulo fuera del nadir de 34,3 grados. (Modo Fina), 34,1 grados. (Modo ScanSAR), 21,5 grados. (Modo Polarimétrico).

\*\*\* S / A nivel puede deteriorarse debido a los cambios de ingeniería en PALSAR.

## ● **Productos PALSAR**

Existen varios productos que proporciona PALSAR estos se describen en la Tabla 8.

**Tabla 8**

### **Productos PALSAR**

<b>Nivel de Procesamiento</b>	<b>Definición</b>
1.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los datos del área de la escena 1 se extraen de los datos recibidos.</li> <li>• El número de archivos de datos de SAR es el mismo que el número de polarizaciones en el caso de modos de polarización y de polarimetría duales.</li> <li>• Esto corresponde a los productos de datos en bruto listo para ser procesado en un único complejo aspecto (L1.1) o imágenes de precisión (L1.5).</li> <li>• Tipo de datos: 8 bits (I) + 8 bits (Q)</li> </ul>

 Continua

1.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simple vista de productos complejos (SLC).</li> <li>• Provee una geometría inclinada.</li> <li>• Conservación de productos de fase.</li> <li>• Espaciado natural de píxeles</li> <li>• Tipo de datos: 32 bits (I “in-phase”) + 32 bits (Q “quadrature”)</li> </ul>
1.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Productos detectados.</li> <li>• Provee una geometría sobre el terreno.</li> <li>• Varias vistas en alcance y azimut.</li> <li>• Se puede seleccionar un modo fino para el espaciado de píxeles.</li> <li>• Las latitudes y longitudes en el producto se calculan sin tener en cuenta la altura del terreno pero en base a GRS80 elipsoide.</li> <li>• 16 bits de un número entero sin signo</li> </ul>

Fuente: (European Space Agency, 2007)

## 2.5. Software para tratamiento de imágenes geospaciales

### 2.5.1. Sentinel Application Platform (SNAP Desktop)

SNAP Desktop es copyleft, publicado por la Fundación de Software Libre, reúne una variedad de herramientas, con el objetivo de ofrecer la plataforma más complej; sus funciones más básicas son; abrir un producto, explorar los componentes del producto, como bandas, máscaras y cuadrículas de puntos de unión. Además es un software especializado en tratamiento de imágenes satelitales ópticas e imágenes Radar (ESA, 2012).

### 2.5.2. ENVI

Es un software comercial, especializado en el procesamiento y análisis de imágenes geospaciales utilizado por profesionales GIS, científicos, investigadores y analistas de todo el mundo. ENVI soporta imágenes obtenidas de numerosos tipos de satélites y sensores aerotransportados, incluyendo pancromáticos, multiespectrales, hiperespectrales, Radar, Lidar y más (SIGSA, 2012).

## 2.6. Tratamiento de imágenes SAR

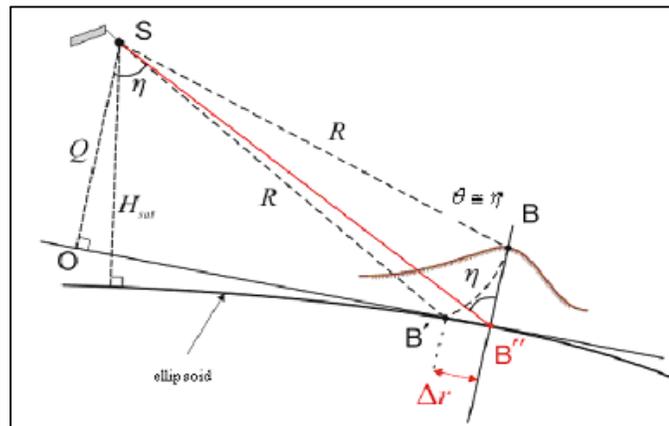
Los datos contenidos en las imágenes SAR deben tratarse para poder relacionar los valores digitales de cada pixel con los correspondientes valores de coeficiente de backscattering  $\sigma_0$  ( $\sigma_0$ ) (Frulla, et al., 1998). Por ello deben realizarse algunos

procesos, como por ejemplo: corrección geométrica, radiométrica, filtros, combinaciones, etc.

### 2.6.1. Corrección geométrica y radiométrica

Debido a las variaciones topográficas de una escena y la inclinación del sensor del satélite, las distancias pueden distorsionarse en las imágenes SAR. Los datos de la imagen que no están directamente en la ubicación Nadir del sensor tendrán cierta distorsión. Las correcciones de terreno están destinadas a compensar estas distorsiones de modo que la representación geométrica de la imagen sea lo más parecida posible al mundo real (ESA, 2012).

La geometría de las distorsiones topográficas en las imágenes SAR se observa en la Figura 17. Aquí podemos ver que el punto B con la elevación  $h$  por encima del elipsoide se representa en la posición B' en la imagen SAR, aunque su posición real es B". El desplazamiento  $\Delta r$  entre B' y B" muestra el efecto de las distorsiones topográficas.



**Figura 17 Geometría de las distorsiones topográficas**

Fuente: (ESA, 2012)

- **Algoritmo de ortorectificación**

En la corrección geométrica de las imágenes SAR, se usa el método de Ortorectificación de Corrección Rango Doppler (Schubert & Small, 2008), el mismo

que sirve para geocodificar imágenes SAR a partir de una única geometría Radar raster 2D, el cual utiliza la información del vector de estado de la órbita disponible en los metadatos, las anotaciones temporales del Radar, los parámetros de conversión de rango inclinado a Tierra, junto con los datos del modelo de elevación digital (DEM); los que sirven para obtener la información de geolocalización precisa (ESA, 2012).

- **Normalización Radiométrica**

La corrección radiométrica implica una normalización radiométrica basada en el enfoque propuesto por Kellndorfer et al. (1998), en la que describe la siguiente ecuación:

$$\sigma_{NORM}^0 = \sigma_{ELIPSOIDE}^0 \frac{\sin \theta_{DEM}}{\sin \theta_{ELIPSOIDE}} \quad [ 2 ]$$

Dónde

$\sigma_{NORM}^0$  = denominado “sigma0”, banda real del coeficiente de retrodispersión

$\theta_{DEM}$  = ángulo de incidencia local

$\theta_{ELIPSOIDE}$  = ángulo de incidencia elipsoidal

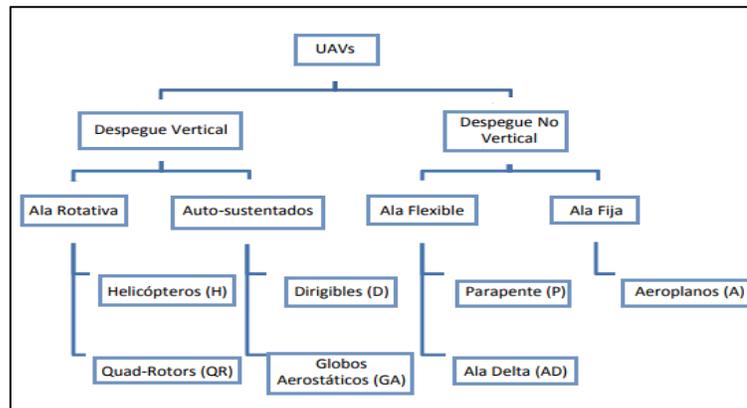
$\sigma_{ELIPSOIDE}^0$  = sigma elipsoidal, expresadas en términos de  $\sigma_0$  y ángulo de incidencia

## 2.7. Vehículos aéreos no tripulados (UAV)

Un UAV, de sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicle; por definición, es un vehículo aéreo no tripulado, capaz de mantener un vuelo controlado y sostenido, también es una aeronave sin piloto a bordo que puede ser controlado de forma remota o volar de forma automática mediante planes de vuelo pre-programados (Rovira, 2011).

### 2.7.1. Clasificación de los UAV

A la hora de establecer una clasificación para los UAV se pueden utilizar diferentes criterios; es frecuente utilizar una clasificación atendiendo a la forma en la que las aeronaves consiguen su sustentación en la atmosfera (tipo de aeronave del UAV) (Figura 18).



*Figura 18 Clasificación de UAVs por el tipo de Aeronave*

Fuente: (Barrientos, et, 2007)

De manera general, existen dos tipos de plataforma: de ala fija y de ala rotatoria. En función del objetivo buscado, será necesario el empleo de una plataforma u otra.

#### - UAV con ala Rotatoria

Según Díaz (2015), los aparatos con ala rotatoria son aquellos en los cuales, las fuerzas de sustentación se logran mediante el giro de las hélices en el aire, siendo estos aparatos también conocidos como multirrotores o helicópteros (ver Figura 19), las características más importantes de estos son:

- Despegue y aterrizaje vertical, reduciendo las necesidades de espacio para las maniobras de aterrizaje y despegue.
- Mayor maniobrabilidad y precisión de vuelo, ya que los sistemas de ala fija siguen trayectorias curvilíneas, con radios de giro relativamente grandes y

velocidades de ascenso y descenso bastantes estrictas; sin embargo los multirrotores pueden volar siguiendo cualquier trayectoria en las tres dimensiones.

- El diseño de los multirrotores permite embarcar cargas de pago más voluminosas.



*Figura 19 Plataformas UAV- Ala rotatoria*

Fuente: (Yuste Martín et al., 2013)

### **2.7.2. DJI Matrice 100**

Según la empresa comercial DJI, el cuadracóptero “DJI Matrice 100 (M100)” es un drone multirrotor que ha sido desarrollado para testar nuevos desarrollos incluyendo hardware y software, lo que permite fácilmente montar otros sensores (ver Figura 20).



*Figura 20 Matrice 100*

Fuente: (Yuste Martín et al., 2013)

La empresa DJI en el año 2014, en su sitio web detalla las características principales con las que cuenta el sistema “DJI Matrice 100” son (ver Tabla 9):

**Tabla 9**

***Características técnicas del Matrice 100***

<b>CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DEL MATRICE 100</b>	
<b>ESTRUCTURA</b>	
Distancia diagonal entre ejes	650 mm
Peso (con la batería TB48D)	2431 g
Max. Peso de despegue	3600 g
Peso de la plataforma de expansión	45 g
Peso del compartimiento de la batería	160 g
Peso del Gimbal con cámara Zenmuse X3	247 g
<b>PERFORMANCE</b>	
Max. Paso de velocidad angular	300 ° / s, Yaw: 150 ° / s
Max. Ángulo de inclinación	35 °
Max. Velocidad de ascenso	5 m / s
Max. Velocidad de descenso	4 m / s
Max. Resistencia al viento	10 m / s
Max. Velocidad	- 22 m / s (modo ATTI, sin carga, sin viento)
	- 17 m / s (modo GPS, sin carga, sin viento)
Altura máxima de vuelo	3000 m
Tiempo de vuelo (con la batería TB48D)	Carga útil: 28 min; 500g de carga útil: 20 min, 1kg de carga útil: 16 min
Tiempo de vuelo (con dos baterías TB48D) Sin carga útil:	40 min
Tiempo de vuelo (con batería TB48D y Zenmuse X3) Sin carga útil:	23 min
<b>SISTEMA DE PROPULSIÓN</b>	
Modelo de motor	DJI 3510
Modelo de propulsor	DJI 1345s
Modelo ESC	DJI E SERIES 620D
<b>OTRO</b>	
Temperatura de funcionamiento	-10 ° C a 40 ° C
<b>SISTEMA DE CONTROL DE VUELO</b>	
Modelo N1	
<b>CONTROL REMOTO</b>	
Nombre	C1

 Continua

Frecuencia de funcionamiento	5.725 ~ 5.825 GHz
	922,7 MHz - 927,7 MHz (Japón)
	2,400 ~ 2,483 GHz (Lightbridge)
Distancia de transmisión (sin obstáculos, libre de interferencias)	CE: 3.5 km
	FCC: 5 km
EIRP	10dBm @ 900M
	13dBm@5.8G
	20dBm@2.4G
Salida de video	USB, Mini-HDMI
Fuente de alimentación	Batería incorporada
Cargador	Cargador aprobado por DJI
Capacidad de doble usuario	Control maestro y automático
Soporte para dispositivos móviles	Compatible +con smartphones y tablets
Potencia de salida	9 W
Temperatura de funcionamiento	-10 ° C a 40 ° C

Fuente: modificado de (DJI, 2014)

La cámara tiene un sistema de estabilización (Gimbal), que junto con el sensor Zenmuse X3 (RGB) incorporado y 3 motores, centran y compensan automáticamente las imágenes capturadas (ver Figura 21 y Tabla 10) y también cuenta con un sistema de autopiloto N1, que permite conectarse a aplicaciones para Smartphone o Tablet que realizan toda la planificación de vuelo y se conectan al control remoto para realizar el vuelo (DJI, 2014).



**Figura 21 a) Cámara Zenmuse X3 RGB b) Cámara Zenmuse X3 BGNIR**

Fuente: (DJI, 2014)

**Tabla 10*****Características técnicas de la cámara Zenmuse X3 BGNIR y RGB***

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Video	Graba video 4K a hasta 30FPS o video 1080P a hasta 60FPS
Fotogramas	Fotogramas de 12 megapíxeles
Lente	9 elementos en 9 grupos que incluyen un elemento esférico
Sensor	CMOS de 1 / 2.3 pulgadas
FOV	angular de 94°
Libertad	Completa gama de 360°, que le da libertad ilimitada.
Cardan	3 ejes ayudan a producir imágenes suaves y estables en cualquier condición de vuelo.
Focal	Focal de 20 mm sin distorsión

Fuente: modificado de (DJI, 2014)

**2.7.3. Software fotogramétrico para UAV****- Agisoft PhotoScan**

Es un software de tipo comercial e independiente que realiza el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos espaciales en 3D. Además Agisoft PhotoScan es una solución de software fotogramétrica independiente para la generación automática de nubes de puntos densas, modelos poligonales texturizados, ortomosaicos verdaderos georreferenciados y DSM / DTM a partir de imágenes estáticas (Agisoft, 2015).

**2.7.4. Puntos de control terrestre**

Estos puntos son parte fundamental dentro de procesos fotogramétricos; permiten generar un proceso de ortorectificación con coordenadas de alta precisión (IGN, 2015). Para lograr obtener los puntos de control terrestre, se utiliza equipos GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite), alcanzando precisiones centimétricas. Existen diversos métodos de posicionamiento, aunque los más conocidos para fotogrametría son:

- RTK Real Time Kinematic / Cinemático en Tiempo Real
- Fast Static/ Estático Rápido

### **2.7.5. Plan de Vuelo**

Según Burbano (2015), define el plan de Vuelo como “un conjunto de cálculos previos a la realización de un vuelo fotogramétrico, mediante los cuales se organizan las operaciones que permitan conseguir el fin propuesto bajo unas condiciones establecidas previamente”.

## **2.8. Modelos del Digitales y Ortomosaico**

### **2.8.1. Modelos Digitales de Terreno (MDT)**

Son modelos de datos ráster, que representan el relieve a nivel del suelo. Describe los accidentes geográficos y todos los elementos que se encuentren sobre la superficie del terreno (INEGI, 2010).

### **2.8.2. Modelos Digitales de Superficie (MDS)**

En este caso, el MDS, representa todos los elementos que se encuentran sobre la superficie del terreno, estos elementos pueden ser: la copa de los árboles, las edificaciones, el tendido eléctrico, etc (INEGI, 2010).

### **2.8.3. Modelo de Superficie de Cultivo (CSM)**

Según Bending, et al., (2014), lo define como una diferencia de alturas entre el modelo digital de superficie y el modelos digital del terreno.

### **2.8.4. Ortomosaico**

Se define como una composición de imágenes a la que se le han corregido todos los errores geométricos para que cada punto en el terreno sea observado desde una perspectiva perpendicular.

También se le conoce como una representación fotográfica de una zona de la superficie terrestre, en la que todos los elementos presentan la misma escala, libre de errores y deformaciones (Flynorth, 2015).

## **2.9. Biomasa**

### **2.9.1. Definición**

De acuerdo a la Real Academia Española (RAE), la biomasa se define como “la materia total de los seres vivos que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o volumen”.

Según García & Martínez (2014), atendiendo a la procedencia la biomasa se puede clasificar en: Natural, Forestal y Residual. Para este proyecto se define la biomasa forestal como aquella que procede del cultivo de madera, mediante prácticas silvícolas, de los restos de madera y de la limpieza de montes y/o bosques (Grupo Empresarial ENCE, 2009).

La biomasa de los bosques, proporciona certeras estimaciones de las reservas de carbono en la vegetación forestal, ya que aproximadamente el 50% de la misma, es de carbono. En consecuencia, la biomasa representa la cantidad potencial de carbono que puede ser añadido a la atmósfera como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) cuando el bosque es talado y/o quemado (Brown, et al., 1989).

Se ha comprobado que el CO<sub>2</sub> es el principal responsable del efecto invernadero, causante del cambio climático, a pesar que solo representa el 0,03% de los gases de la atmósfera, es por ello, que la biomasa permite estimar las fijaciones de carbono de las plantas y se relacionan directamente con los procesos de cambio climático globales. En tal virtud, se hace necesario saber cuánta biomasa se pierde o se acumula (Montero & Muñoz, 2005).

## 2.9.2. Métodos de estimación de biomasa forestal

Se han presentado diferentes enfoques al momento de describir una metodología para la estimación de la biomasa, en la Tabla 11 se resume las principales técnicas.

**Tabla 11**

### *Resumen de las técnicas para la estimación de biomasa*

CATEGORÍA	MÉTODOS	DATOS	CARACTERÍSTICAS
Método basado en mediciones de campo	Muestreo destructivo	Muestreo de árboles	Árboles individuales
	Ecuaciones Alométricas	Muestreo de árboles	Árboles individuales
	Conversión de volumen en Biomasa	Volumen de muestreo de árboles o de tablas estándares	Árboles individuales, Estándares de vegetación
Método basado en Sensores Remotos	Método basado en alta/media/gruesa resolución espacial	Fotografía Aérea, IKONOS	Por nivel de píxel
	Método basado en datos Radar	Landsat TM/ETM+, SPOT	Por nivel de píxel
		IRS-1C WiFS, AVHRR	Por nivel de píxel
		Radar, LiDAR	Por nivel de píxel
Método basado en Sistemas de Información Geográfica	Basado en datos auxiliares	Elevación, pendiente, precipitación, Tipo de suelo, Etc.	Por nivel de píxel o nivel de campo

Fuente: (Lu, 2006)

## 2.10. Estimación de biomasa por ecuaciones alométricas

Este método consiste en utilizar ecuaciones alométricas, las mismas que son ecuaciones matemáticas que permiten estimar el volumen, biomasa o el carbono de los bosques en función de parámetros de medición como es el DAP (Diámetro a la altura del Pecho, altura del árbol y densidad); también es conocido como un modelo destructivo que utilizan métodos de regresión (Rojas, 2015).

Existen gran variedad de modelos para estimar la biomasa de un árbol o de sus fracciones, pero todas las ecuaciones proceden de alguna de las siguientes funciones matemáticas (Diéguez, et al., 2003):

- Lineal:  $b = b_0 + b_1 \cdot x_1 + \dots + b_j \cdot x_j$  [ 3]
- No lineal:  $b = b_0 \cdot x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \cdot \dots \cdot x_j^{b_j}$  [ 4]
- Logarítmica:  $\log b = b_0 + b_1 \cdot \log x_1 + b_2 \cdot \log x_2 + \dots + b_j \cdot \log x_j$  [ 5]

Donde:

- $b$  = biomasa seca total o de alguno de los componentes del árbol.
- $x_j$  = variables (DAP, altura y densidad).
- $b_j$  = parámetros del modelo

### 2.10.1. Ecuación alométrica Potencial

La ecuación más comúnmente utilizada, es la alométrica (potencial) aplicada en este estudio, ya que relaciona la biomasa seca total o la biomasa seca de alguno de los componentes del árbol con el diámetro normal. La ecuación tiene la siguiente forma:

$$y = \alpha \cdot d^\beta \quad [ 6]$$

Donde:

- $y$  = Biomasa seca total, o de alguno de los componentes del árbol expresada en kg.
- $\alpha, \beta$  = parámetros estimados en función del modelo (especie analizada).
- $d$  = DAP (Diámetro a la altura del pecho) o diámetro normal.

La ecuación [6] no es lineal, por lo que su expresión logarítmica sería:

$$y = \alpha + \beta \ln d \quad [ 7]$$

#### - Coeficiente de corrección

Sin embargo, según Baskerville (1972), la transformación logarítmica introduce un sesgo (subestimación) en los cálculos. Para la eliminación de este sesgo,

el resultado final debe ser multiplicado por un factor de corrección (CF), calculado a partir del error estándar de la estimación (SEE). Este valor del coeficiente de corrección es calculado según la siguiente expresión:

$$CF = e^{\frac{SEE^2}{2}} \quad [ 8]$$

Por tanto, desde la ecuación logarítmica se llega a obtener los valores modulares de biomasa (kg de materia seca) con la re-transformación y aplicación del coeficiente de corrección, utilizando los parámetros de la Tabla 12.

**Tabla 12**

***Parámetros de estimación de biomasa***

Especie	y	Parámetros		R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	SEE
		α	β		
<i>Cupressus Macrocarpa</i>	Biomasa	-2,21637	2,35162	0,998	0,073801
<i>Acacia melanoxylon</i>	Biomasa	-1,87511	2,29843	0,999	0,014718
<i>Eucalyptus Globulus</i>	Biomasa	-2,20421	2,38196	0,974	0,157850
<i>Pinus radiata</i>	Biomasa	-2,61093	2,48739	0,977	0,193270

Fuente: (Montero & Muñoz, 2005)

**- Cálculo de biomasa por hectárea**

Según Páez (2014), para escalar este valor a toneladas por hectárea, se multiplica el valor obtenido en la totalidad de las parcelas, por el factor de conversión según el tamaño de la parcela empleado como se describe a continuación:

$$BA \text{ (Kg/árbol)} \times (1\text{Tn}/1000 \text{ Kg}) \times FC \text{ (árbol/1ha)} = BA \text{ (Tn/ha)} \quad [ 9]$$

Donde:

- BA = biomasa aérea en Kg → Tn
- FC = Factor de conversión según el tamaño de la parcela empleado.

### - **Conversión de biomasa a carbono**

En la mayoría de estudios, cuando se trata del tema de almacenamiento de carbono, se asume que el contenido de carbono corresponde al 50% de biomasa, usando así, un factor de 0,5 para transformar la biomasa forestal en contenido de carbono aéreo (CAC) (Rügnitz, et al., 2009).

### - **Conversión de carbono acumulado a CO<sub>2</sub> equivalente**

El dióxido de carbono equivalente, corresponde a la medida métrica utilizada para comparar las emisiones de varios gases del efecto invernadero, basada en el potencial de calentamiento global de cada uno. Para convertir a cantidad de carbono almacenada en bosques naturales el (IPCC, 2006), recomienda usar la siguiente ecuación:

$$CO_2Total = CAC * 3,67 \quad [ 10]$$

Donde:

- CAC = Contenido de carbono aéreo
- 3,67 = factor que resulta de dividir el peso atómico de una molécula de dióxido de carbono (44) por el peso específico del carbono (12)

## **2.11. Estimación de biomasa mediante Radar**

En este tipo de estimación de biomasa se trabaja con datos tipo Radar y se maneja a nivel de pixel (Lu, 2006).

### **2.11.1. Modelo para estimar biomasa mediante Radar**

El modelo modificado de Saatchi et al. (2007) tiene una forma cuadrática para imitar aproximadamente la pérdida de sensibilidad de la difusión de radar en valores

de biomasa más altas. Mediante la sustitución de AGB (Forest Aboveground Biomass) por su logaritmo natural  $\ln(AGB)$  y los coeficientes de retrodispersión en decibelios como  $10 \log(\sigma^0)$ , la forma modificada del modelo de regresión puede escribirse como:

$$\ln(AGB) = a_0 + a_1\sigma_{HH}^0 + a_2\sigma_{HH}^0{}^2 + a_3\sigma_{HV}^0 + a_4\sigma_{HV}^0{}^2 \quad [11]$$

Donde:

- $\ln(AGB)$  = se refiere al logaritmo natural de la AGB (Biomasa Área Forestal/ Forest Aboveground Biomass)
- $\sigma_{HH}^0$  = intensidad de retrodispersión de HH ( $\sigma^0$ , dB)
- $\sigma_{HV}^0$  = intensidad de retrodispersión de HV ( $\sigma^0$ , dB)

## 2.12. Estimación de biomasa mediante alta resolución espacial

En este tipo de estimación de biomasa se trabaja con datos tipo de fotografía aérea y se maneja a nivel de píxel (Lu, 2006).

### 2.12.1. Uso de índices de vegetación

Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales, que tienden a medir la biomasa o vigor vegetal; además es una combinación de bandas espectrales que son sumados, divididos, o multiplicados en una forma diseñada para producir un simple valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel (Diaz, 2015).

#### - GNDVI

Éste es, una variante del NDVI que utiliza la banda del verde en lugar de la del rojo (Kemerer, 2007). Su fórmula es la siguiente:

$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN} \quad [12]$$

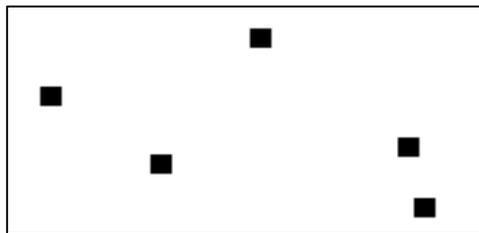
## 2.13. Métodos básicos de muestreo en ecología vegetal

### 2.13.1. Diseño de muestreo

En los estudios ecológicos, el diseño de muestreo es la parte que requiere mayor cuidado, ya que éste determina el éxito potencial de un experimento, y de éste depende el tipo de análisis e interpretación a realizarse. Existen algunos tipos de muestreo que son muy simples de utilizar, entre ellos tenemos el muestreo aleatorio simple, muestreo aleatorio estratificado y muestreo sistemático (Mostacedo & Fredericksen, 2000).

- **Muestreo aleatorio simple**

Es el esquema de muestreo más sencillo de todos y de aplicación más general (ver Figura 22). Este tipo de muestreo se emplea en aquellos casos en que se dispone de poca información previa acerca de las características de la población a medirse.



*Figura 22 Muestreo aleatorio simple*

### 2.13.2. Tipos de muestreo de vegetación

Según Mostacedo & Fredericksen (2000), para que un muestreo sea lo suficientemente representativo y confiable, debe estar bien diseñado. Esto quiere decir que la muestra a tomarse debe considerar la mayor variabilidad existente en toda una población, existe diferentes tipos de muestreo de vegetación entre los cuales tenemos:

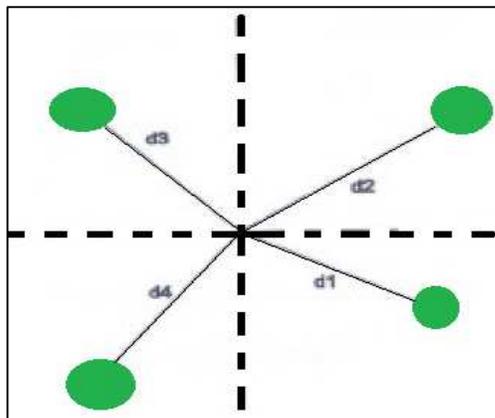
- Transectos

- Transectos variables
- Cuadrantes
- Punto centro cuadrado
- Líneas de intercepción
- Puntos de intercepción
- Muestreos fitosociológicos

Haciendo referencia al tema de estudio vamos a centrarnos en el muestreo puntos centro cuadrado.

- **Punto-centro-cuadrado**

El punto-centro-cuadrado es uno de los métodos usados, principalmente, para el muestreo de árboles. Las ventajas de este método son la rapidez de muestreo, el poco equipo y mano de obra que requiere y, además, la flexibilidad de medición, puesto que no es necesario acondicionar el tamaño de la unidad muestral a las condiciones particulares de la vegetación (Matteucci & Colma, 1982).



**Figura 23 Punto - Centro – Cuadrado**

Fuente: (Mostacedo & Fredericksen, 2000)

En cada cuadrante se debe ubicar el árbol más cercano al punto central y tomar solo 4 árboles (ver Figura 23); de los cuales se pueden tomar medidas de campo como son: altura, Diámetro a la altura del pecho (DAP), forma de copa e infestación de bejucos (Rojas, 2015). Según el manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal de Mostacedo & Fredericksen, mencionan que para realizar los cálculos de densidad de árboles por hectárea se debe sacar el promedio de la distancia del punto centro hacia cada individuo.

El cálculo es el siguiente:

$$Dh = \frac{10000}{\bar{D}^2} \quad [13]$$

Donde:

- $Dh$  = Densidad por hectárea,
- $\bar{D}$  = Distancia promedio

### 2.13.3. Tamaño de la muestra

- **Población**

Conjunto sobre el cual se va a realizar la investigación. Está compuesta por elementos. Puede ser de tamaño finito o infinito (Ludewing, 2006).

- Población finita

Se habla de que una población es finita cuando consta de un número limitado de elementos (Ludewing, 2006).

- **Muestra**

Según Ludewing (2006), es un subconjunto de la población del que se dispone de información necesaria para realizar el estudio. Puede ser muestras con poblaciones finitas e infinitas.

- **Muestra para poblaciones finitas**

Para el cálculo de tamaño de muestra cuando el universo es finito, es decir contable y la variable de tipo categórica, primero debe conocer "N" o sea el número total de casos esperados o que ha habido en años anteriores (Supo, 2015). Si la población es finita, es decir conocemos el total de la población y deseásemos saber cuántos del total tendremos que estudiar la fórmula sería:

$$n = \frac{N * Z_{\alpha}^2 * p * q}{d^2 * (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p * q} \quad [ 14]$$

Dónde:

- N = Total de la población
- $Z_{\alpha}$  = cálculo de Z está dado por en la Tabla 13.
- p = proporción esperada
- q = 1 – p
- d = precisión

Según Rojas (2011), el cálculo se puede realizar de acuerdo con la Tabla 13.

**Tabla 13**

*Cálculo de la abscisa de la curva normal para un valor (Z)*

TABLA DE APOYO AL CALCULO DEL TAMAÑO DE UNA MUESTRA POR NIVELES DE CONFIANZA									
Certeza	95%	94%	93%	92%	91%	90%	80%	62.27%	50%
<b>Z</b>	<b>1.96</b>	1.88	1.81	1.75	1.69	1.65	1.28	1	0.67
<b>Z<sup>2</sup></b>	3.84	3.53	3.28	3.06	2.86	2.72	1.64	1.00	0.45

Fuente: tomado de (Rojas, 2011)

## 2.14. Estadísticos de control de calidad

### 2.14.1. Coeficiente de Correlación lineal de Pearson

En estadística, es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativa, se utiliza como un índice para medir el grado de relación de dos variables

siempre (Vararey, 2015). El valor del índice de correlación varía en el intervalo de -1 a 1, indicando el signo el sentido de la relación:

- Si  $r = 1$ , existe una correlación positiva perfecta  $\rightarrow$  dependencia total entre las dos variables = relación directa
- Si  $0 < r < 1$ , existe una correlación positiva.
- Si  $r = 0$ , no existe relación lineal  $\rightarrow$  variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.

### 2.14.2. Coeficiente de Determinación

El coeficiente de determinación  $r^2$ , es un coeficiente estadístico que sirve para medir la bondad del ajuste del modelo de regresión, su unidad varia de 0 a 1 (Diaz, 2015). Se lo obtiene elevando al cuadrado el coeficiente de correlación de Pearson y se interpreta cualitativamente, según la siguiente tabla.

**Tabla 14**

*Bondad de ajuste en función del valor  $R^2$*

Bondad del ajuste	
Significado	$R^2$
Correlación positiva o directa perfecta	$> 0,85$
Correlación positiva	$0,5 - 0,85$
Correlación débil	$0,4 - 0,5$
Correlación negativa	$0,3 - 0,4$
Muy malo	$< 0,3$

Fuente: modificado de (Diaz, 2015)

## CAPITULO III

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Generalidades

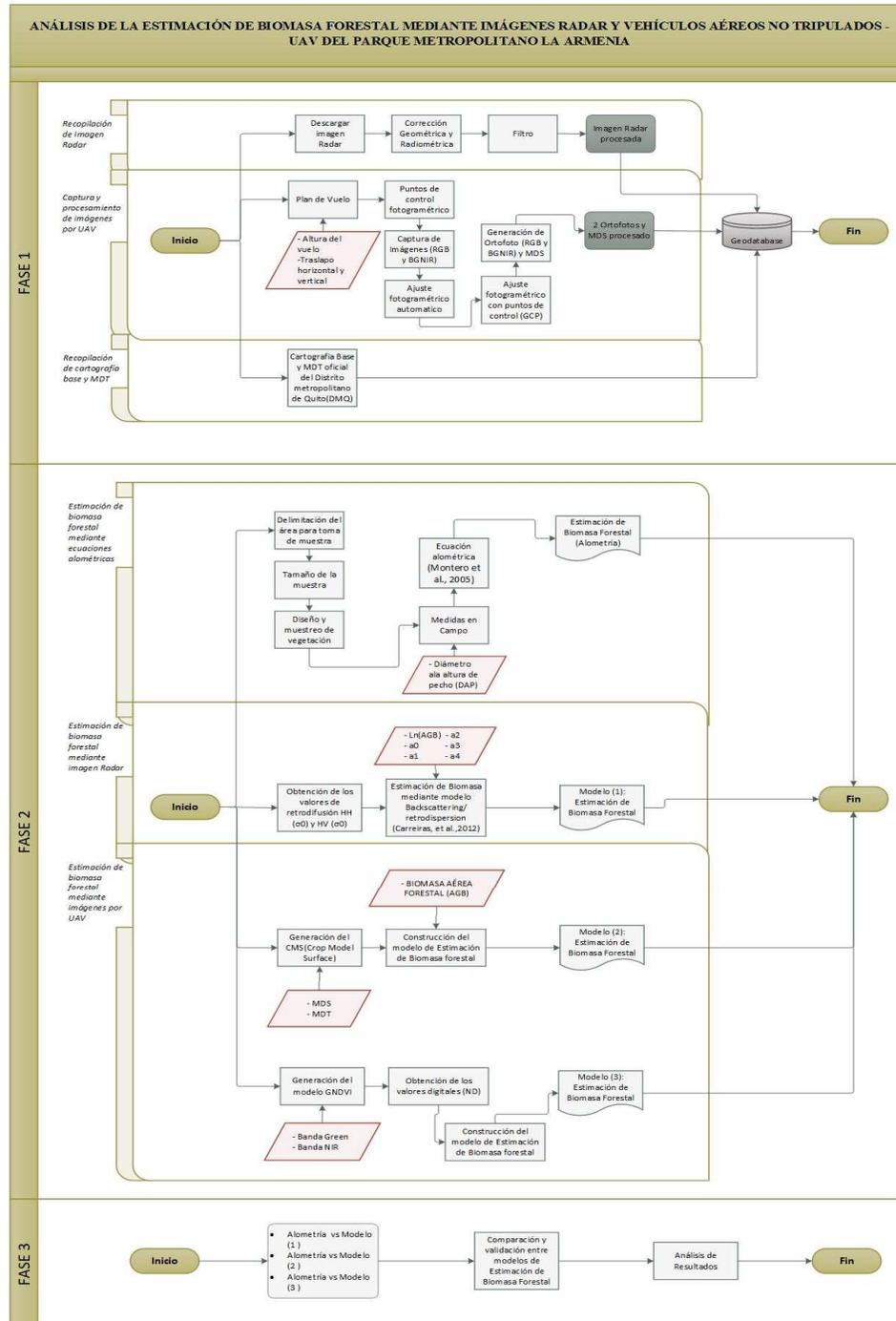
El presente estudio plantea desarrollar y comparar dos metodologías no destructivas en la estimación de biomasa forestal a partir de imágenes Radar y vehículos aéreos no tripulados (UAV). Se utilizaron dos métodos: experimental y comparativo; experimental, en cuanto a la obtención de datos en campo para calcular la biomasa forestal por ecuaciones alométricas y comparativo, ya que se estimó la biomasa forestal por imagen Radar y UAV, uno al lado del otro, con la finalidad de establecer sus similitudes y diferencias, y de ello sacar conclusiones o establecer caminos futuros para mejorar el conocimiento en el tema de estimación de biomasa.

El desarrollo del proyecto, se definió en tres fases que en términos generales del proyecto se describen como:

- Fase 1 (Recopilación y levantamiento de la información geoespacial)
- Fase 2 (Estimación de la biomasa forestal)
- Fase 3 (Comparación y validación de datos)

Inicialmente, se planificó y procesó la captura de imágenes obtenidas con UAV y Radar; a continuación, se realizaron estimaciones de la biomasa forestal a partir de ecuaciones alométricas (trabajo en campo), esta información sirvió con el fin de relacionar los modelos de Estimación de Biomasa Forestal, tanto para la imagen Radar como imágenes capturadas con UAV. Denominado de ahora en adelante, modelo de Estimación de Biomasa Forestal (1), el generado con *Backscattering*/ retrodispersión; modelo de Estimación de Biomasa Forestal (2), el creado con CMS (Crop Model Surface) y modelo de Estimación de Biomasa Forestal (3), el producido con el índice de vegetación GNDVI.

Estos modelos fueron analizados y comparados con la Estimación de Biomasa Forestal mediante ecuaciones alométricas para definir una correlación entre los dos productos. Estos procedimientos, por fases del proyecto, se ilustran en la Figura 24.

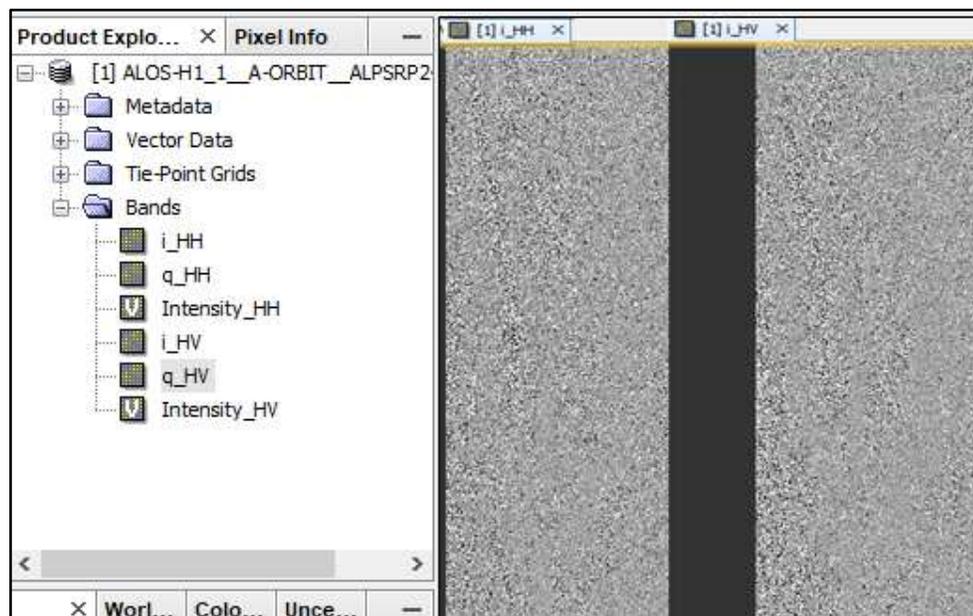


**Figura 24 Metodología general del proyecto**

### 3.2. Recopilación y levantamiento de la información geoespacial

#### 3.2.1. Recopilación de imagen Radar

Para la recopilación de la imagen Radar se contó con el portal de datos, denominado UAF (Alaska Satellite Facility's). La imagen descargada del portal, fue una ALOS PALSAR, adquirida el 10 de Septiembre de 2010, de pasada ascendente, con polarizaciones HH+HV, con un nivel de procesamiento 1.1; en la Figura 25, se observa la imagen Radar adquirida, la misma que, no dispone de ningún proceso de corrección; radiométrica y geométrica.



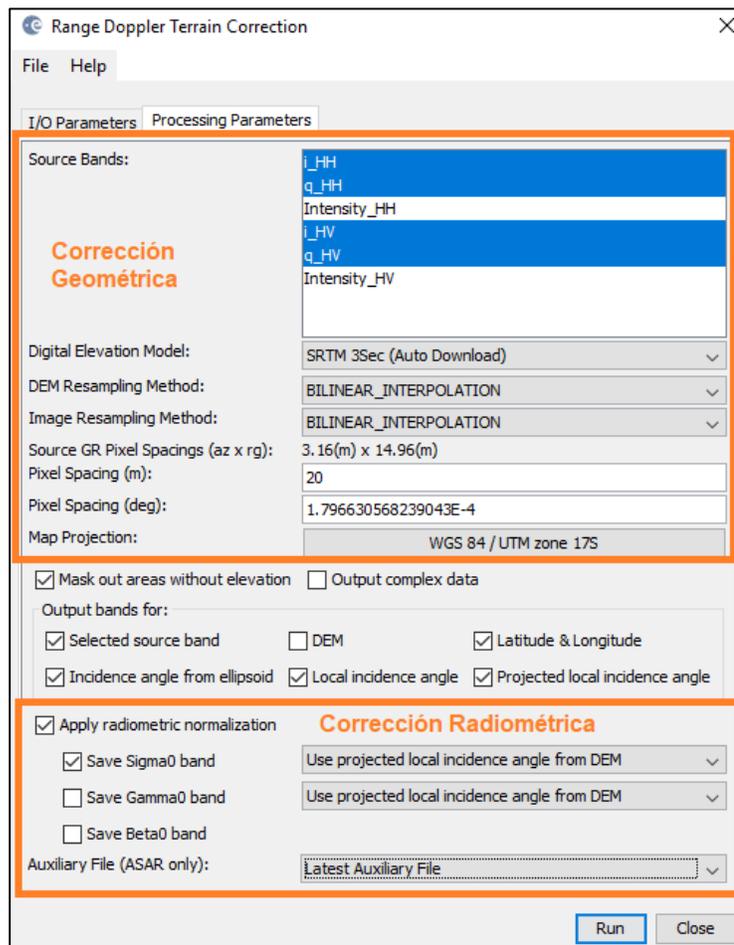
*Figura 25 Imagen Radar Alos Palsar*

- **Tratamiento de la imagen Radar**

La imagen Radar adquirida, se encuentra dentro de un fichero de datos Single Look Complex (SLC), permitiendo una reducción en el tiempo de procesamiento. El tratamiento de la imagen Radar, consistió: primero en una corrección geométrica y radiométrica, seguida por la aplicación de un filtro.

- **Corrección geométrica y radiométrica**

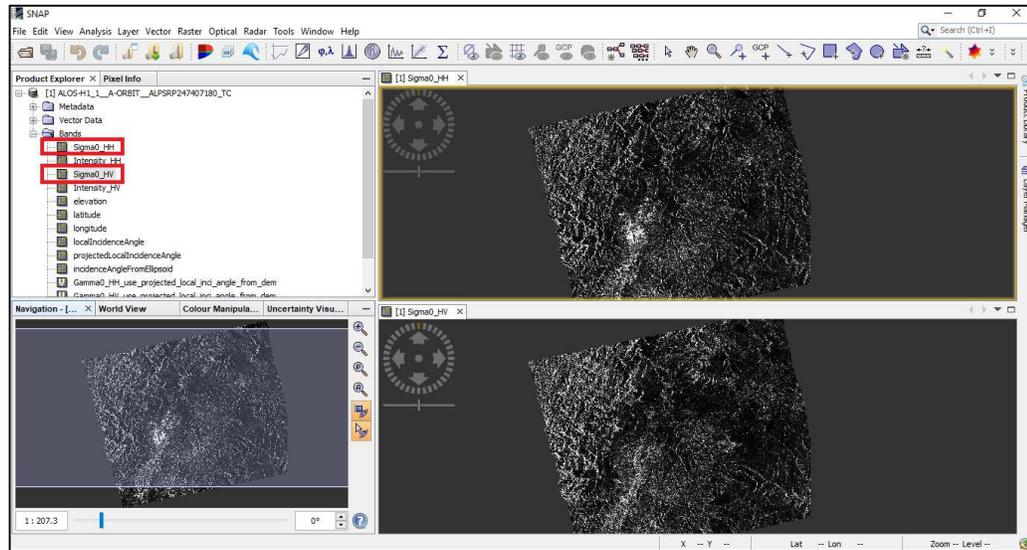
Para el desarrollo de las correcciones mencionadas, se empleó el software SNAP Desktop, mediante la opción de corrección geométrica y radiométrica que proporciona el módulo de Range Doppler Terrain Correction, como se muestra en la Figura 26.



**Figura 26** Módulo de Range Doppler Terrain Correction

Se eligió un tamaño de píxel de 20 m, a fin de relacionar el tamaño del píxel de la imagen ortorectificada con el muestreo de vegetación. En la Figura 27 se observa la

imagen radar corregida, con sus respectivas bandas de interés (Sigma0\_HV y Sigma0\_HH).



**Figura 27 Imagen Radar corregida geoméricamente y radiométricamente**

- **Speckle Filter**

En la anterior se observa la imagen Radar afectada en mayor o menor grado por un cierto ruido, llamado generalmente *speckle*, que aparece como una textura granulada en toda la imagen o como un efecto de “sal y pimienta”. En general, es un ruido indeseado que degrada la calidad final de la imagen y dificulta la interpretación de la misma. Para mejorar la calidad de la imagen, se aplicó un filtro denominado “Speckle Filter” del software SNAP Desktop.

Los pasos a realizarse para el tratamiento de la imagen Radar, se encuentran en el anexo 1 y en el ítem 4.1.1 de resultados, se observa la imagen Radar tratada y/o estandarizada con sus respectivas bandas de interés (Sigma0\_HV y Sigma0\_HH); además la imagen tratada fue almacenada en una geodatabase totalmente estructurada(ver ítem 3.2.3).

### 3.2.2. Captura y proceso de imágenes obtenidas mediante UAV (Unmanned Aerial Vehicle)

A continuación, en la Figura 28 se puede apreciar la metodología utilizada para la captura y proceso de imágenes obtenidas por UAV.



**Figura 28 Captura y proceso de imágenes obtenidas por UAV**

- **Plan de vuelo**

El plan de vuelo es la primera fase hacia la captura o levantamiento de imágenes con tecnología UAV, fue importante conocer la zona de estudio y observar variables que puedan afectar a la seguridad de esta tecnología, logrando así, delimitar una zona de estudio adecuada.

Se realizaron dos planes de vuelo y dos vuelos, tanto para la cámara RGB y BGNIR respectivamente; mediante la aplicación móvil “PrecisionFlight for DJI”; esta aplicación gratuita cuenta con una interfaz de usuario altamente intuitiva, que crea fácilmente planes de vuelo y guían automáticamente al avión no tripulado en la captura de imágenes aéreas. Para los dos planes de vuelo, se delimitó la misma zona de vuelo y los mismos parámetros iniciales, indicados en la Tabla 15.

**Tabla 15**

**Parámetros iniciales y resultantes del plan de vuelo**

<b>Parámetros iniciales</b>	Área	40,8 ha
	Altura del vuelo	120 m

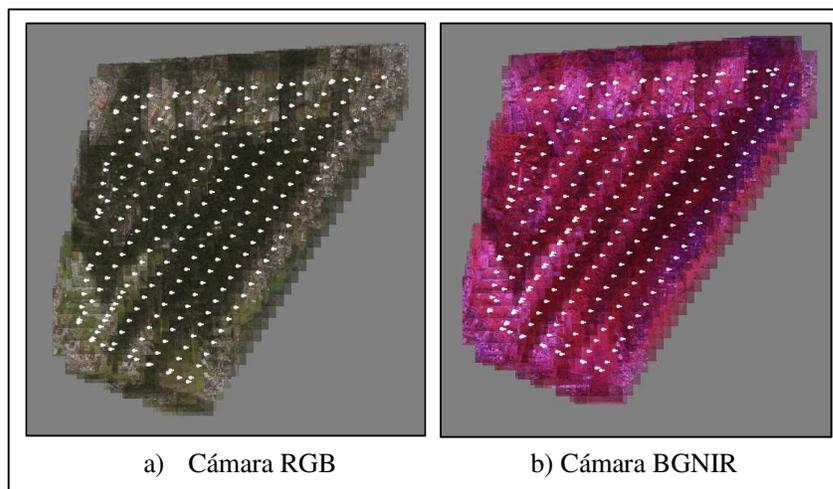
➡ Continua

	Traslado Longitudinal	80 %
	Traslado Transversal	60 %
<b>Parámetros resultantes</b>	GSD	3.8 cm
	Vuelos estimados	2
	Número de imágenes	249
	Líneas de vuelo	11

- **Captura de imágenes RGB y multiespectral BGNIR**

Se procede a la captura de imágenes con el UAV DJIMatrice100, sus características están especificadas en el ítem 2.7.2; utilizando dos cámaras en vuelos diferentes: Zenmuse X3, para imágenes RGB y BGNIR.

El tamaño de píxel o GSD resultante es calculado automáticamente por la aplicación *PrecisionFlight*, en la Tabla 15, se visualizan los parámetros iniciales y resultantes del vuelo con UAV. En la Figura 29, se observa la captura de las imágenes, y en el anexo 2 se muestra el proceso del plan de vuelo; además todas las imágenes resultantes se almacenaron en una Geodatabase.



**Figura 29 Plan de vuelo en el software *PrecisionFlight***

- **Puntos de apoyo fotogramétrico o Ground Control Points (GCP)**

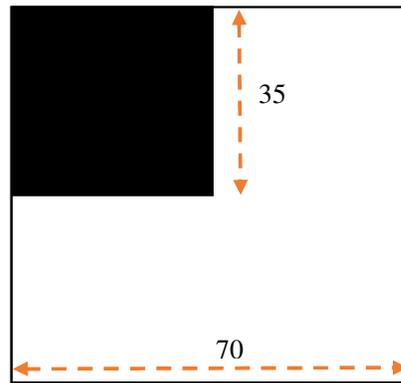
La obtención de los puntos de apoyo fotogramétrico o Ground Control Points, se necesitaron con el fin de orientar el bloque en el sistema de coordenadas terrestre, además, permite que el software fotogramétrico, genere un proceso de ortorectificación con coordenadas de alta precisión.

Se determinaron diez puntos de control dentro de la zona de estudio (ver Figura 30); se materializaron mediante estacas de 30 cm de longitud y fueron distribuidos de forma tal, que cubran el área de vuelo y en zonas abiertas que permitan la colocación de los objetos identificables (marcas) necesarias para la generación de las ortomosaico.



*Figura 30 Distribución de puntos de control fotogramétrico*

Las marcas se colocaron en el centro de cada punto de control; a través de un cuadrado de cartulina de color blanco de 0.70 cm de lado y sobreponiendo en la parte superior izquierda, un cuadrado de cartulina de color negro de 0.35 cm de lado (mostradas en la Figura 31), para poder tener el contraste necesario en su identificación.



**Figura 31 Marca**

- **Levantamiento Geodésico**

El levantamiento geodésico de los puntos de apoyo fotogramétrico se realizó desde el 4 al 6 de septiembre del 2017. Para realizar el rastreo GNSS (Global Navigation Satelital System), se contó con el equipo Trimble 5800 (L1/L2), se utilizó el método de posicionamiento estático, observando cada punto, un mínimo de una hora y con un intervalo de registro de 30 segundos (ver Figura 32).



**Figura 32 Toma GCP**

Posteriormente, el post-proceso de los puntos de apoyo fotogramétrico se lo realizó en el software “Trimble Business Center”, utilizando la estación EPEC de la Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador (REGME), estableciendo como sistema de referencia, para términos prácticos, el World Geodesic System 1984

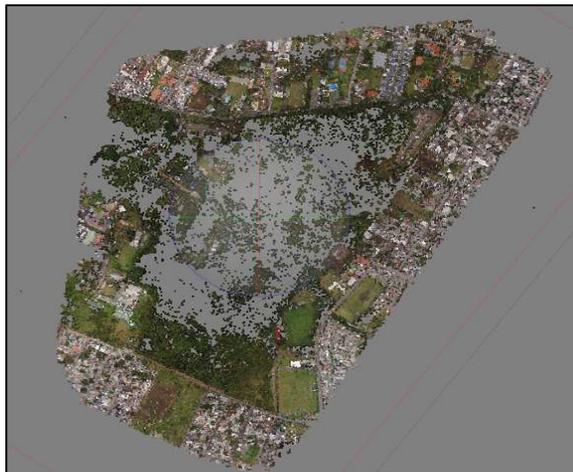
(WGS84), con elipsoide geocéntrico WGS84; además, según el Instituto Geográfico Militar (IGM, 2016) el sistema de proyección cartográfico de representación para el Ecuador, es la proyección conforme Universal Transversa Mercator (UTM).

Las características de: ubicación, coordenadas, descripción y marcas, se encuentran detalladas en las monografías de cada uno de los puntos (ver Anexo 3). Los resultados del procesamiento de los puntos de control, se encuentran en el ítem 4.1.2.

- **Ajuste automático del proyecto fotogramétrico**

Para realizar el ajuste fotogramétrico de las imágenes obtenidas con ambas cámaras, se empleó el software Agisoft PhotoScan Professional, este software utiliza las coordenadas de los centros de exposición de cada imagen, para luego realizar la aéreo-triangulación y finalmente, reconstruir el bloque fotogramétrico. El software inicialmente trabaja con las coordenadas capturadas durante el vuelo por la antena de la aeronave.

Toda la reconstrucción del bloque fotogramétrico se realizó de manera automática, ya que el software reconoce y procesa los metadatos encriptados de cada imagen, estos metadatos encriptados contienen la orientación interna y los ángulos omega, phi y kappa. Cumplida la reconstrucción del bloque fotogramétrico, el software genera automáticamente puntos de amarre (Tie points) para construir la ortofoto a priori (ver Figura 33).



***Figura 33 Tie points generado por PhotoScan***

- **Ajuste del proyecto fotogramétrico con puntos de control (GCP)**

Luego del ajuste automático del proyecto fotogramétrico, se realizó la ortorectificación; se importaron al PhotoScan las coordenadas de los GCP, los cuales sirvieron con el objetivo de ajustar los dos proyectos fotogramétricos al sistema de referencia. Al pinchar los puntos en todas las imágenes necesarias, se ajustaron los bloques a coordenadas verdaderas (ver Figura 34), obteniendo como resultado: una ortofoto ortorectificada de cada proyecto fotogramétrico, tanto para cámara RGB y BGNIR; y un MDS con el proyecto fotogramétrico con cámara RGB, enlazados cada uno al sistema de sistema de proyección cartográfico. Estos modelos se observan el ítem 4.1.1 del capítulo de Resultados. El detalle completo del procedimiento se encuentra descrito en el anexo 4 y sus resultados almacenados en una Geodatabase.



*Figura 34 Puntos de control (GCP) del proyecto*

### **3.2.3. Recopilación y almacenamiento de la cartografía básica y MDT de la zona de estudio**

Toda la información requerida para el desarrollo del presente proyecto, fue recopilada de organismos oficiales encargados de generar la información geográfica. La cartografía básica; se descargó del portal web “Gobierno abierto del Municipio del

Distrito Metropolitano de Quito (MDMQ)” y el MDT, se obtuvo mediante oficio al MDMQ.

Dentro del ítem 4.1.3 del capítulo de Resultados, se detallan cada uno de los archivos recopilados, como son:

- Límite del parque metropolitano la Armenia
- Ortomosaico
- MDT

Todos los resultados que se generen en cada proceso metodológico e información recopilada se procederán a almacenar en una geodatabase denominada “Base\_Datos\_La\_Armenia”, la cual dispone de su modelo lógico, como se puede observar en la Figura 35.

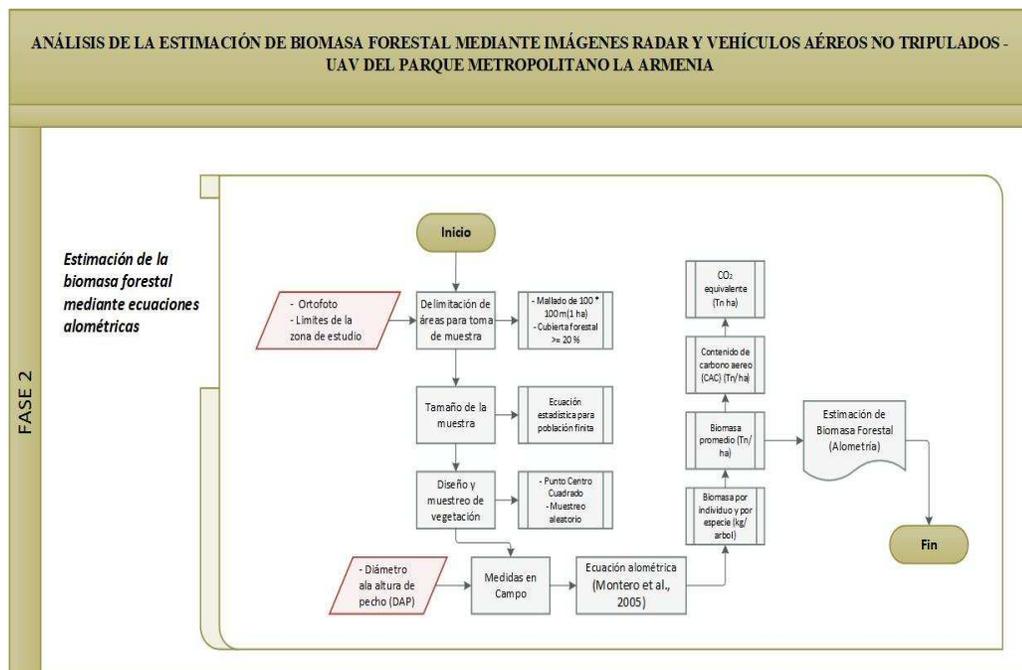
GDB	Feature Dataset
Base_Datos_La_Armenia	CARTOGRAFIA_BASE
	<b>Raster Dataset</b>
	ARCHIVO_MDMQ
	IMÁGEN_RADAR
	IMAGENES_UAV
	RESULTADO_RADAR
	RESULTADO_UAV_CMS
RESULTADO_UAV_GNDVI	

*Figura 35 Modelo Lógico de la base de datos geográfica*

### 3.3. Análisis de las metodologías de estimación de biomasa

#### 3.3.1. Estimación de biomasa mediante ecuaciones alométricas

A continuación, en la Figura 36 se explica la metodología de la estimación de biomasa por ecuaciones alométricas de forma general.



**Figura 36 Metodología para Estimación de la Biomasa Forestal mediante ecuaciones alométricas**

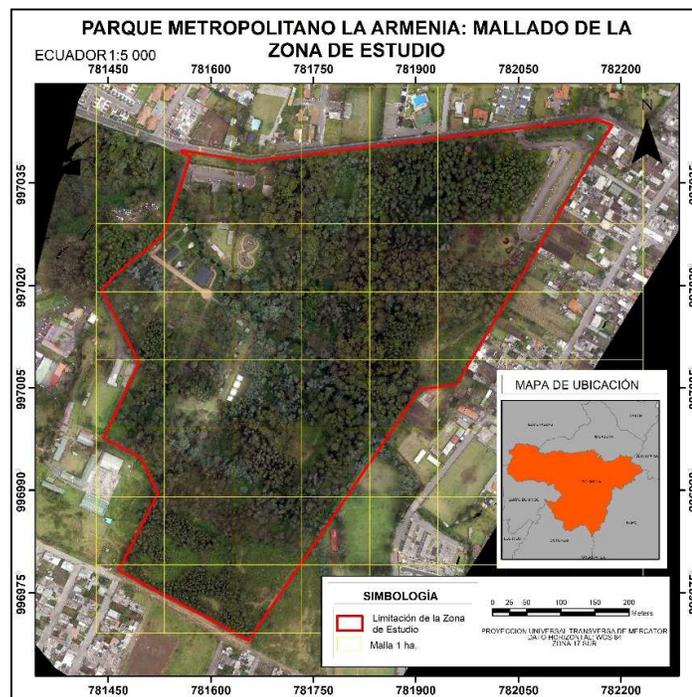
- **Delimitación de áreas para toma de muestras**

El ortomosaico y los límites obtenidos en la fase previa (Fase 1), se utilizaron para definir la cobertura forestal; las mismas que tienen características especiales como son:

- Zonas forestales: aquellos terrenos con una cubierta forestal, es decir, con árboles cuyas coronas cubran más del 20% de la superficie de un terreno y deben ser mayor o igual a 1 hectárea. (Coll & Vehi, 1999).

Esta definición, se lo realizó mediante el uso de herramientas SIG y de procesos de interpretación de imágenes, con la finalidad de discriminar las áreas de bosque a considerar.

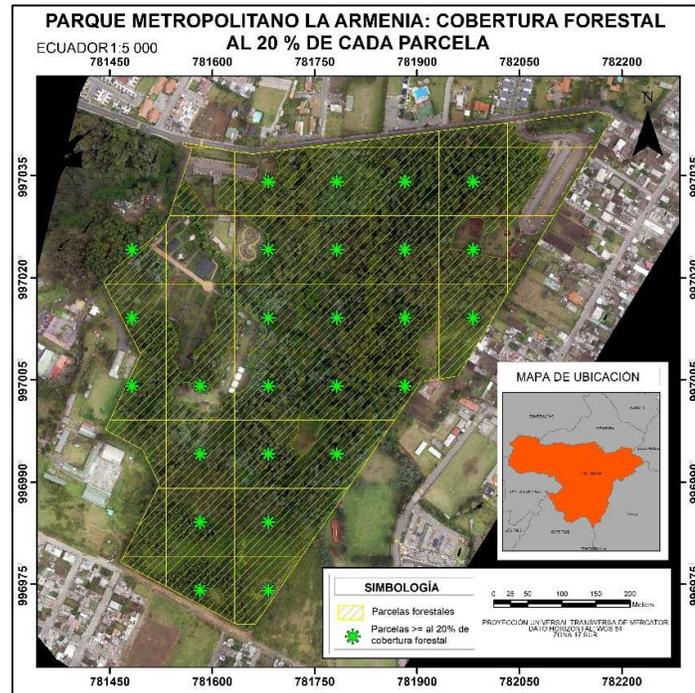
Una vez seleccionado el bosque, se procedió a parcelar la zona de estudio, mediante un mallado de 100 x 100 m. (1ha) recomendado por Leblanc (2004); cubriendo así, el área del proyecto (ver Figura 37).



*Figura 37 Mallado de 100x100 m. (1ha)*

Siguiendo la idea anterior, se procede a la selección de zonas forestales; es decir, con árboles cuyas coronas cubran más del 20% de la superficie de una hectárea, este proceso fue necesarios para elegir un método de muestreo apropiado.

En la Figura 38, se aprecia el mallado de una hectárea de color amarillo; en cambio, con el símbolo de asterisco (color verde), se contrastan las parcelas que cumplieron correctamente con la definición de zonas forestales (coronas que cubren más del 20% de la superficie).



*Figura 38 Cobertura forestal al 20%*

- **Tamaño de la muestra**

En cuanto al tamaño de la muestra, se consideró el proceso anterior; de selección de cobertura forestal con un mínimo de 20% de contenido dentro de cada parcela de estudio; permitiendo definir una población finita de parcelas ( $N = 26$ ) y aplicando la ecuación estadística numero [14]; con la cantidad de muestra sería:

$$n = \frac{26 \cdot 1.96^2 \cdot 0.05 \cdot 0.95}{0.20 \cdot (26 - 1) + 1.96^2 \cdot 0.05 \cdot 0.95} = 13 \text{ parcelas}$$

- **Diseño del muestreo**

Definido el tamaño de muestra, es necesario que sean distribuidos en toda el área del proyecto. En los estudios ecológicos de vegetación, el diseño del muestreo es la parte que requiere mayor cuidado, ya que éste determina el éxito potencial del mismo.

Este proceso se lo realizó mediante un análisis de muestreo aleatorio simple; según Rojas (2015), este muestreo proporciona una equidad en las probabilidades de ser seleccionados, considerando que la elección de una parcela no influya en las siguientes parcelas (ver Figura 39).



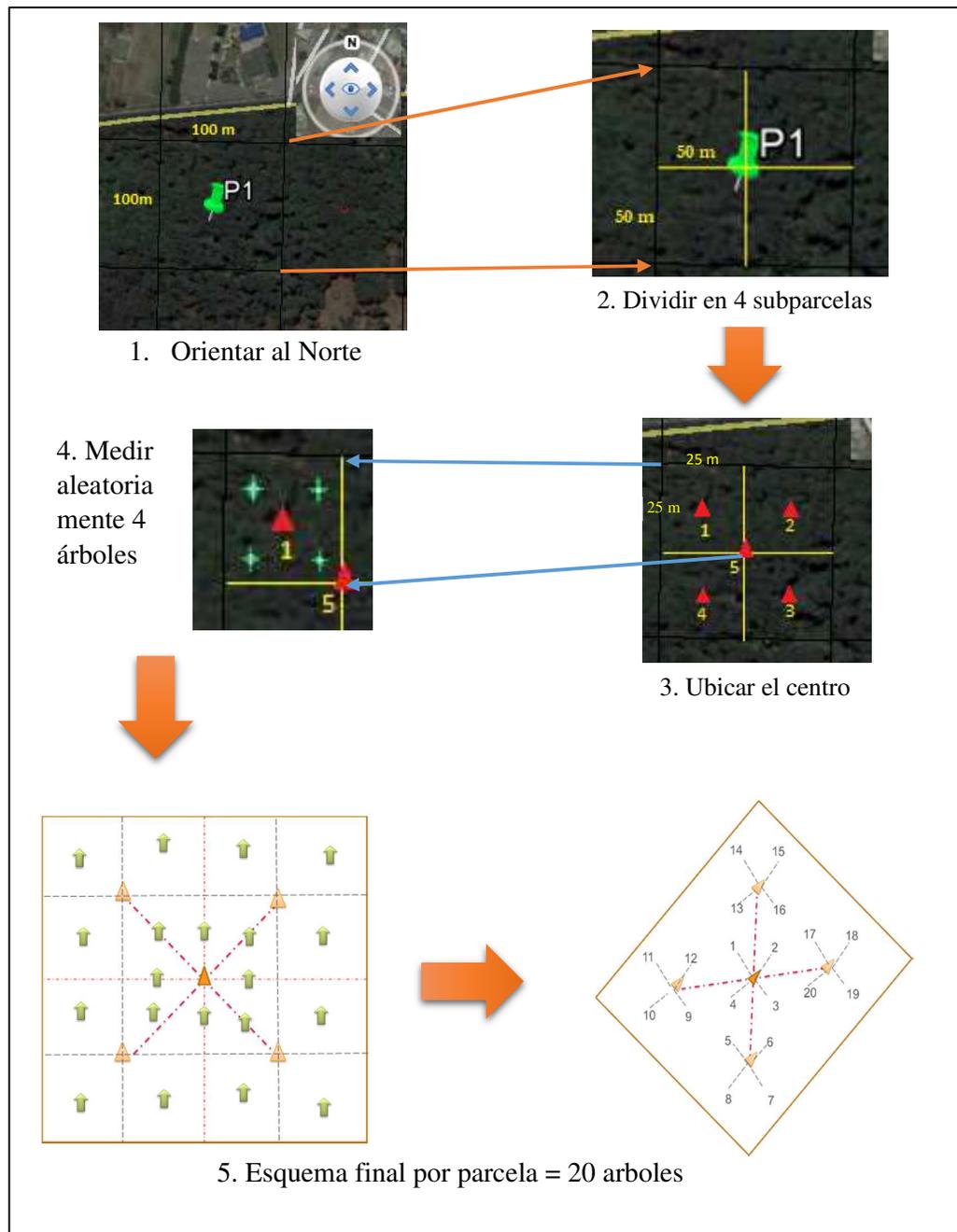
*Figura 39 Selección de parcelas para muestreo*

- **Elección del tipo de muestreo de vegetación**

Con la determinación de las zonas idóneas para el muestreo de campo, se definió un tipo de muestreo de vegetación para las mediciones forestales típicas (medidas del árbol); en este sentido, se ha adaptado la metodología de punto centro cuadrado descrito en el ítem 2.13.2.

Por lo cual, en el desarrollo de esta metodología, lo primero que se hizo, fue extraer las coordenadas del centro de cada parcela y localizarlas en campo mediante un equipo GPS navegador; con ayuda de una brújula se orientó uno de los vértices al norte e imaginariamente se procedió a subparcelar cada parcela en 4 partes; localizando sus puntos medios e incluido el punto medio de la parcela total, en efecto se tiene 5 puntos por cada parcela.

Con la determinación de estos puntos, se midieron 4 árboles por cada punto medio, teniendo que medir en total 20 árboles por parcela, todo este proceso se detalla en el esquema de la figura 40.



**Figura 40 Metodología punto - centro – cuadrado**

- **Medidas de Campo**

La medición forestal más común, es el diámetro a altura de pecho (DAP); las mediciones del DAP fueron utilizadas con la finalidad de calcular las estimaciones de biomasa forestal de cada individuo arbóreo. Tomar la medición del DAP de un árbol es relativamente fácil de hacerlo (ver Figura 41).



*Figura 41 Medición del DAP*

En el desarrollo del proyecto, se tomó el diámetro superior a 10 cm de acuerdo a Brown (1997); en varios estudios demuestran que el  $DAP < 10$  cm representa menos del 5% de biomasa, además según Rojas (2015) menciona que este umbral asegura que la mayoría de los árboles contribuyen al total de la biomasa sobre el suelo.

Se recolectaron las medidas del árbol en una hoja de campo propuesta, la misma que tiene la finalidad, de llevar el registro de la información adquirida de manera física, en el Anexo 5, se registran todas las hojas de campo procedente del proyecto.

- **Estimación de biomasa forestal**

Una vez adquirida la información del DAP, estas fueron tabuladas en hojas de cálculo por cada parcela de estudio, a fin de obtener los resultados de estimación de biomasa en toneladas métricas, de acuerdo a lo detallado en el ítem 3.3.1; para esto, fue necesario el siguiente procedimiento:

1. Se calculó la biomasa por cada individuo/especie mediante la aplicación de las ecuaciones [7] y [8], con los parámetros descritos en la Tabla 10; en el anexo 6 se muestra los resultados de biomasa por individuo y en la Figura 42 se observa un ejemplo del cálculo realizado para la parcela 1.

Especie:		Pinus Radiata		
Expresión Logarítmica para estimación de biomasa (ELB)				$y = \alpha + \beta \ln(d)$
No. Parcela : 1	$\alpha$ (BAT)	-2,61093	CF <sub>BAT</sub>	1,018852146
	$\beta$ (BAT)	2,48739		
No. árbol	ESTE	NORTE	DAP (1.30m, >10 cm)	LN(ELB <sub>BAT</sub> (kg))
1	781979,97	9970340,07	113	9,369606878
2	781979,97	9970340,07	122	9,563817132
3	781979,97	9970340,07	116	9,436011095
4	781979,97	9970340,07	127	9,665609234
5	781979,97	9970340,07	130	9,724778053
6	781979,97	9970340,07	126	9,645575275
7	781979,97	9970340,07	71	8,191905609
8	781979,97	9970340,07	122	9,563817132
9	781979,97	9970340,07	119	9,500719699
10	781979,97	9970340,07	112	9,347079772
11	781979,97	9970340,07	117	9,457764728
12	781979,97	9970340,07	105	9,183520919
13	781979,97	9970340,07	134	9,801580374
14	781979,97	9970340,07	93	8,875958206
15	781979,97	9970340,07	136	9,839125989
16	781979,97	9970340,07	135	9,820422711
17	781979,97	9970340,07	115	9,414069117
18	781979,97	9970340,07	128	9,685486063
19	781979,97	9970340,07	134	9,801580374
20	781979,97	9970340,07	127	9,665609234

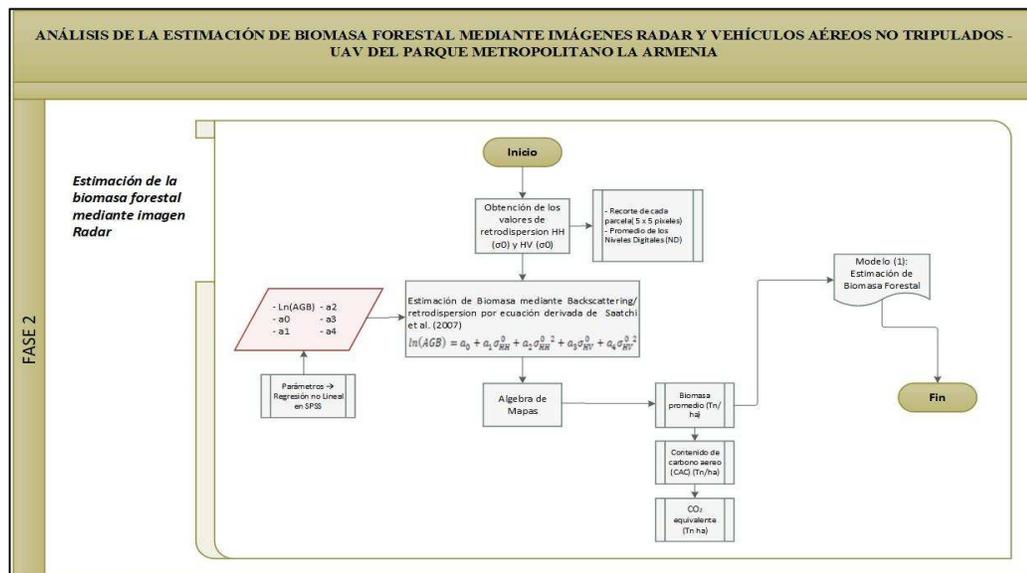
*Figura 42 Cálculo de biomasa individual de la parcela 1*

2. Por otro lado, el cálculo realizado anteriormente se expresa en unidad de kg/individuo; a fin de obtener en unidades de biomasa (Tn /ha), se aplicó la ecuación [9].
3. Por consiguiente, se usó el factor 0,5 para transformar la biomasa forestal en contenido de carbono aéreo (CAC).
4. Finalmente, al paso anterior, se aplicó la ecuación [10], para calcular el CO<sub>2</sub> equivalente.

En el ítem 4.2 del capítulo de Resultados, mediante la Tabla 18 se resumen los resultados obtenidos de la estimación de biomasa por ecuaciones alométricas (medidas en campo), valores estimados por hectárea.

### 3.3.2. Estimación de biomasa mediante imagen Radar

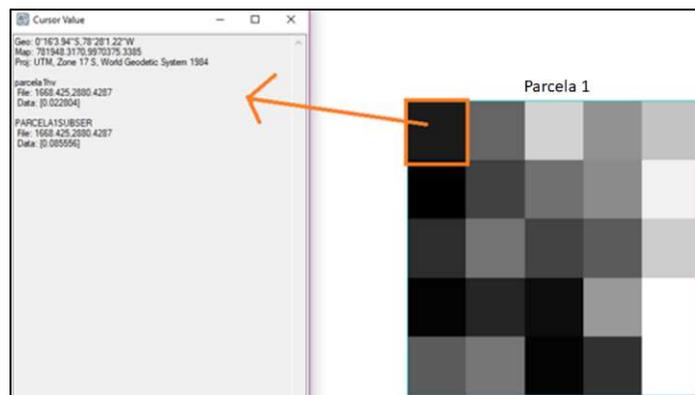
A continuación, en la Figura 43 se explica de manera general, el proceso metodológico de la estimación de biomasa por imagen Radar.



**Figura43 Metodología para Estimación de la Biomasa Forestal mediante imagen Radar**

Para la determinación de biomasa mediante Radar, se empleó la ecuación [11] derivada de Saatchi et al. (2007); ya que a través de varias investigaciones, como por ejemplo: la investigación de Carreiras, et al., (2012), se demuestra una clara relación entre la banda L que posee una imagen ALOS PALSAR, con la estimación de la biomasa forestal.

El primer paso para el desarrollo de esta metodología, fue la obtención de los coeficientes de retrodispersión de la imagen Radar, tanto para la polarización HH ( $\sigma_{HH}^0$ ) y HV ( $\sigma_{HV}^0$ ), de cada parcela de muestreo; como se mencionó en el ítem 3.3.1, estas áreas fueron seleccionadas a partir de una malla de 100 x 100 metros, lo que corresponde a un conjunto de 5 x 5 píxeles (ver Figura 44). La extracción de los niveles digital (ND) de cada parcela, se realizó mediante un promedio de los ND del conjunto 5x5 de cada parcela, a fin de relacionar esta información con los datos obtenidos de las medidas de campo.



**Figura 44 Nivel Digital del pixel**

El segundo paso es el establecimiento de los coeficientes presentes en la ecuación [13], siendo estos;  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ , y  $a_4$ , estos coeficientes se obtuvieron a partir de una regresión no lineal en el software estadístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences); para lo cual, se relacionaron los datos de alometría con los niveles digitales promedio de la imagen Radar, mencionadas anteriormente.

A partir de la obtención de los coeficientes, se generó una banda, mediante la herramienta “band math” del software ENVI. Aplicando la ecuación [11], se obtuvo el modelo 1 de Estimación de Biomasa Forestal mediante imagen Radar. Los

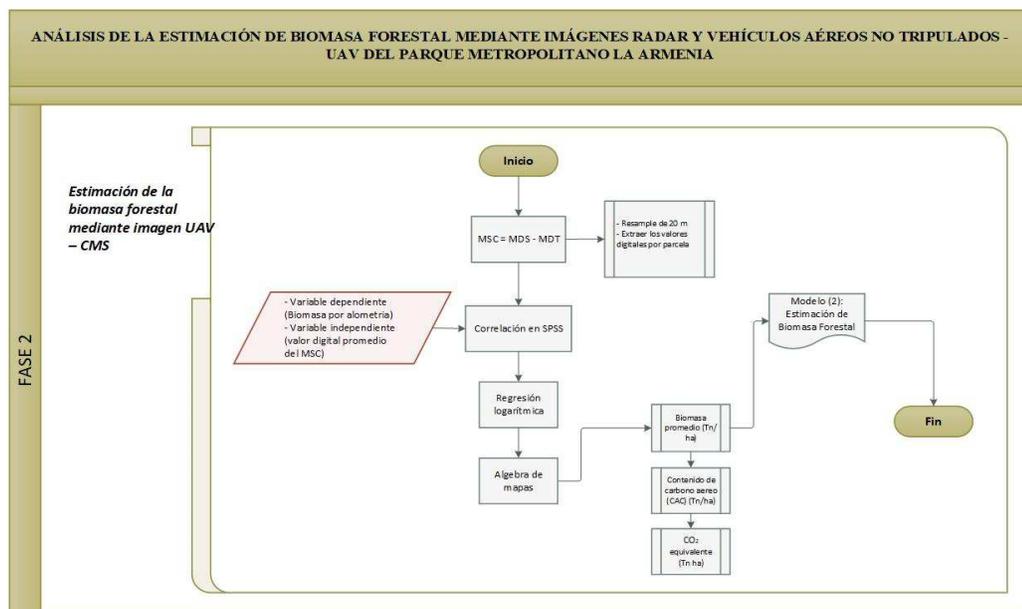
resultados se describen en la Tabla 19 del ítem 4.3 y el proceso se encuentra explicado en el anexo 7.

### 3.3.3. Estimación de biomasa mediante imágenes UAV

- **Estimación de biomasa mediante CMS (Crop Model Surface)**

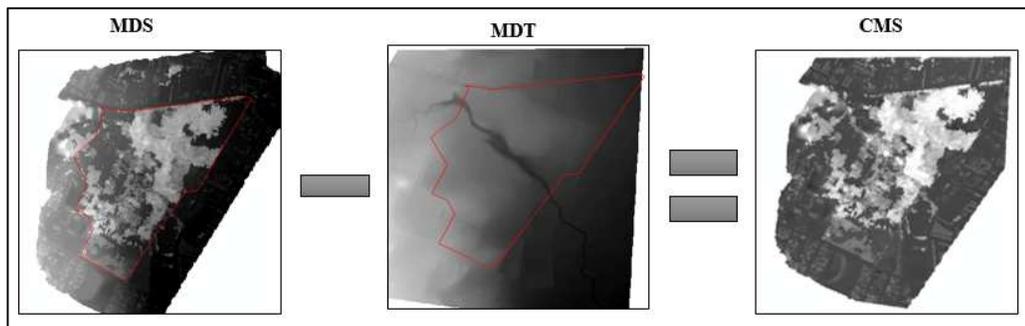
Entre las diferentes variables medidas en un árbol, normalmente, existe algún tipo de relación; una de esas relaciones, bastante usada en el área forestal, es la relación entre la altura del árbol y el DAP. En general, a mayor DAP mayor es la altura del árbol.

La medición de la altura es costosa y difícil que la medición del DAP (Cancino, 2006); por esta razón, y debido a que existe una estrecha relación entre la altura de un árbol y el diámetro de fuste, se propuso medir dicha altura a través del uso del Crop Model Surface (CMS); con el objetivo de relacionar esta medida con la biomasa estimada por ecuaciones alométricas, en donde su principal parámetro es el DAP. Esta metodología se explica en la Figura 45 de manera general.



**Figura45 Metodología para Estimación de la Biomasa Forestal mediante CMS**

El primer paso fue realizar el CMS, que se calcula mediante la diferencia entre el MDS con cámara RGB generado en el ítem 3.2.2 y el MDT frecopilado por el MDMQ, logrando obtener la altura de los árboles de la zona de estudio. Una vez obtenido el CMS (ver Figura 46), se realizó un resample a 20m con el objetivo de relacionar el muestreo de vegetación y también con la metodología descrita en el ítem anterior (Radar).



**Figura 46 Obtención del CMS (Modelo de superficie de cultivo)**

Al listado de las parcelas con datos de biomasa (alometría), se agregó el valor digital (VD) promedio del CMS; se aplicó una correlación, utilizando el software estadístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), permitiendo generar un modelo logarítmico de regresión entre el factor dependiente (biomasa por alometría) e independiente (VD del MSC); el ajuste del modelo logarítmico se encuentra en la Figura 67 del ítem 4.4.1 del capítulo de Resultados.

A partir del modelo logarítmico, se generó una nueva banda, mediante la herramienta “band math” del software ENVI; aplicando la ecuación [15] resultante del modelo logarítmico, se obtuvo el modelo 2 de Estimación de Biomasa Forestal mediante CMS (Crop Model Surface).

$$y = 5,5784\ln(x) + 39,092 \quad [15]$$

Donde:

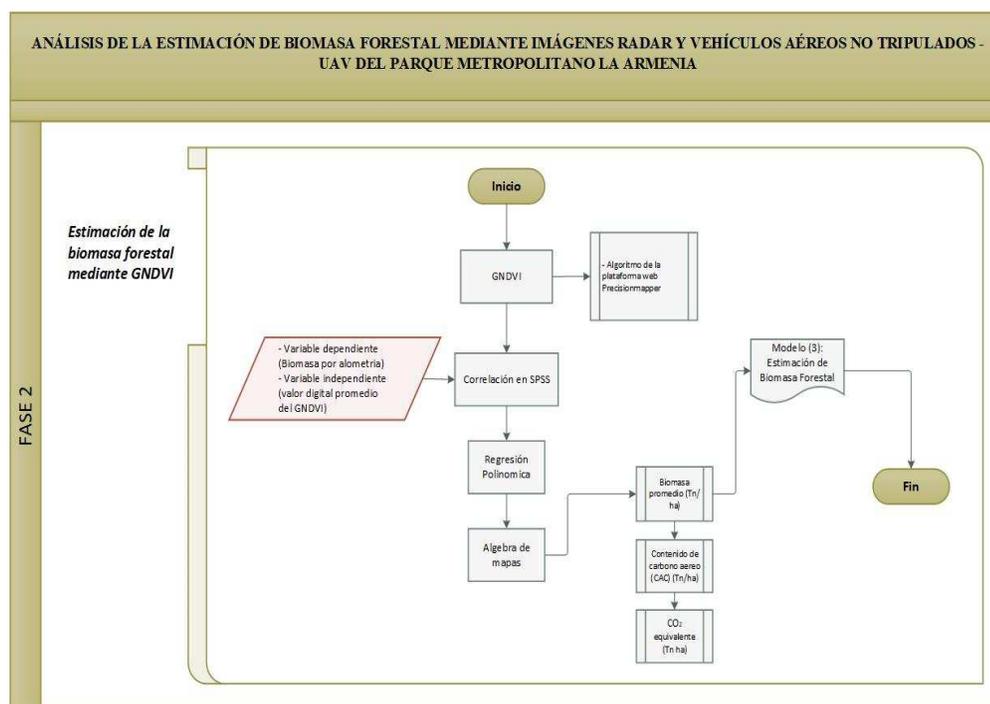
y = variable dependiente → Biomasa aérea forestal (tn/ha)

$x$  = variable independiente → Valor digital del CMS

Los resultados se describen en la Tabla 20 del ítem 4.4.1 y el proceso más detallado se encuentra en el anexo 8.

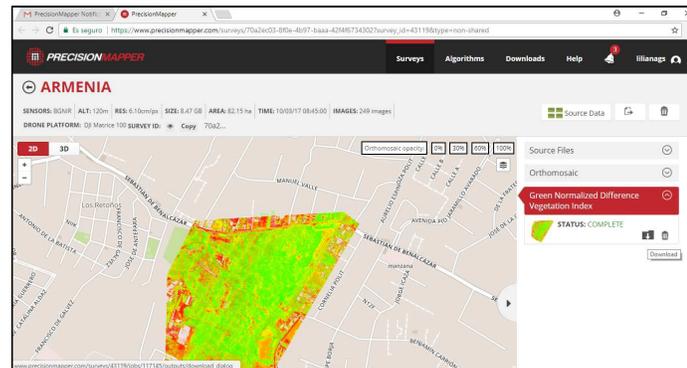
- **Estimación de biomasa mediante GNDVI**

A continuación, en la Figura 47 se explica de manera general, el proceso metodológico de la estimación de biomasa por GNDVI.



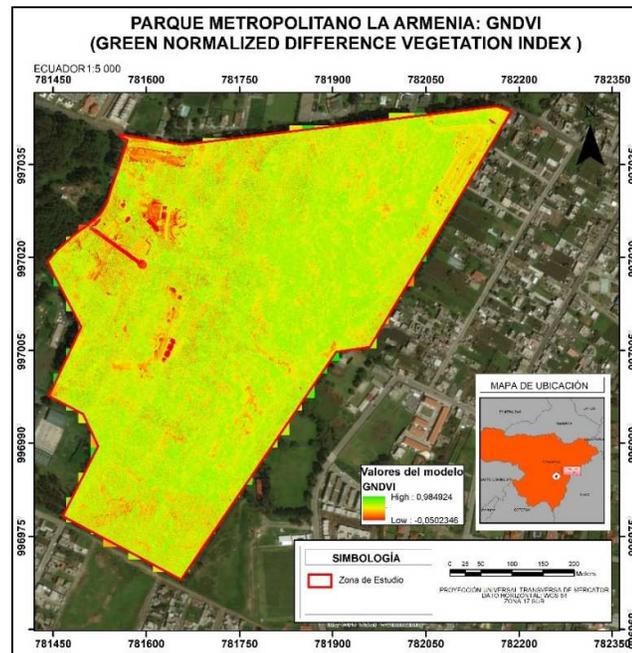
**Figura47 Metodología para estimación de la Biomasa Forestal mediante GNDVI**

Para la determinación de biomasa mediante esta metodología, inicialmente se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada verde (GNDVI), a través del servidor web PrecisionMapper (ver Figura 48), el cual funciona con conexión a internet y pago de suscripción. Gitelson et al., (1996), propusieron el uso del este índice para estimar la biomasa aérea de cultivos; además, se demostró en la investigación realizada por Moges, et al., (2004), que este índice se correlacionó de forma más consistente con la biomasa, logrando obtener un correlación aceptable y útil para evaluar la variación del dosel.



**Figura 48 Generación del GNDVI**

El siguiente paso, fue descargar el GNDVI en formato raster del portal web PrecisionMapper (ver Figura 49), así mismo se realizó un resample a 20m con el objetivo de relacionar el muestreo de vegetación y con las metodologías descritas en los ítems anteriores sobre Radar y CMS.



**Figura 49 Modelo GNDVI del PresicionMapper**

Siguiendo la idea anterior, al listado de las parcelas con datos de biomasa por alometría, se agregó el valor digital (VD) promedio del GNDVI; se aplicó una

correlación, a través del software estadístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), permitiendo generar un modelo de regresión cuadrática entre las variables: dependiente (biomasa por alometría) e independiente (VD del GNDVI), el ajuste del modelo se encuentra en la Figura 70 ítem 4.4.2 del capítulo de Resultados.

A partir del modelo cuadrático, se generó una banda, mediante la herramienta “band math” del software ENVI; aplicando la ecuación [16] resultante del modelo cuadrático, se obtuvo el modelo 3 de Estimación de Biomasa Forestal mediante GNDVI.

$$y = -3122,3x^2 + 4230x - 1376,1 \quad [16]$$

Donde:

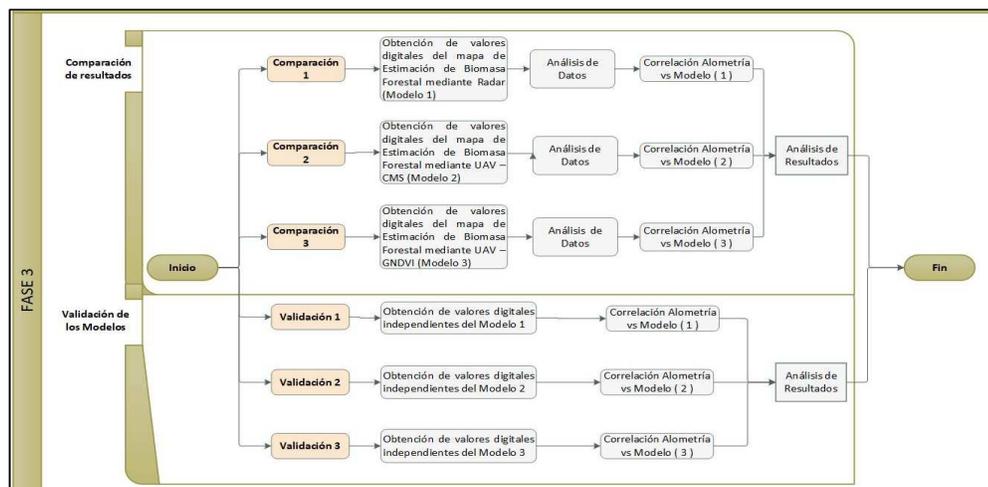
$y$  = variable dependiente → Biomasa aérea Forestal (tn/ha)

$x$  = variable independiente → valor digital del GDVI

Los resultados se describen en la Tabla 21 del ítem 4.4.2 del capítulo de Resultados y el proceso más detallado se encuentra en el anexo 9.

### 3.4. Control de calidad

En la Figura 50, se explica de manera general la metodología que se siguió en este ítem.



**Figura 50 Metodología de la Fase 3 del proyecto**

### 3.4.1. Análisis de la comparación de las diferentes metodologías

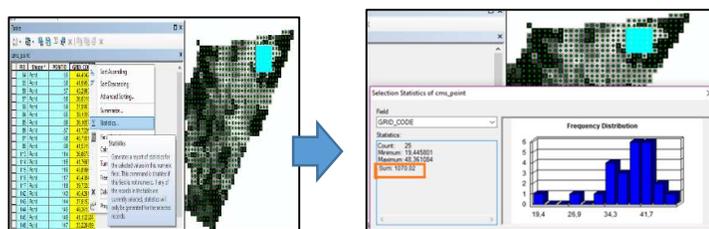
Se realizaron tres comparaciones:

- Correlación 1: Biomasa obtenida por ecuaciones alométricas (Alometría) vs. Biomasa obtenida del mapa de Estimación de Biomasa Forestal mediante Radar (Modelo 1)
- Correlación 2: Biomasa obtenido por ecuaciones alométricas (Alometría) vs. Biomasa obtenida del mapa de Estimación de Biomasa Forestal mediante UAV – CMS (Modelo 2)
- Correlación 3: Biomasa obtenido por ecuaciones alométricas (Alometría) vs. Biomasa obtenida del mapa de Estimación de Biomasa Forestal mediante UAV – GNDVI (Modelo 3)

Para las tres comparaciones se siguieron los mismos pasos que se describen a continuación:

- **Obtención de valores de biomasa entre los diferentes mapas**

Se extrajeron los valores digitales (píxeles) de cada mapa de Estimación de biomasa forestal que coincidieron espacialmente con las parcelas tomadas en campo. Para ello, se utilizó la herramienta *Raster to point* del software ArcGIS, la cual genera puntos con los valores digitales de Biomasa; luego se procede a realizar una selección por localización de los puntos que se encuentran dentro de cada parcela y así obtener la biomasa acumulada a través de la herramienta *Statistics* del mismo software (ver Figura 51), es decir, la biomasa total de cada parcela de muestreo y posteriormente esos valores fueron llenadas en una tabla de SPSS.



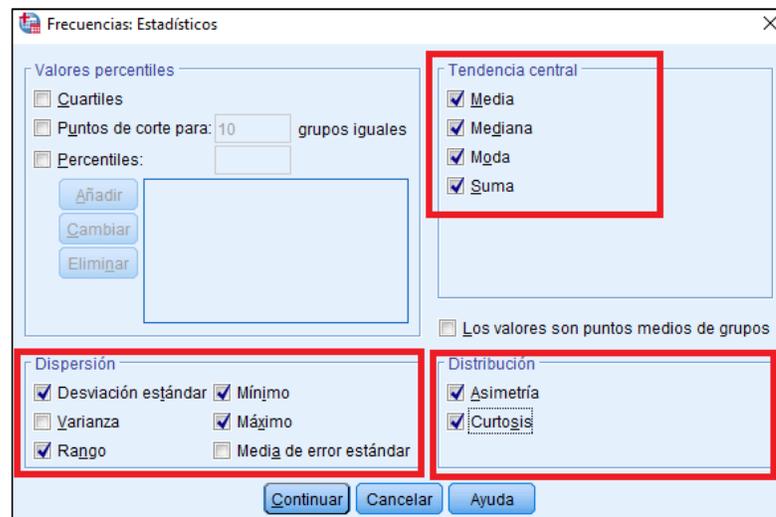
**Figura 51** Proceso para la obtención de AGB acumulada

- **Análisis de datos**

El análisis de datos tiene por objetivo, describir los datos e identificar errores o inconsistencias mediante índices y gráficos. Este análisis se realizó para los cuatro grupos de datos obtenidos:

- Valores de biomasa obtenidos por ecuaciones alométricas (Alometría)
- Valores de biomasa obtenidos por imagen Radar (Modelo 1)
- Valores de biomasa obtenidos por imagen UAV - CMS (Modelo 2)
- Valores de biomasa obtenidos por imagen UAV – GNDVI (Modelo 3)

Así mismo, se obtuvieron algunas medidas estadísticas básicas, como: media, mediana, coeficiente de asimetría, error estándar de asimetría, máximo valor, mínimo valor, suma y número de datos (ver Figura 52).



**Figura 52** *Parámetros estadísticos utilizados*

Además se construyeron histogramas para analizar gráficamente el comportamiento de los datos de acuerdo a su tendencia central; se obtuvieron diagramas de caja, con el objetivo de analizar la distribución de datos e identificar los valores atípicos en el caso

que existan. Todos los gráficos antes mencionados, se realizaron en el programa SPSS, y se muestran en ítem 4.5 del capítulo de Resultados con su respectivo análisis.

- **Correlación de la biomasa**

Se utilizó un análisis de correlación por el método de Pearson descrito en el ítem 2.14.1, con el fin de comparar las estimaciones de biomasa acumuladas, resultantes de las diferentes metodologías empleadas en este proyecto. Esta correlación proporciona la medida de intensidad de la relación lineal entre las cuatro metodologías; al momento de medir el grado en que se encuentran correlacionadas, se podrá observar la relación que tienen entre sí las diferentes metodologías.

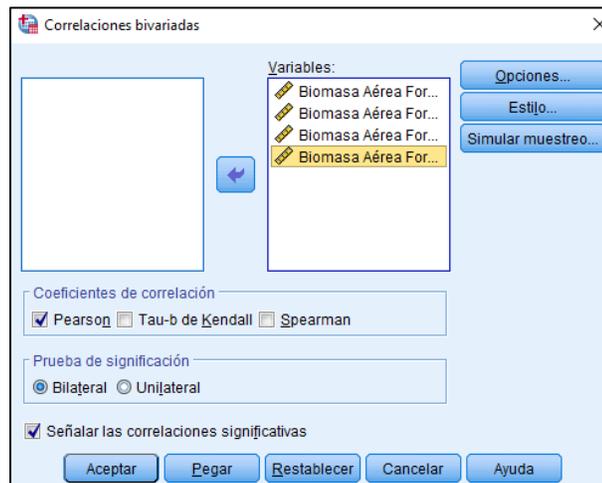
Se elaboró una tabla en la que se agruparon los cuatro conjuntos de valores de biomasa a correlacionar (ver Tabla 16).

**Tabla 16**

*Agrupación de datos obtenida por diferentes metodologías*

Sitio de Muestreo	Biomasa Aérea Forestal Acumulada por Alometría (Tn/ha)	Biomasa Aérea Forestal Acumulada por Radar (Tn/ha)	Biomasa Aérea Forestal Acumulada por UAV - CMS (Tn/ha)	Biomasa Aérea Forestal Acumulada por UAV - GNDVI (Tn/ha)
Parcela 1	1184,712	1070,092	1497,783	1153,356
Parcela 2	1090,416	710,001	1175,114	1158,098
Parcela 3	967,9644	577,031	723,279	818,933
Parcela 4	1060,939	667,642	767,038	773,527
Parcela 5	1188,078	1078,056	1155,752	1268,623
Parcela 6	1091,484	812,269	723,279	976,791
Parcela 7	1124,829	900,895	1399,377	1038,176
Parcela 8	1049,998	616,652	1082,218	1093,013
Parcela 9	1161,090	1011,501	1242,985	1211,85
Parcela 10	1150,145	992,740	1338,673	890,718
Parcela 11	1124,584	838,053	1450,061	1269,238
Parcela 12	1150,027	925,097	1410,460	1158,078
Parcela 13	962,235	391,777	679,533	713,734

Finalmente, se empleó la opción *Coefficiente de correlación* del módulo Analizar del software SPSS, la que permitió obtener los coeficientes de correlación de Pearson (ver Figura 53). Dichos valores y su discusión se encuentran detallados en el ítem 4.5.1.



**Figura 53** Modulo *Coefficiente de correlación*

En la figura anterior, se observa que las 4 variables a correlacionar tienen una prueba de significancia bilateral es decir que su análisis se encuentran con un nivel de confianza al 95%.

### 3.4.2. Validación de modelos para estimar biomasa

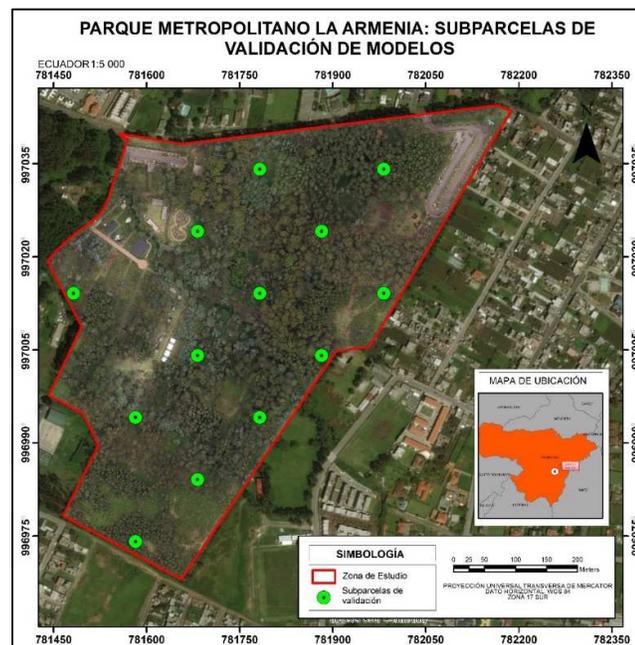
- **Obtención de valores digitales independientes de los Modelos 1, 2 y 3**

Según Molina (2016), un procedimiento riguroso de validación de un modelo consiste en verificar los resultados con una muestra independiente de la utilizada para construirlo, debido a que la bondad del ajuste no refleja necesariamente la bondad de una predicción futura.

Por otro lado, el número de parcelas (26 parcelas) que componen la población, no es numerosa y según Perez (2006), no se debe volver a calcular el tamaño de muestra para validar los resultados; puesto que el tamaño de muestra ( $n = 13$ ) utilizado

para construir los diferentes modelos representa la mitad de la población total. Además, de acuerdo al trabajo en campo realizado, muestrear 1ha de terreno representaría un gasto económico innecesario y tiempo desperdiciado; debido a esto se propuso levantar el mismo tamaño de muestra pero con parcelas de 20 \* 20 metros, ya que el tamaño de pixel de los modelos es de 20m.

Para la validación de los modelos se utilizaron 13 subparcelas, seleccionados mediante muestreo aleatorio simple (ver Figura 54). Se extrajeron los píxeles (valores digitales) de cada modelo que coincidieron espacialmente con las subparcelas tomadas en campo. Para ello, se utilizó la herramienta Sample del software ArcGIS, la cual genera una tabla que incluye las coordenadas y los valores de estimación de biomasa de los píxeles coincidentes.



*Figura 54 Subparcelas de validación de modelos*

- **Correlación de la biomasa**

Se elaboró una tabla en la que se agruparon los cuatro conjuntos de valores de biomasa a validar (Alometría, Modelo 1, Modelo 2 y Modelo 3), la cual se presenta en el ítem 4.5.3 del capítulo de Resultados.

Sitio_Muestreo	B_Alometría	B_Radar	B_CMS	B_GNDVI
1	59,43	56,93	58,74	53,34
2	54,90	54,63	46,99	45,33
3	47,60	50,87	37,22	35,23
4	45,40	49,44	36,11	12,76
5	64,15	70,91	60,68	56,41

**Figura 55 Agrupación de datos**

Finalmente, se aplicó el coeficiente de determinación  $R^2$  de la herramienta SPSS (ver Figura 56), con el propósito de comprobar la bondad del ajuste del modelo de regresión lineal, el cual se puede interpretar cualitativamente según la Tabla definida por Díaz (2015).



**Figura 56 Herramienta de correlación  $R^2$**

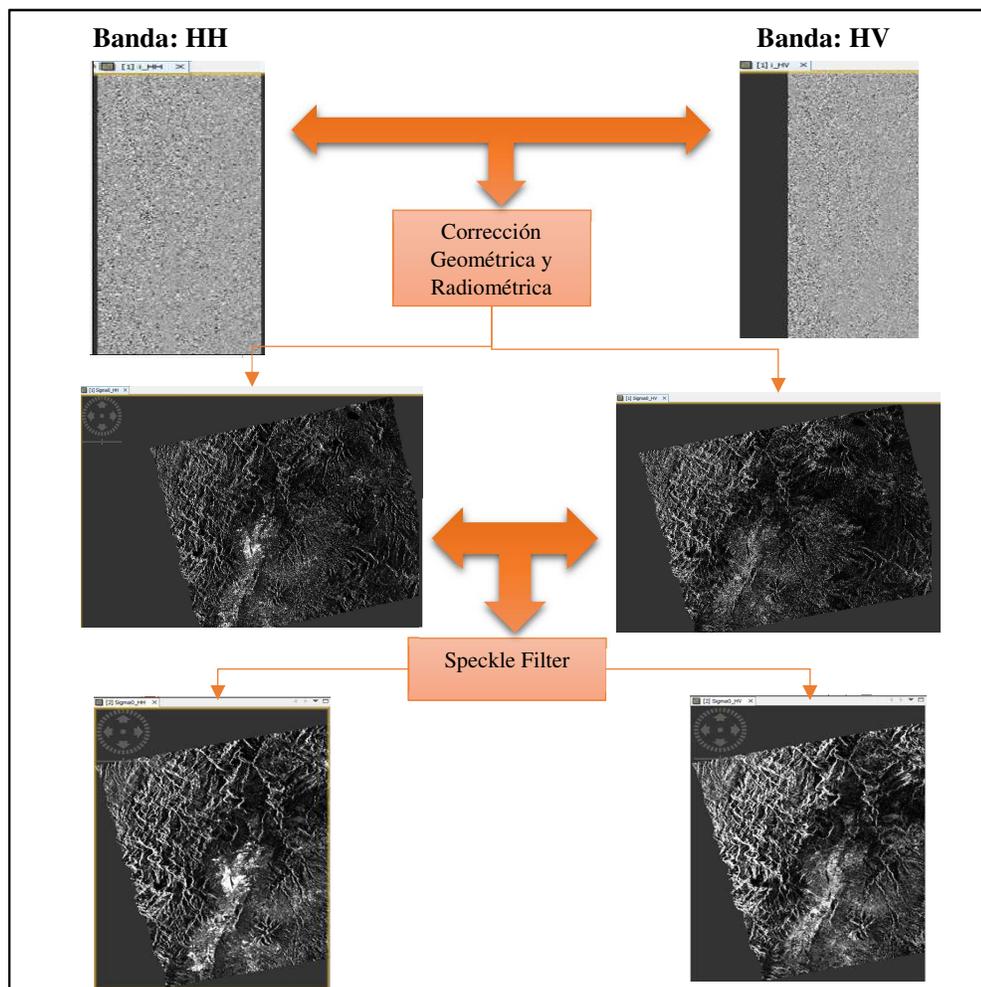
## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS

#### 4.1. Información geoespacial recopilada y levantada

##### 4.1.1. Resultado de la imagen Radar tratada y/o estandarizada

Una vez realizado el tratamiento de la imagen Radar, descrito en el ítem 3.2.1 del capítulo de Metodología, se procede a guardar la imagen en la Geodatabase creada en el ítem 3.2.3; en la Figura 57 se observa la imagen Radar procesada y/o estandarizada, con sus respectivas bandas de interés.



*Figura 57 Imagen Radar estandarizada*

#### 4.1.2. Resultado del procesamiento de imágenes con UAV

##### - Resultado del levantamiento Geodésico

En la Tabla 17, se muestran los resultados obtenidos del postproceso de los 10 puntos de control, con sus correspondientes precisiones.

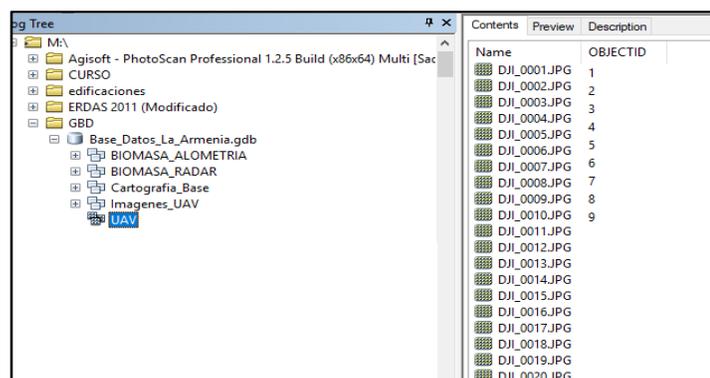
**Tabla 17**

*Coordenadas de los GCP postprocesadas con el TBC y sus precisiones*

Nombre	Este (m)	Norte (m)	Altura elipsoidal (m)	Precisión Horizontal (m)	Precisión Vertical (m)
Punto 1	781623,6757	9970366,5270	2545,0768	±0,016	±0,073
Punto 2	781479,5045	9970091,2722	2551,6074	± 0,01	±0,064
Punto 3	781460,5662	9969793,7651	2558,2339	±0,012	±0,026
Punto 4	781651,1539	9969679,8263	2532,1889	±0,012	±0,014
Punto 5	782101,4521	9970344,7750	2518,773	±0,007	±0,012
Punto 6	781915,1226	9970091,3074	2525,2487	±0,009	±0,038
Punto 7	781645,4113	9969808,6658	2529,44	±0,026	±0,155
Punto 8	781640,2014	9970077,5945	2536,8839	±0,014	±0,092
Punto 9	781626,0093	9970245,5810	2542,3114	±0,007	±0,045
Punto 10	781780,5611	9970404,7136	2534,1107	±0,078	±0,045

##### - Resultado de captura de imágenes con UAV

Como resultado de este proceso se obtuvieron en total 498 imágenes; 249 imágenes para cámara RGB y 249 imágenes para cámara BGNIR, las mismas que se almacenaron en la Geodatabase (ver Figura 58).



**Figura 58** *Imágenes UAV guardadas en la Geodatabase*

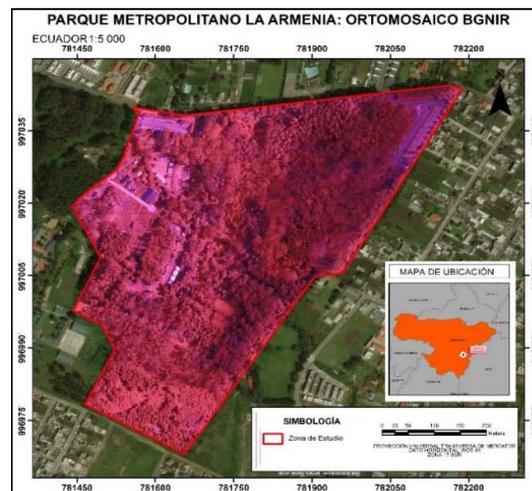
- **Resultado del ajuste fotogramétrico**

En la Figura 59, se presenta el ortomosaico en color verdadero, generado con las imágenes obtenidas a partir del vuelo realizado con el UAV y cámara RGB. En el cual se aplicó una máscara, permitiendo extraer la zona de estudio.



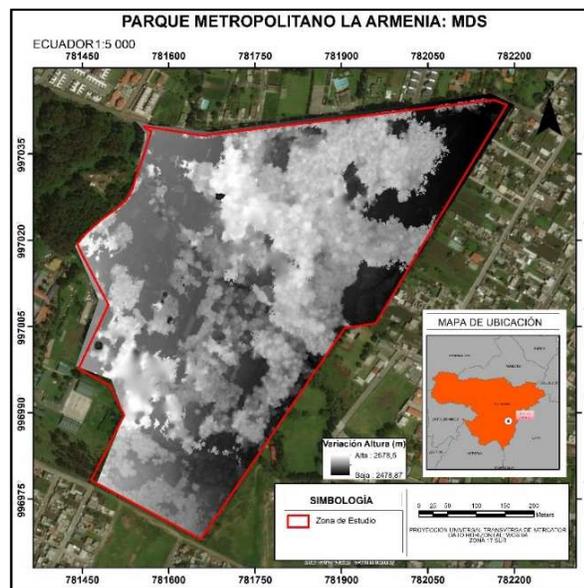
*Figura 59 Ortomosaico RGB*

Paralelamente en la Figura 60, se despliega el ortomosaico en falso color, adquirido a partir del vuelo realizado con el UAV y cámara BGNIR. Así mismo se aplicó una máscara permitiendo extraer la zona de estudio.



*Figura 60 Ortomosaico BGNIR*

En cambio, en la Figura 61 se observa el Modelo Digital de Superficie (MDS) en tono grises, obtenido del ajuste en la generación del otomosaico RGB. El mismo que representa todos los elementos existentes o presentes en la superficie de la zona de estudio (vegetación, infraestructura y el terreno propiamente). La degradación en los tonos del modelo, simbolizan la variación de la altura en metros; dicha variación de altura están entre 2578 m a 2478 m aproximadamente.

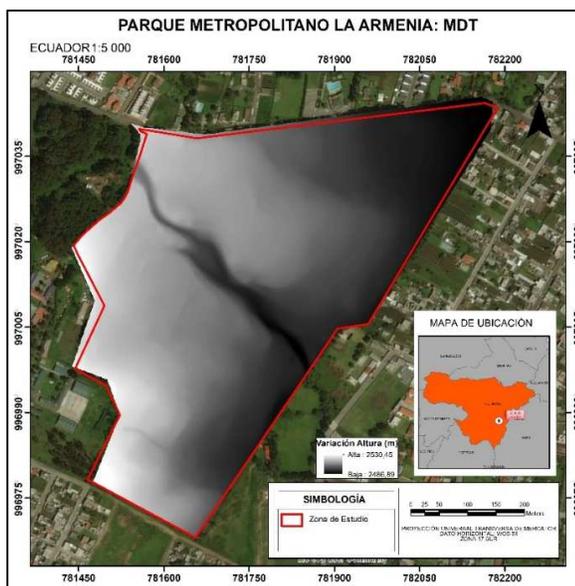


*Figura 61 MDS de la zona de estudio*

#### 4.1.3. Resultado de la información secundaria recopilada (mapa base y MDT)

Se recopiló la información cartográfica para escala 1:5 000 que influye: mapa base y los límites del Parque Metropolitano “La Armenia” en formato estándar shapefile (.shp), que abarcan una extensión de 49 hectáreas y cubren el 100 % de la zona de estudio.

Además se obtuvo, el modelo digital del terreno (MDT), con un pixel de 1 metro. En la Figura 62, se visualiza el Modelo Digital de Terreno (MDT) en tonos grises. El mismo que constituye el relieve a nivel del suelo, describiendo los accidentes geográficos y todos los elementos que se encuentran en la zona de estudio. Por ende, la variación de color, muestra la variación de la altura del terreno en metros; dicha variación, van desde 2486 m a 2530 m aproximadamente.



*Figura 62 MDT de la zona de estudio*

#### 4.2. Resultados del análisis de estimación de biomasa mediante ecuaciones alométricas

A partir de la metodología descrita en el ítem 3.3.1, se obtuvo un resumen de la estimación de biomasa por ecuaciones alométricas, detallado en la Tabla 18, y en el anexo 6, se describen en otras tablas la estimación de cada parcela; así como, los resultados de fijación de carbono.

**Tabla 18**

*Resumen de la estimación de biomasa por ecuaciones alométricas*

Sitio de muestreo	DAP Promedio (cm)	Biomasa Aérea Forestal Promedio (kg/árbol)	Biomasa Aérea Forestal Promedio (Tn/ha)	Contenido de Carbono Aéreo (Tn/ha)	CO <sub>2</sub> Equivalente (Tn/ha)	Biomasa Aérea Forestal Acumulada (Tn/ha)
Parcela No.1	119,1	9,478	59,236	29,618	108,599	1184,713
Parcela No.2	109,15	8,723	54,521	27,260	99,955	1090,416
Parcela No.3	67,775	7,744	48,398	24,199	88,730	967,964
Parcela No.4	100,45	8,488	53,047	26,523	97,253	1060,939
Parcela No.5	133,05	9,505	59,404	29,702	108,907	1188,078
Parcela No.6	106,2	8,732	54,574	27,287	100,053	1091,484



Continua

Parcela No.7	121,9	8,999	56,241	28,121	103,109	1124,830
Parcela No.8	96,1	8,400	52,500	26,250	96,250	1049,999
Parcela No.9	133,9	9,289	58,055	29,027	106,433	1161,090
Parcela No.10	129,55	9,201	57,507	28,754	105,430	1150,146
Parcela No.11	101,35	8,997	56,229	28,115	103,087	1124,585
Parcela No.12	132,7	9,200	57,501	28,751	105,419	1150,028
Parcela No.13	67,8	7,698	48,112	24,056	88,205	962,235

Como se observa en la tabla anterior, la estimación de biomasa aérea forestal acumulada, se encuentra con un valor mínimo de 962,235 tn/ha y un valor máximo de 1188,078 tn/ha, estas estimaciones corresponden a las parcelas número 13 y 5 respectivamente. De igual manera, su fijación CO<sub>2</sub> equivalente van desde 88,205 CO<sub>2</sub> tn/ha a 108,907 CO<sub>2</sub> tn/ha.

#### 4.3. Resultados del análisis de estimación de biomasa con imagen Radar

Los coeficientes obtenidos de la regresión no lineal a través del programa SPSS, se aprecian en la Figura 63.

Estimaciones de parámetro				
Parámetro	Estimación	Error estándar	Intervalo de confianza de 95 %	
			Límite inferior	Límite superior
a0	4,343	,405	3,409	5,276
a1	-18,879	12,366	-47,395	9,637
a2	101,910	73,097	-66,652	270,472
a3	31,656	8,928	11,068	52,244
a4	-433,384	128,415	-729,509	-137,259

*Figura 63 Estimación de parámetros*

Esta regresión no lineal fue un método para encontrar un modelo no lineal para la relación entre la variable dependiente (Biomasa por alometría) e independiente (niveles digitales del Radar/ retrodispersión). A diferencia de la regresión lineal tradicional, que está restringida a la estimación de modelos lineales, la regresión no lineal puede estimar modelos con relaciones arbitrarias entre la variable independiente y la dependiente.

Los resultados de los parámetros ( $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  y  $a_4$ ) de la ecuación [11], se obtuvieron usando algoritmos de estimación iterativos como se ve en la segunda columna de la figura anterior, con sus respectivos errores estándar y sus límites (límite inferior y límite superior), con un intervalo de confianza del 95%.

La Figura 64, muestra los resultados del análisis de la varianza (ANOVA) obteniendo un coeficiente de correlación ( $r^2 = 0,74$ ). El coeficiente de correlación positivo ( $r^2$ ), aquí adquirido, se asemeja al trabajo realizado por Carreiras, et al., (2012) en el estudio de comprender la relación entre la biomasa aérea y datos provenientes de una imagen Radar ALOS PALSAR.

ANOVA <sup>a</sup>			
Origen	Suma de cuadrados	gl	Medias cuadráticas
Regresión	208,628	5	41,726
Residuo	,015	8	,002
Total sin corrección	208,643	13	
Total corregido	,057	12	

Variable dependiente: Logaritmo en base 10 de la Estimación de biomasa del fuste obtenido por ecuaciones alométricas<sup>a</sup>

a.  $R^2$  cuadrado =  $1 - (\text{Suma de cuadrados residual}) / (\text{Suma de cuadrados corregida}) = ,740$ .

**Figura 64 Análisis ANOVA**

Adicionalmente, se observa en la figura anterior, que ANOVA prueba la aceptabilidad del modelo de regresión no lineal desde una perspectiva estadística. La fila de regresión muestra información sobre la variación contabilizada por el modelo y la fila residual muestra información sobre la variación que su modelo no tiene en cuenta; lo cual indica que la suma de cuadrados de regresión es considerablemente mayor que la suma de cuadrados residuales; demostrando así, que el modelo explica correctamente cualquier variación existente en la variable dependiente (Biomasa por alometría).

Los resultados de Estimación de Biomasa Aérea Forestal mediante Radar (Modelo 1), se realizó utilizando la ecuación [11], a través de los datos obtenidos por ecuaciones alométricas de las 13 parcelas muestreadas, dentro de los 20 metros de resolución de la imagen Radar ALOSPALSAR y que se presentan en la Tabla 19.



El mapa que se presenta en la Figura 65 y más detallado en el anexo 10, muestra una reclasificación en 10 clases a fin de interpretar los resultados, en particular solo se considera la parte forestal del Parque Metropolitano “La Armenia”. A simple vista, se observa que la escala de valores de la Biomasa Forestal va desde 16,79 tn/ha a 81,30 tn/ha.

La zona de estudio se caracteriza por tener en su mayoría tonalidades amarillas y tomates, lo que denota que el bosque tiene materia orgánica aérea uniforme; por lo tanto, los valores de biomasa que se destacan están entre 50,80 tn/ha a 74,81 tn/ha. Por el contrario, en la zona Oeste del parque, se observa un tono rojizo en un área de 20 metros de resolución, pues la vegetación en esa zona son árboles recién plantados; lo que fue comprobado con los registros de plantaciones, realizadas en el año de captura de la imagen Radar.

#### **4.4. Resultados del análisis de estimación de biomasa mediante imágenes UAV**

##### **4.4.1. Resultado de la estimación de biomasa por CMS (Crop Model Surface)**

En la metodología descrita en el ítem 3.3.3, se ajustó el modelo a una regresión logarítmica con un coeficiente de correlación positiva ( $r^2 = 0,67$ ); los coeficientes obtenidos de la regresión, a través del programa SPSS, se aprecian en la Figura 66, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$y = 5,5784\ln(x) + 39,092 \quad [17]$$

Donde:

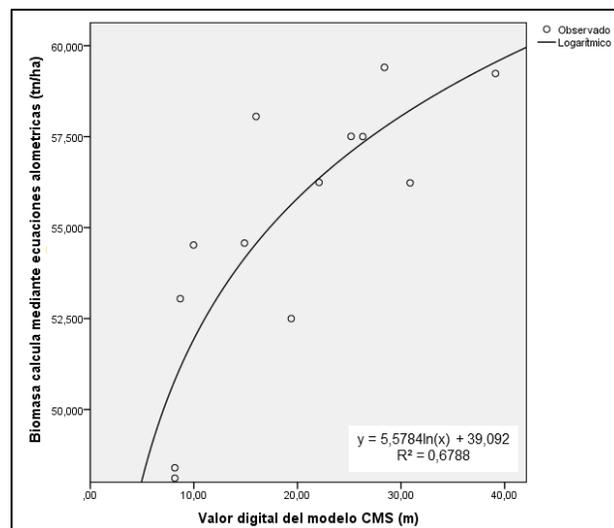
y = variable dependiente → Biomasa aérea forestal (tn/ha)

x = variable independiente → Valor digital del CMS

	Coeficientes				
	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
	B	Error estándar	Beta	t	Sig.
ln(Valor digital del modelo CMS (m))	5,578	1,157	,824	4,821	,001
(Constante)	39,092	3,360		11,634	,000

**Figura 66 Coeficientes de la Regresión logarítmica**

En la figura anterior se muestran los coeficientes de la regresión logarítmica. La columna etiquetada “Coeficientes no estandarizados”, contiene los coeficientes de regresión parcial que definen la ecuación estadística de regresión [17]. El coeficiente correspondiente a la *Constante* es el origen de la curva de regresión; el coeficiente correspondiente a *ln (Valor digital del modelo CMS)*, es la pendiente de la curva de regresión e indica el cambio medio que corresponde a la variable dependiente (*Biomasa aérea forestal*) por cada unidad de cambio de la variable independiente (*Valor digital del modelo CMS*).



**Figura 67 Modelo de regresión logarítmica**

En la Figura 67 se aprecia: que a cada valor digital del modelo CMS le corresponde una estimación de Biomasa aérea forestal basado en un incremento

constante de (39.092) mas 5.578 logaritmo natural del valor digital del modelo CMS; además de obtener los estadísticos t y sus niveles críticos (Sig) diferentes de cero (ver Figura 66); lo cual, nos permite interpretar que entre la variable dependiente e independiente existe relación logarítmica significativa.

La Tabla 20, expone los resultados de la Estimación de Biomasa Aérea Forestal por CMS (Modelo 2) utilizando la ecuación  $y = 5,5784\ln(x) + 39,092$  [15], a través de los datos obtenidos por ecuaciones alométricas de las 13 parcelas muestreadas, dentro de los 20 metros de resolución del modelo CMS.

**Tabla 20**

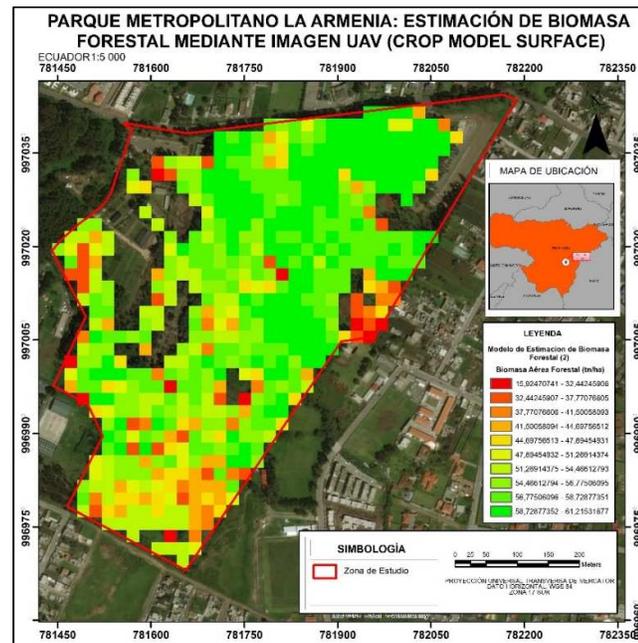
***Resumen de la estimación de biomasa por CMS***

No. Parcela	Biomasa Aérea Forestal Promedio por Alometría (Tn/ha)	VD DEL MSC (m)	Biomasa Aérea Forestal Promedio – UAV -CMS (Tn/ha)	Contenido de Carbono Aéreo - UAV -CMS (Tn/ha)	CO <sub>2</sub> Equivalente – UAV -CMS (Tn/ha)	Biomasa Aérea Forestal Acumulada - UAV -CMS (Tn/ha)
Parcela 1	59,236	39,118	59,546	29,773	109,167	1497,783
Parcela 2	54,521	9,966	51,918	25,959	95,182	1175,114
Parcela 3	48,398	8,161	50,803	25,402	93,139	723,279
Parcela 4	53,047	8,687	51,151	25,576	93,778	767,038
Parcela 5	59,404	28,395	57,759	28,879	105,891	1155,752
Parcela 6	54,574	14,882	54,155	27,077	99,284	723,279
Parcela 7	56,241	22,087	56,357	28,179	103,321	1399,377
Parcela 8	52,500	19,399	55,633	27,817	101,994	1082,218
Parcela 9	58,055	16,003	54,560	27,280	100,026	1242,985
Parcela 10	57,507	25,173	57,087	28,543	104,659	1338,673
Parcela 11	56,229	30,874	58,225	29,113	106,747	1450,061
Parcela 12	57,501	26,304	57,332	28,666	105,108	1410,460
Parcela 13	48,112	8,160	50,802	25,401	93,137	679,533

Como se observa en la tabla anterior, la estimación de biomasa aérea forestal acumulada, se encuentra con un valor mínimo de 679,533 tn/ha y un valor máximo de 1497,783 tn/ha, estas estimaciones corresponden a las parcelas número 13 y 1 respectivamente. De igual manera, su fijación CO<sub>2</sub> equivalente va desde 93,137 CO<sub>2</sub> tn/ha a 109,167 CO<sub>2</sub> tn/ha, perteneciendo a las parcelas mencionadas anteriormente.

En la Figura 68, se ilustra el mapa del Modelo 2, generado con CMS, el cual se encuentra a mayor detalle en el anexo 11. El mapa presenta una reclasificación en 10 clases, a fin de interpretar los resultados; en particular solo se enmarca la cobertura forestal del Parque Metropolitano “La Armenia”. Además, se observa que la escala de valores de la Biomasa Forestal va desde 15,92 tn/ha a 61,21 tn/ha, con tonalidades de rojo a verde respectivamente.

La zona de estudio se caracteriza por tener en su mayoría tonalidades verde claro, lo que indica que el bosque posee materia orgánica uniforme; por lo tanto, los valores de biomasa que se destacan están entre 51,26 tn/ha a 61,21 tn/ha.



**Figura 68 Estimación de AGB mediante CMS**

Así mismo, en la imagen presentada se muestra ciertos tonos rojizos que cubren cada una un área de 20 metros de resolución, pues la vegetación en esas zonas son árboles muertos en pie; es decir sin hojas, lo que fue comprobado al momento de realizar el muestreo en campo.

#### 4.4.2. Resultado de la estimación de biomasa por Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)

En la metodología descrita en el ítem 3.3.3, se ajustó el modelo a una regresión cuadrática con un coeficiente de correlación positiva ( $r^2 = 0,57$ ); los parámetros obtenidos de la regresión, a través del programa SPSS, se aprecian en la Figura 69, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$y = -3122,3x^2 + 4230x - 1376,1 \quad [18]$$

Donde:

y = variable dependiente → Biomasa aérea Forestal (tn/ha)

x = variable independiente → valor digital del GDVI

Según Reyes (2011), el modelo de regresión cuadrática es una alternativa cuando el modelo lineal no logra un coeficiente de determinación apropiado, o cuando el fenómeno en estudio tiene un comportamiento que puede considerarse como parabólico. La forma más simple de tratar de establecer la tendencia es a través de un diagrama de dispersión o nube de puntos, tal como se ve en la Figura 70.

	Coeficientes				
	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
	B	Error estándar	Beta	t	Sig.
Valor digital del modelo GNDVI	4230	2893,652	21,146	1,470	,172
Valor digital del modelo GNDVI ** 2	-3122,3	2208,830	-20,444	-1,421	,186
(Constante)	-1371,1	947,057		-1,462	,175

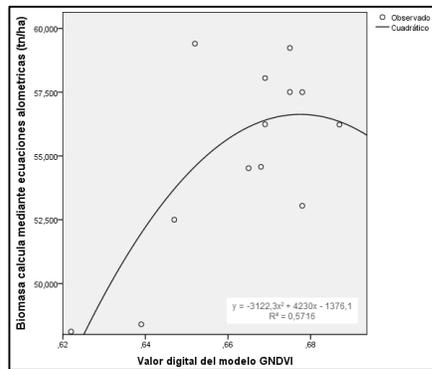
**Figura 69 Coeficientes de la Regresión Cuadrática**

Respecto a la figura anterior se muestran los coeficientes de la regresión cuadrática. La columna etiquetada “Coeficientes no estandarizados” contiene los coeficientes de regresión parcial que definen la ecuación estadística de regresión [18]. El coeficiente correspondiente a la *Constante* es el origen de la curva de regresión; los

coeficientes correspondientes a *Valor digital del modelo GNDVI* son los parámetros para la distribución cuadrática e indican el cambio medio que corresponde a la variable dependiente (*Biomasa aérea forestal*) por cada unidad de cambio de la variable independiente (*Valor digital del modelo GNDVI*).

En la Figura 70 se ilustra la regresión cuadrática entre los valores obtenidos en campo, mediante alometría; versus los valores digitales del GNDVI.

Así mismo se aprecia que a cada valor digital del modelo GNDVI le corresponde una estimación de Biomasa aérea forestal basado en un incremento constante de -1371,1; más 4230 veces el valor digital del modelo CMS y menos 3122,3 veces el valor digital del modelo GNDVI al cuadrado.



**Figura 70 Modelo cuadrático**

La tabla 21, expone los resultados de la Estimación de Biomasa Aérea Forestal por GNDVI (Modelo 3) utilizando la ecuación [18], a través de los datos obtenidos por ecuaciones alométricas de las 13 parcelas muestreadas, dentro de los 20 metros de resolución del modelo GNDVI.

**Tabla 21**

**Resumen de la estimación de biomasa por GNDVI**

No. Parcela	Biomasa Aérea Forestal Promedio por Alometría (Tn/ha)	VD DEL GNDVI (m)	Biomasa Aérea Forestal Promedio - GNDVI (Tn/ha)	Contenido de Carbono Aéreo - GNDVI (Tn/ha)	CO <sub>2</sub> Equivalente - GNDVI (Tn/ha)	Biomasa Aérea Forestal Acumulada - GNDVI (Tn/ha)
-------------	---	------------------	---	--	---	--

➡ Continua

Parcela 1	59,236	0,675	56,552	28,276	103,679	1153,356
Parcela 2	54,521	0,665	56,061	28,031	102,779	1158,098
Parcela 3	48,398	0,639	52,043	26,021	95,412	818,933
Parcela 4	53,047	0,678	56,567	28,283	103,705	773,527
Parcela 5	59,404	0,652	54,498	27,249	99,914	1268,623
Parcela 6	54,574	0,668	56,318	28,159	103,250	976,791
Parcela 7	56,241	0,669	56,324	28,162	103,261	1038,176
Parcela 8	52,500	0,647	53,763	26,882	98,566	1093,013
Parcela 9	58,055	0,669	56,324	28,162	103,261	1211,850
Parcela 10	57,507	0,675	56,545	28,273	103,666	890,718
Parcela 11	56,229	0,687	56,267	28,133	103,710	1269,238
Parcela 12	57,501	0,678	56,569	28,284	103,156	1158,078
Parcela 13	48,112	0,622	46,913	23,457	86,007	713,734

Como se observa en la tabla, la estimación de biomasa aérea forestal acumulada, tiene un valor mínimo de 713,734 tn/ha y un máximo de 1269,238 tn/ha; estas estimaciones corresponden a las parcelas número 13 y 11 respectivamente. De igual manera, su fijación CO<sub>2</sub> equivalente va desde 86,007 CO<sub>2</sub> tn/ha hasta 103,710 CO<sub>2</sub> tn/ha, perteneciendo a las parcelas descritas.

En la Figura 71, se ilustra el mapa del modelo 3, generado con los valores digitales del índice de vegetación GNDVI; el cual, se encuentra detallado en el Anexo 12.

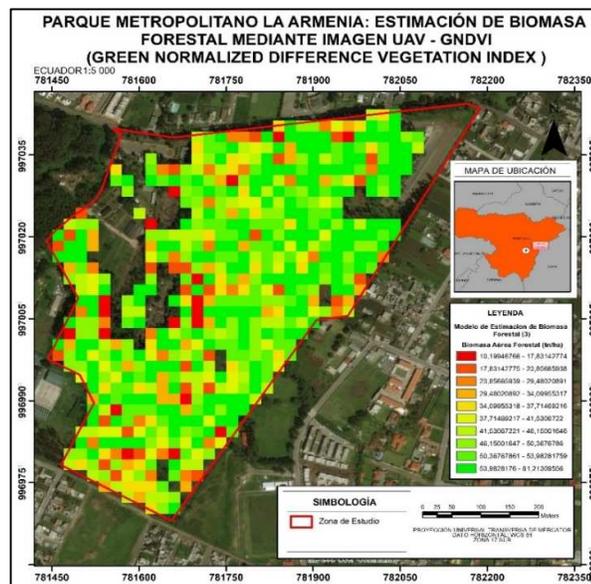


Figura 71 Estimación de AGB mediante GNDVI

El mapa en cuestión, presenta una reclasificación en 10 clases a fin de interpretar los resultados, de la cobertura forestal del Parque Metropolitano “La Armenia”. En ese sentido, se observa que la escala de valores de la Biomasa Forestal va desde 10,19 tn/ha a 61,21 tn/ha, con tonalidades de rojo a verde, respectivamente.

La zona de estudio se caracteriza por tener en su mayoría tonalidades verdes, las cuales indican, que el bosque posee materia orgánica aérea uniforme; por lo tanto, los valores de biomasa que se destacan están entre 50,36 tn/ha a 61,21 tn/ha. De igual manera que en los dos mapa anteriores, se muestran ciertos tonos rojizos en un área de 20 metros de resolución; pues la vegetación en esa zona incluye árboles muertos en pie (es decir sin hojas); lo que fue comprobado al momento de realizar el muestreo en campo y la interpretación de imágenes con mejor resolución.

#### **4.5. Resultados estadísticos de la comparación y validación de los métodos de cálculo de biomasa en el estudio**

##### **4.5.1. Resultado de la comparación de valores de biomasa entre los diferentes modelos**

A continuación, se presenta los registros que contiene los cuatro conjuntos de datos obtenidos; los que se les efectuó un análisis comparativo (ver Tabla 22).

**Tabla 22**

*Resultado de Biomasa Aérea Forestal obtenida por diferentes métodos*

<b>Sitio de Muestreo</b>	<b>Biomasa Aérea Forestal Acumulada por Alometría (Tn/ha)</b>	<b>Biomasa Aérea Forestal Acumulada por Radar (Tn/ha)</b>	<b>Biomasa Aérea Forestal Acumulada por UAV - CMS (Tn/ha)</b>	<b>Biomasa Aérea Forestal Acumulada por UAV - GNDVI (Tn/ha)</b>
Parcela 1	1184,712	1070,092	1497,783	1153,356
Parcela 2	1090,416	710,001	1175,114	1158,098
Parcela 3	967,9644	577,031	723,279	818,933
Parcela 4	1060,939	667,642	767,038	773,527
Parcela 5	1188,078	1078,056	1155,752	1268,623
Parcela 6	1091,484	812,269	723,279	976,791

 Continua

Parcela 7	1124,829	900,895	1399,377	1038,176
Parcela 8	1049,998	616,652	1082,218	1093,013
Parcela 9	1161,090	1011,501	1242,985	1211,85
Parcela 10	1150,145	992,740	1338,673	890,718
Parcela 11	1124,584	838,053	1450,061	1269,238
Parcela 12	1150,027	925,097	1410,460	1158,078
Parcela 13	962,235	391,777	679,533	713,734

#### 4.5.2. Resultado del análisis de datos

- **Análisis de datos de biomasa obtenidos por ecuaciones alométricas (Alometría)**

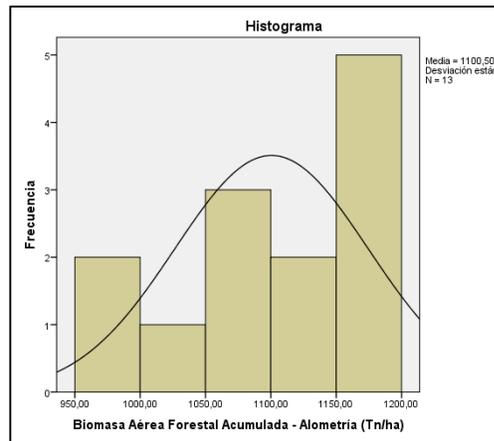
En la Figura 72 se aprecian los estadísticos resultantes de la estimación de biomasa obtenido por alometría (datos en campo).

Estadísticos		
Biomasa Aérea Forestal Acumulada - Alometría (Tn/ha)		
N	Válido	13
	Perdidos	0
Media		1100,5001
Mediana		1124,5840
Moda		962,23 <sup>a</sup>
Desviación estándar		73,88256
Asimetría		-,830
Error estándar de asimetría		,616
Rango		225,84
Mínimo		962,23
Máximo		1188,08

**Figura 72 Resumen estadístico (Alometría)**

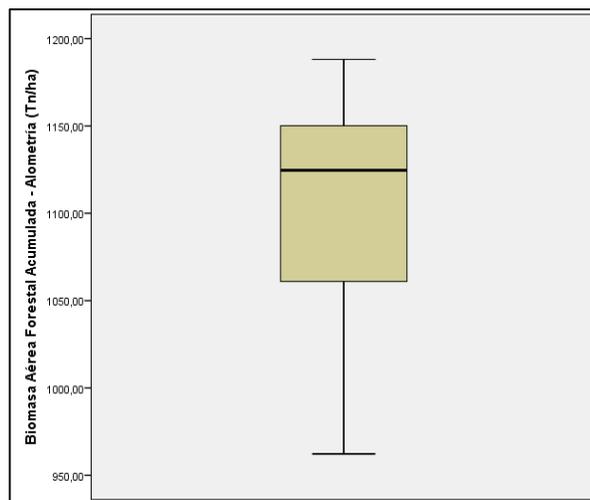
Como se observa, el valor mínimo es 962,24 tn/ha y el máximo es 1188,08 tn/ha de materia orgánica; con lo que se establece, que la estimación de biomasa promedio por ecuaciones alométricas es de 1100, 50 tn/ha.

En cuanto a las medidas de tendencia central (media y mediana), toman valores cercanos; demostrando así que los datos tienen una distribución normal. En la Figura 73 se ilustra el histograma del conjunto de datos.



**Figura 73 Histograma de datos (Alometría)**

Con el histograma, se contrasta la disposición de los datos y su distribución normal mencionada anteriormente; con una curva asimétrica a la izquierda, en donde la mayoría de los valores se encuentran cercanos a la media. El coeficiente de asimetría (-0,830) Figura 4.16, al ser negativo, indica que existe una menor cantidad de datos por debajo de la media. Por otro lado, se generó un diagrama de caja, que se visualiza en la Figura 74.



**Figura 74 Diagrama de caja de datos (Alometría)**

El diagrama de caja expresa que todos los valores se encuentran dentro de los límites establecidos como 1.5 veces el Rango Inter Cuartil ( $RIC = Cuartil_3 - Cuartil_1$ );

es decir, no existen datos atípicos en el conjunto. Así mismo se confirma que es una distribución asimétrica a la izquierda o llamada asimétrica negativa.

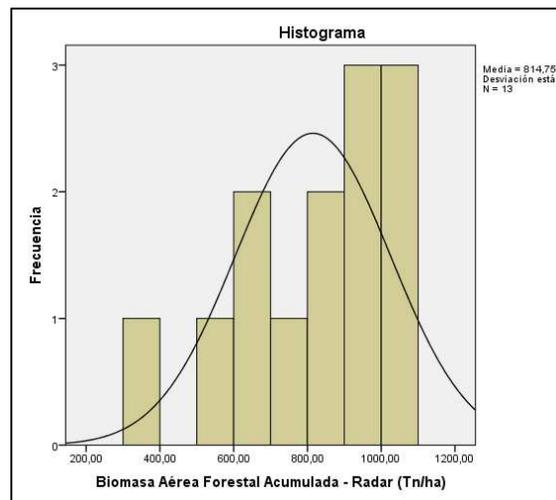
- **Análisis de datos de biomasa obtenidos por imagen Radar (Modelo 1)**

Los estadísticos resultantes de la estimación de biomasa obtenidos por Radar (Modelo 1), se detallan en la Figura 75.

<b>Estadísticos</b>		
Biomasa Aérea Forestal Acumulada - Radar (Tn/ha)		
N	Válido	13
	Perdidos	0
Media		814,7543
Mediana		838,0530
Moda		391,78 <sup>a</sup>
Desviación estándar		210,62210
Asimetría		-,538
Error estándar de asimetría		,616
Rango		686,28
Mínimo		391,78
Máximo		1078,06

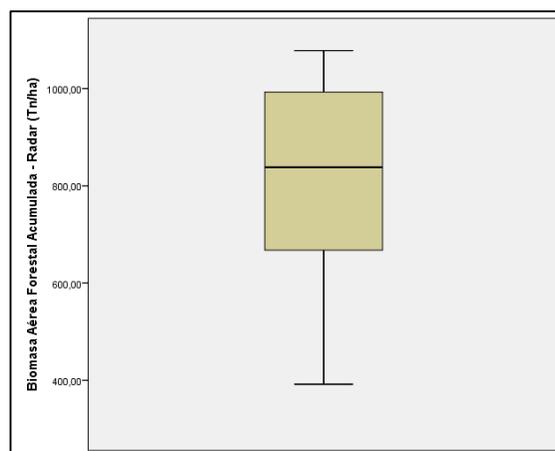
**Figura 75 Resumen estadístico (Modelo 1)**

La figura se observa que, al igual que el conjunto de datos anterior, la media, mediana y moda se encuentran cercanas, determinando así que se distribuyen normalmente. De acuerdo a los valores máximos y mínimos, los datos estimados de biomasa mediante imagen Radar se encuentran en una escala de 391,78 tn/ha a 1078,06 tn/ha de materia orgánica. El histograma correspondiente se encuentra en la Figura 76.



**Figura 76 Histograma de datos (Modelo 1)**

El coeficiente negativo de asimetría (-0,53), expuesto en la Figura 75, indica que la mayoría de los datos se encuentran acumulados ligeramente hacia la izquierda de la media, tal como se observa en la figura anterior; igualmente, se confirma la distribución normal de los datos. En la Figura 77, se visualiza el diagrama de caja de los datos.



**Figura 77 Diagrama de caja de datos (Modelo 1)**

Al observar el diagrama de caja anterior, se entiende que no existen valores atípicos ya que todo el conjunto de datos se encuentra dentro de los límites establecidos. Así como que es una distribución ligeramente asimétrica negativa.

- **Análisis de datos de biomasa obtenidos por imagen UAV - CMS (Modelo 2)**

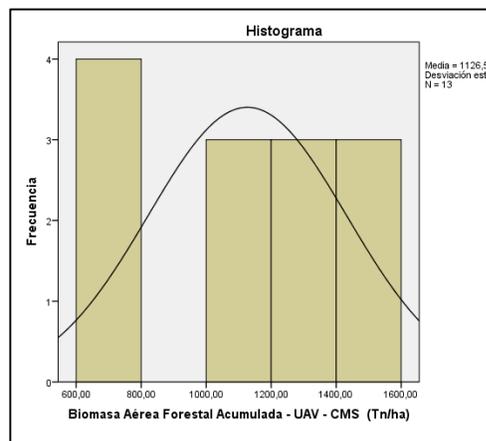
La Figura 78 expone los estadísticos resultantes de la estimación de biomasa obtenidos por imágenes UAV, usando el modelo CMS (Modelo 2).

<b>Estadísticos</b>		
Biomasa Aérea Forestal Acumulada - UAV - CMS (Tn/ha)		
N	Válido	13
	Perdidos	0
Media		1126,5809
Mediana		1175,1140
Moda		723,28
Desviación estándar		304,90035
Asimetría		-,444
Error estándar de asimetría		,616
Rango		818,25
Mínimo		679,53
Máximo		1497,78

**Figura 78 Resumen estadístico (Modelo 2)**

De igual forma, se detalla que la media y mediana tienen valores próximos, con lo que, se considera que el grupo de datos se distribuye de forma normal; además, el mínimo y máximo valor son: 679,53 tn/ha y 1497,78 tn/ha, respectivamente.

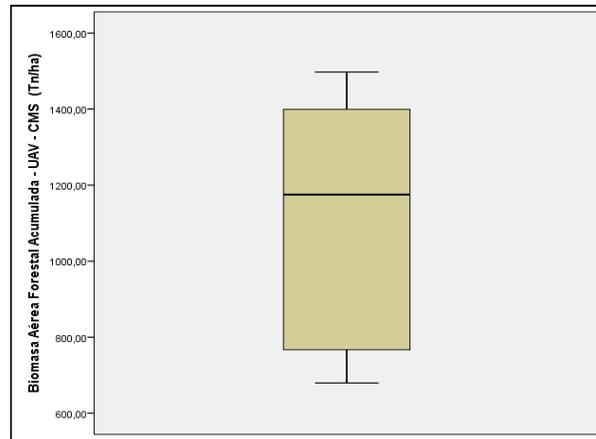
El histograma de los datos estimados se encuentra en la Figura 79.



**Figura 79 Histograma de datos (Modelo 2)**

El histograma anterior, junto con el coeficiente de asimetría (-0,44) de la Figura 4.22, indican que los datos están acumulados en su mayoría debajo del valor de la

media; además se observa que existen datos uniformes. En la Figura 80 se expone el diagrama de caja para estos datos.



**Figura 80 Diagrama de caja de datos (Modelo 2)**

El diagrama de caja, indica que no existen valores atípicos, ya que todo el conjunto de datos se encuentra dentro de los límites establecidos. Paralelamente se interpreta, que tiene una distribución asimétrica negativa.

- **Análisis de datos de biomasa obtenidos por imagen UAV – GNDVI (Modelo 3)**

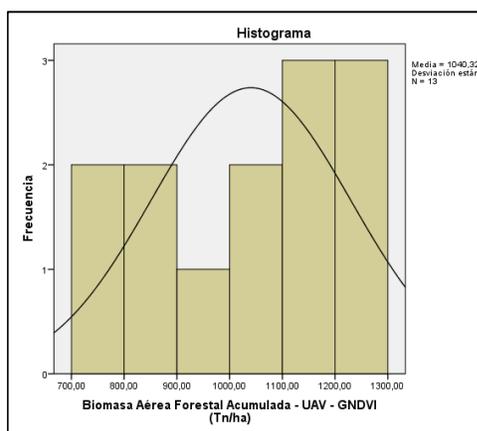
Los estadísticos resultantes de la estimación de biomasa obtenidos por imágenes UAV, usando el índice de vegetación GNDVI (Modelo 3), se presentan en la Figura 81.

<b>Estadísticos</b>		
Biomasa Aérea Forestal Acumulada - UAV - GNDVI (Tn/ha)		
N	Válido	13
	Perdidos	0
Media		1040,3181
Mediana		1093,0130
Moda		713,73 <sup>a</sup>
Desviación estándar		189,40938
Asimetría		-,500
Error estándar de asimetría		,616
Rango		555,50
Mínimo		713,73
Máximo		1269,24

**Figura 81 Resumen estadístico (Modelo 3)**

La Figura 81, al igual que en los tres conjuntos de datos anteriores, la media y mediana se encuentran cercanas; determinando así que se distribuyen normalmente. De acuerdo a los valores máximos y mínimos estimados de biomasa obtenidos por el índice de vegetación, estos se encuentran en un rango de 713,73 tn/ha a 1269,24 tn/ha de materia orgánica.

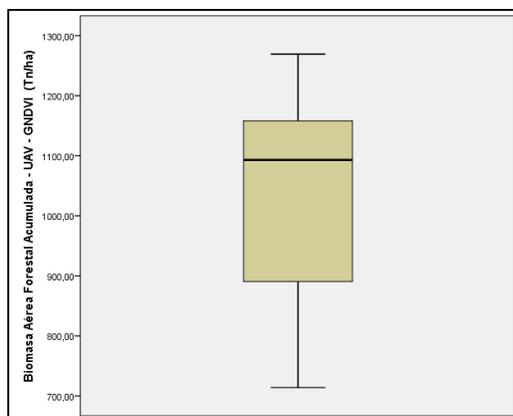
El histograma de los valores del Modelo 3 se presenta en la Figura 82.



**Figura 82 Histograma de datos (Modelo 3)**

El coeficiente negativo de asimetría (-0,50), expuesto en la Figura 81, indica que la mayoría de los datos se encuentran acumulados ligeramente hacia la izquierda de la media.

Finalmente, se visualiza el diagrama de caja de los datos en la Figura 83.



**Figura 83 Diagrama de caja de datos (Modelo 3)**

En el diagrama mencionado, se observa que no existen valores anómalos y que todos se encuentran dentro de los límites establecidos. Así mismo se interpreta que tiene una distribución asimétrica negativa.

#### 4.5.3. Resultado de la correlación entre modelos

En la Figura 84, se observa la correlación de Pearson de los diferentes modelos empleados en este proyecto, mediante el uso del software SPSS.

		<b>Correlaciones</b>			
		Biomasa Aérea Forestal Acumulada - Alometría (Tn/ha)	Biomasa Aérea Forestal Acumulada - Radar (Tn/ha)	Biomasa Aérea Forestal Acumulada - UAV - CMS (Tn/ha)	Biomasa Aérea Forestal Acumulada - UAV - GNDVI (Tn/ha)
Biomasa Aérea Forestal Acumulada - Alometría (Tn/ha)	Correlación de Pearson	1	,966**	,794**	,748**
Biomasa Aérea Forestal Acumulada - Radar (Tn/ha)	Correlación de Pearson	,966**	1	,737**	,672*
Biomasa Aérea Forestal Acumulada - UAV - CMS (Tn/ha)	Correlación de Pearson	,794**	,737**	1	,727**
Biomasa Aérea Forestal Acumulada - UAV - GNDVI (Tn/ha)	Correlación de Pearson	,748**	,672*	,727**	1

**Figura 84 Resultados de las correlaciones**

Interpretando el resultado, se observa en qué grado se encuentran correlacionados, es decir la relación existente entre ellos.

Mediante el análisis de correlación de Pearson, tiene que:

- En cuanto a la comparación de datos de la Estimación de Biomasa Aérea Forestal Acumulada - Alometría vs Modelo 1-Radar, se obtuvo un valor de 0,96.
- Para la comparación de datos por Alometría vs Modelo 2 (UAV-CMS), resulto un valor de 0,79.

- En cambio, la comparación de datos por Alometría vs Modelo 3 (UAV - GNDVI), se obtuvo un valor de 0,74.

Por lo tanto, en las tres comparaciones, los coeficientes de Pearson obtenidos, según Diaz (2015), se trata de una correlación positiva. La mayoría de árboles de la zona de estudio son coníferas y se hallan en plena edad adulta; además la especie predominante es el *Cupressus macrocarpa*.

Según Montero & Muñoz (2005), ese tipo de especie se encuentran entre las plantas con mayor biomasa por tener una masa vegetal significativa debido a su fuste y ramas, además en varias investigaciones en donde estiman biomasa con sensores remotos se ha demostrado que las especies coníferas son las que mayor correlación poseen. Esta es la razón principal por la que los valores de correlación son altos y positivo para cada caso. Idea que se contrasta con los estudios realizados por Carreiras, et al., (2012) y Bending, et al., (2014), en estimar biomasa mediante Radar y usando el modelo CMS, respectivamente.

En cambio, se observa que el menor coeficiente de Pearson, es el obtenido por los datos de índice de vegetación GNDVI y se asemeja al estudio realizado por Moges, et al., (2004), en el cual menciona: que para obtener una alta correlación es preferible usar el índice de vegetación NDVI en estimar biomasa aérea forestal.

#### 4.5.4. Resultado de la validación de los modelos 1, 2 y 3

A continuación, se presenta la tabla que contiene los cuatro conjuntos de datos obtenidos para la validación (ver Tabla 23), datos, que se ajustaran a un modelo lineal, para obtener su coeficiente de determinación  $R^2$ .

**Tabla 23**

#### **Resultado de Biomasa Aérea Forestal obtenida para validación de modelos**

Sitio de Muestreo	Biomasa Aérea Forestal - Alometría (Tn/ha)	Biomasa Aérea Forestal por Radar (Tn/ha)	Biomasa Aérea Forestal por UAV - CMS (Tn/ha)	Biomasa Aérea Forestal por UAV - GNDVI (Tn/ha)
-------------------	--	--	--	--

 Continua

1	59,430	56,928	58,744	53,340
2	54,897	54,628	46,991	45,332
3	47,596	50,866	37,222	35,228
4	45,401	49,437	36,105	12,757
5	64,146	62,913	60,675	56,407
6	50,955	54,211	41,561	43,573
7	59,139	56,918	58,407	52,851
8	49,383	53,683	40,077	35,518
9	58,932	56,438	54,501	52,803
10	56,267	56,346	54,094	51,648
11	55,009	54,955	49,320	50,566
12	60,190	56,935	59,182	55,793
13	46,175	50,251	36,661	23,065

La validación entre modelos, consistió en ajustar el valor obtenido en campo u observado en el terreno con el valor resultante de los modelos de estimación de biomasa. En particular, en la Figura 85 observamos los estadísticos descriptivos de la validación; que incluye la media de cada modelo con su respectiva desviación estándar. Los valores de la media de cada modelo se encuentran entre valores de 43,73 tn/ha a 55,577 tn/ha de materia orgánica, estimada entre el Modelo 3 y Modelo 1, respectivamente.

<b>Estadísticos descriptivos</b>			
	Media	Desviación estándar	N
Biomasa Aérea Forestal Observada - Alometría (Tn/ha)	54,4246	6,00602	13
Biomasa Aérea Forestal Estimada - Radar (Tn/ha)	55,5776	5,29932	13
Biomasa Aérea Forestal Estimada - UAV - CMS (Tn/ha)	48,7338	9,46509	13
Biomasa Aérea Forestal Estimada - UAV - GNDVI (Tn/ha)	43,7601	13,54677	13

**Figura 85 Estadísticos descriptivos**

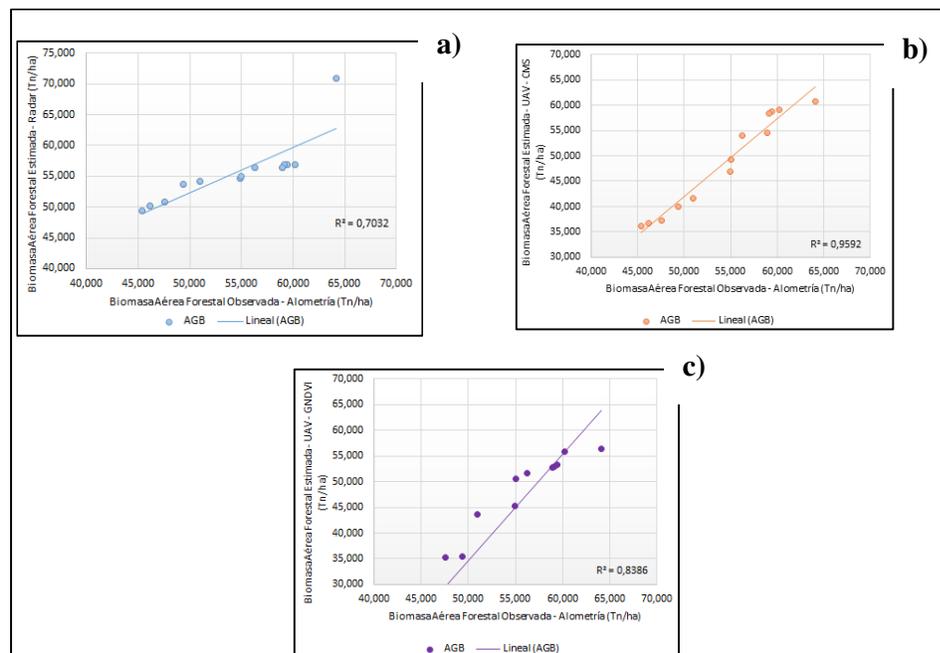
Cuando se aplicó el modelo ajustado a las subparcelas de validación, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 86.

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
Biomasa Aérea Forestal Estimada - Radar (Tn/ha)	,839 <sup>a</sup>	,703	,676	3,41732
Biomasa Aérea Forestal Estimada - UAV - CMS (Tn/ha)	,979 <sup>a</sup>	,959	,956	1,26685
Biomasa Aérea Forestal Estimada - UAV - GNDVI (Tn/ha)	,916 <sup>a</sup>	,839	,824	2,52016

**Figura 86 Resumen del modelo ajustado**

En la columna R, se observa el coeficiente de correlación de Pearson, que para los tres modelos es una correlación positiva según Díaz (2015); en la columna R cuadrado, se define el coeficiente de determinación, que cuantifica la bondad del ajuste de los modelos. En este proyecto se obtuvieron un valor de  $R^2 = 0,95$  del Modelo 2, definiéndose como una bondad de ajuste positiva o directa perfecta. En cambio el Modelo 1 y 3 muestran un  $R^2 = 0,70$  y  $0,83$ ; interpretándose como una bondad de ajuste positiva, según la Tabla 14.

Por otro lado, se generaron los gráficos de ajuste, que se visualizan en la Figura 87.



**Figura 87 Ajuste de validación de los modelos: (a) Modelo 1; (b) Modelo 2; (c) Modelo 3**

La figura anterior, representan el ajuste de las estimaciones de AGB usando el modelo lineal; este modelo lineal constituye una línea recta que resume los conjuntos de datos de la validación, y demuestran una alta consistencia con las medidas de campo. El grafico (b) es aquel que mejor bondad de ajuste posee por su coeficiente de determinación positiva o directa perfecta (ver Figura 86).

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este último capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones de este proyecto, que están completamente asociadas a los objetivos establecidos. En cada una de los métodos analizados, se verifica el uso potencial de las imágenes Radar y UAV en la estimación de biomasa forestal por medio de la combinación de datos en campo con el tipo de dato de los sensores remotos.

#### 5.1. Conclusiones

Se cumplieron con todos los objetivos y metas propuestas en este proyecto, incluyendo: la recopilación y levantamiento de la información geoespacial que formó parte de la zona de estudio (ver ítem 4.1), mismos que dieron como resultado: una imagen Radar ALOS PALSAR con polarización HH y HV procesada (ver ítem 4.1.1 y Anexo 1); en el levantamiento de imágenes RGB y multiespectral (BGNIR) a través de UAV, dio como resultado: 2 Ortofotos (RGB y Multiespectral) y 1MDS (RGB) (ver ítem 4.1.2 y Anexo 2 al 4) e información secundaria como la cartografía base y MDT obtenida del MDMQ (ver ítem 4.1.3). Toda la información recolectada sirvió como base para crear los modelos y mapas de estimación de biomasa aérea forestal, además todos los resultados y geoinformación se almacenaron en una geodatabase.

En cuanto al análisis de los métodos de estimación de biomasa mediante el uso de imagen Radar y Vehículos Aéreos No Tripulados – UAV, se obtuvo como resultado: 20 registros de campo para la estimación por alometría (ver ítem 4.2 y Anexo 5 y 6), además la generación de 3 mapas temáticos de los modelos de estimación (ver ítem 4.3, 4.4 y Anexo 7 al 12) y finalmente 2 tablas de resultados, tanto para la comparación y validación (ver Tabla 22 y 23), que permitieron realizar sus respectivo análisis de correlación (ver ítem 4.5).

Se comprobó la importancia del tamaño de la parcela en el proceso de construcción de cada modelo (ver ítem 3.3.1); las parcelas de muestreo fueron lo

suficientemente grandes para que incluyan cualquier variabilidad local y disminuir sus errores en cuanto al tipo y densidad de los árboles existentes.

La metodología usada en la estimación de biomasa aérea forestal mediante Radar (modelo 1) se ajustó a un modelo de regresión no lineal, la misma que es usada por Carreiras, et al., (2012), en la cual obtiene un coeficiente de determinación  $r^2$  parecido a lo obtenido en este proyecto  $r^2 = 0,74$  (ver Figura 64); mientras que en la metodología usada en la estimación de biomasa aérea forestal mediante CMS (modelo 2) se ajustó a una regresión logarítmica con un coeficiente de determinación  $r^2 = 0,67$  (ver Figura 67); en cambio en la obtención del modelo 3 por GNDVI se ajustó a una regresión cuadrática, con un coeficiente de determinación  $r^2 = 0,57$  (ver Figura 70) y se asemeja al estudio realizado por Moges, et al., (2004). El ajuste de los tres modelos se define como una bondad de ajuste positiva.

Analizando los resultados de biomasa forestal acumulada mediante alometría, Radar, CMS y GNDVI, se concluye que la mayor cantidad de estimaciones se encuentran aglomerados por debajo de la media, sin presentar ningún valor atípico o anómalo (ver Tabla 22).

En cuanto a la comparación y validación de datos, mediante el análisis del coeficiente de correlación de Pearson y del coeficiente de determinación, se concluye que el modelo 1 es mejor (ver Figura 84); sin embargo, es necesario indicar que el modelo 1 no se ajusta a la realidad, ya que existe una gran diferencia entre las fechas de toma de la imagen Radar versus los datos adquiridos en campo. Por lo tanto el modelo 2 representa mejor la realidad, ya que puede caracterizar de mejor manera cambios abruptos de la variable altura del árbol, debido a factores antrópicos y/o naturales, como tala, quema, caída de un rayo en el árbol, entre otros, que el modelo 3 no puede realizar.

La mayoría de árboles de la zona de estudio son coníferas y se hallan en plena edad adulta; además la especie predominante es el *Cupressus macrocarpa*. Según Montero & Muñoz (2005), ese tipo de especie se encuentran entre las plantas con mayor biomasa por tener una masa vegetal significativa, debido a su fuste y ramas. Esta es la razón principal de que los valores de correlación son altos y positivos, para

cada caso; ya que en varios estudios se ha demostrado que las especies coníferas son las que mejor se relacionan con el nivel de pixel de los sensores remotos; estimar biomasa aérea forestal dependen mucho de las características del árbol por especie. Esto se contrasta con los estudios realizados: Carreiras, et al., (2012) y Bending, et al., (2014), para estimar biomasa mediante Radar y usando el UAV respectivamente.

Estimar las reservas de biomasa de los bosques es importante para valorar la cantidad de carbono que se almacena en las estructuras vivas en un momento dado, lo cual es significativo para cuantificar la cantidad de gases (como por ejemplo el CO<sub>2</sub>) del efecto invernadero que no se libera evitando la deforestación o quema del mismo. Por tal motivo, el desarrollo de este proyecto servirá de dirección al momento de implementar nuevas metodologías no destructivas para las estimaciones de AGB, logrando una gestión sostenible de los recursos de los bosques y espacios verdes, reduciendo costo y tiempo, para la toma de decisiones en el desarrollo de las políticas relacionadas con el manejo forestal sostenible.

## **5.2. Recomendaciones**

Se debe tomar en cuenta, el tamaño de parcela óptimo para la calibración o construcción de los modelos de estimación, ya que no depende solo del tamaño de la parcela, sino también de la relación existente entre los tamaños de las coronas de los árboles dentro de la parcela. Las parcelas más grandes minimizan los efectos de borde de parcela relacionadas con la incertidumbre en la inclusión o exclusión de la corona de un árbol.

Esta investigación corrobora que la plataforma Radar puede utilizarse para extender las estimaciones de biomasa; se recomienda realizar estimaciones para grandes extensiones de terreno, una tarea que podría lograrse con ayuda de inventarios forestales; además de utilizar otras bandas; como por ejemplo la banda P o C que complementé la investigación, al estimar biomasa del fuste o subterránea; también usar otras plataformas Radar que contengan las 4 polarizaciones (HH, HV, VV, VH), con el fin de mejorar los resultados.

Para la aplicación de la metodología por UAV, en el desarrollo del CMS, es recomendable densificar y distribuir más puntos de control; para obtener un excelente MDS, que refleje correctamente la altura de la superficie. Además de utilizar otro software fotogramétrico que pueda ayudar con los procesos de generación de ortomosaicos y MDS, en especial para áreas forestales.

Dada la correlación encontrada mediante el índice de vegetación GNDVI, es recomendable utilizar además otros índices de vegetación que complementen la investigación, como: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), entre otros. Como una gran variedad de factores afecta directamente la estimación de biomasa, los índices pueden emplearse para determinar la influencia de dichos factores en una zona o momento. Así, pueden usarse para determinar el efecto sobre la biomasa de sequías, anegamientos, incendios, desmontes, granizo, plagas, o deficiencias nutricionales de un bosque.

Finalmente, el desarrollo de este proyecto ha permitido aplicar metodologías no destructivas y correlacionar sus resultados con los datos de la imagen Radar y UAV; sin embargo se puede mejorar, si se consideran otras variables como la densidad de árboles, de tal forma que se podría aproximar a los resultados de las ecuaciones alométricas en función de su densidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agisoft. (2015). *Agisoft PhotoScan*. Recuperado el 14 de Diciembre de 2017, de <http://www.agisoft.com/>
- Alvarez, J. (2005). *Evaluación de la aplicabilidad de la teledetección radar a la estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas*. Pamplona: Dpto de Proyectos e Ingeniería Rura, UPNA: 371.
- Barrio, A., Baldoa, M., Castedo, D., Dieguez, A., & Alvarez, G. (2006). *An ecoregional model for estimating volume, biomass and carbon pools in maritime pine stands in Galicia(northwestern Spain)*. España.
- Baskerville, G. L. (1972). *Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass* (Canadian Journal of Forestry 2, 49-53 ed.).
- Bending, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., & Bareth, G. (2014). *Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models(CSMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging* (Institute of Geography, GIS & RS, University of Cologne, 50923 Cologne, Germany ed.). Germany: Clement Atzberger and Prasad S. Thenkabai.
- Birk, R., Camus, W., Valenti, E., & McCandless, W. (1995). *Synthetic Aperture Radar Imaging Systems*. IEEE AES Systems Magazine, (November).
- Brown, S., Gillespie, A., & Lugo, A. (1989). *Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data*. Forest Science.
- Burbano, A. (2015). *Planeación de vuelos fotogrametricos* . Cali: Universidad del valle.
- C.C.R.S. (2011). *Retrieved 2011-06-13*. Canada: from <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>.
- Cancino, J. (2006). *Dendrometria Básica* (Concepción: Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento manejo de Bosques y Medio Ambiente ed.). Santiago de Chile.

- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid, España: Rialp., Ed.
- Chuvieco, E. (2007). *Teledetección Ambiental* (3ra edición ed.). Barcelona: Editorial Ariel S.A.
- Coll, J., & Vehi. (1999). *Nociones elementales sobre inventarios forestales*.
- Congreso Forestal Mundial. (2015). *Documentos finales del XIV Congreso Forestal Mundial, celebrado en Durban*. Sudáfrica: FAO.
- Díaz Franco, R., Acosta Mireles, M., Carrillo Anzures, F., Buendía Rodríguez, E., Flores Ayala, E., & Etchevers Barra, J. (2007). *Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en Pinus patula*. Schl . et Cham, 13(1), 25–34.
- Díaz, J. J. (Sep de 2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. Lima: Tesis de posgrado.
- Diéguez, U., Barrio, M., Castedo, F., Ruiz, A., Álvarez, M., Álvarez, J., & Rojo, A. (2003). *Biomasa forestal* (Ed. MundiPrensa y FUCOVASA ed.). Páginas 253-260, en *Dendrometría*.
- DJI. (2014). *Características del Matrice 100*. Recuperado el 01 de 12 de 2017, de <https://www.dji.com/es/matrice100/info#downloads>
- EORC. (18 de Junio de 2010). *EORC.JAXA*. Obtenido de [http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about\\_index.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about_index.htm)
- EPMMOP. (2012). *Parques y Áreas Verdes prioridad para los habitantes de Quito*. Recuperado el 21 de 05 de 2017, de [http://www.prensa.quito.gob.ec/index.php/index.php?module=Noticias&func=news\\_user\\_view&id=7175&umt=Parques%20y%20C1reas%20Verdes%20prioridad%20para%20los%20habitantes%20de%20Quito](http://www.prensa.quito.gob.ec/index.php/index.php?module=Noticias&func=news_user_view&id=7175&umt=Parques%20y%20C1reas%20Verdes%20prioridad%20para%20los%20habitantes%20de%20Quito)
- ESA. (2012). *European Space Agency* . SNAP Desktop.

- European Space Agency. (2007). *Information on ALOS PALSAR Products for ADEN Users*.
- Flynorth. (2015). *Cartografía, Fotogrametría y SIG*. Recuperado el 1 de Noviembre de 2017, de <http://flynorthgroup.com/es/fotogrametria/>
- Frulla, L., Milovich, J., Karszenbaum, H., & Kandus, P. (1998). *Metodologías de Pre-procesamiento y Procesamiento Utilizadas en el Tratamiento Cuantitativo de Datos SAR Para el Estudio de Ambientes en el Bajo Delta del Río Paraná* (Santos, Brasil, INPE: 1075-1086 ed.). Argentina: Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.
- Garcia, C., & Herrera, F. (2015). *Percepción remota en cultivos de caña de azúcar usando una cámara multiespectral en vehículos aéreos no tripulados* (Simposio Brasileiro Sensoriamento Remoto 2015 ed.).
- Garcia, J. L., & Martinez, M. J. (2014). *Biomasa y Biotecnología*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Ghasemi, N., Sahebi, M. R., & Mohammadzadeh, A. (2011). *A review on biomass estimation methods using synthetic aperture radar data*. *International Journal of Geomatics and Geosciences* (1(4):776-778. ed.).
- Grupo Empresarial ENCE. (2009). *El Valor de la Biomasa Forestal*.
- Gutiérrez, E. (2010). *Efectos de los aumentos de CO2 en la temperatura del aire y la disponibilidad de nitrógeno en plantas de Trigo (Triticum aestivum L.)*. España: Universidad de Salamanca. Facultad de Biología. Departamento de Fisiología vegetal.
- Henderson, F. M., & Lewis, A. J. (1998). *Principles and Applications of Imaging Radar*. New York.
- IGM. (2016). *Especificaciones Técnicas para la producción de cartografía a escala 1:5000*. Quito.
- IGN. (2015). *Curso de teledetección, fotogrametría, Lidar y ocupación del suelo* (CNIG ed.). Madrid: Instituto Geográfico Nacional.

- INEGI. (2010). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Mexico.
- IPCC. (2006). *Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Panel Intergubernamental del Cambio Climático.
- Kemerer, A. (2007). *Comparación de índices espectrales para la predicción del IAF en campos de maíz* (Asociación Española Teledetección ed.). Madrid: Congreso de teledetección: hacía mejor entendimiento de la dinámica global y regional.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2004). *Remote sensing and image interpretation* (5 Ed ed.). New York: John Miley & Sons.
- López, M. J., & Denore, B. (1999). *Los satélites de observación de la tierra en el 200*. Valencia: c.
- Lu, D. (2006). *The potential and challenge of remote sensing based biomass estimation*. *International Journal of Remote Sensing*, 27(7), 1297–1328. doi:10.1080/01431160500486732.
- Lucas, R., Armston, J., Fairfax, R., Fensham, R., Accad, A., Carreiras, K. J., & Peter Bunting, P. (2010). *An Evaluation of the ALOS PALSAR L-Band Backscatter—Above Ground Biomass Relationship Queensland, Australia: Impacts of Surface Moisture Condition and Vegetation Structure* (EEE Jornal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing ed.).
- Ludewing. (2006). *Universo y Muestra* (Instituto deInvestigaciones Económicas, Dirección de Publicaciones ed.). Caracas.
- Martinez, J., & Fernandez, A. (2004). *Cambio climático una visión desde Mexico*. Mexico: Secretaria del medio ambiente y Recursos Naturales del Ecología.
- Matteucci, D., & Colma, A. (1982). *Metodología para el estudio de la vegetación*. Washington: Secretaría General de la Organizacin de los Estados Americanos.
- Moges, S. M., Raun, W. R., Mullen, R. W., Freeman, K. W., Johnson, G. V., & Solie, J. B. (2004). *Evaluation of green, red and near infrared bands for predicting*

*winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield* (Department of Biosystems and Agricultural Engineering ed.). Oklahoma: Plant Nutr.

Montero, G. R., & Muñoz, M. (2005). *Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles* (Fotomecánica: Cicegra ed.). Madrid: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.

Mostacedo, B., & Fredericksen, T. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*. Santa Cruz, Bolivia.

Nguyen, N. T. (2010). *Estimation and mapping of above ground biomass for the assessment and mapping of carbon stocks in tropical forest using SAR data : a case study in Afram headwaters forest, Ghana*. Enschede: University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC).

Páez, C. (2014). *Estimación de biomasa forestal y capacidad de captura de carbono de las especies forestales Weinmannia tomentosa Y Myrcianthes sp.* Tunja: Universidad Nacional Abierta y a distancia UNAD.

Popescu, S. C. (2007). *Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar* (Biomass and Bioenergy, 31 (9), 646-655 ed.).

Rojas, S. (2011). *Evaluación de metodologías para identificación de cambio de uso*. Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Ecuador.

Rojas, S. (2015). *Estimación de biomasa forestal mediante el uso de imágenes Radar*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

Rügnitz, M. T., Chacón, M. L., & Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales* (1a. Ed. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) ed.). Lima: Consorcio Iniciativa Amazónica (IA).

Schubert, A., & Small, D. (2008). *Guide to ASAR Geocoding*. Zürich, Germany: Remote Sensing Laboratories.

Schubert, A., & Small, D. (2008). *Guide to ASAR Geocoding*. Zürich, Germany: Remote Sensing Laboratories.

- SENPLADES. (2013). *Plan Nacional Buen Vivir*. Quito: Secretaria Nacional de Planificación y Desarrollo .
- SIGSA. (2012). *Distribuidor exclusivo de Esri* . Recuperado el 22 de Noviembre de 2017, de <http://www.sigsa.info>
- Skolnik, M. I., & McGraw, H. (1980). *Introduction to Radar Systems*. Second Edition.
- Sorensen, M., Barzetti, V., Keipi, K., & Williams, J. (1998). *Manejo de las áreas verdes urbanas*. Estados Unidos.
- Vararey, F. (2015). *COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL DE PEARSON*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2017, de <https://personal.us.es/vararey/adatos2/correlacion.pdf>
- Wiora, G. (2005). *Principle of a sonar or radar distance measurement*.