

INGRESE LOS DATOS EN LOS CASILLEROS DE FONDO BLANCO:

Active para iniciar; desactive al finalizar →

[Doble_clic](#)

Nombre del/de la tesista:	Alvaro Sebastian Claros Canales		
Sexo:	Masculino		
Nombre de la tesis:	Estimación del volumen de fustes a partir de fotografías aéreas captadas desde un vant en el distrito de Chanchamayo, Junín.		
Fecha de sustentación:	16/07/2018	Fecha de publicación:	2019
Calificativo:	Sobresaliente		
Presidente del Jurado:	Wilfredo Ojeda Ojeda	Ing.	
Miembro del Jurado:	Juan Carlos Ocaña Canales	Ing.	
Miembro del Jurado:	Roxana Guillén Quispe	Mg. Sc.	
Asesor:	Víctor Barrena Arroyo	Mg. Sc.	
Co-Asesor:			
Resumen breve (máx. 1000 caracteres):	La finalidad de esta investigación es estimar el volumen de individuos dominantes mediante una ecuación de volumen en función del diámetro de copa medido en un ortomosaico generado con un Vehículo Aéreo No Tripulado, en el distrito de Chanchamayo, Junín.		
Palabras claves (máx. 6)	Aeronaves, Fotografía Aérea, Volumen, Copa, Fotogrametría		

[Ir a página de carátula](#)

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE FUSTES A
PARTIR DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS
CAPTADAS DESDE UN VANT EN EL
DISTRITO DE CHANCHAMAYO, JUNÍN.**

Presentado por:

Alvaro Sebastian Claros Canales

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL

Lima - Perú
2019

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos para calificar la sustentación del Trabajo de Tesis, presentado por el ex-alumno de la Facultad de Ciencias Forestales, Bach. **ALVARO SEBASTIAN CLAROS CANALES**, intitulado “ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE FUSTES A PARTIR DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS CAPTADAS DESDE UN VANT EN EL DISTRITO DE CHANCHAMAYO, JUNÍN. ”.

Oídas las respuestas a las observaciones formuladas, lo declaramos:

.....

con el calificativo de

En consecuencia queda en condición de ser considerado APTO y recibir el título de INGENIERO FORESTAL.

La Molina, 16 de Julio de 2018

.....
Ing. Wilfredo Ojeda Ojeda
Presidente

.....
Ing. Juan Carlos Ocaña Canales
Miembro

.....
Mg. Sc. Roxana Guillén Quispe
Miembro

.....
Mg. Sc. Víctor Barrena Arroyo
Asesor

DEDICATORIA

A mi padre: Oscar Raúl Claros Carbajal, por ser el padre que cualquier buen hijo debe merecer, por su amor, comprensión y apoyo en los buenos y malos momentos.

A mi madre: Roxana Betzabeth Canales Grados, por ser mi sostén y el abrazo reconfortante en cada momento de mi vida.

A mis hermanos: Henry Galván Canales y Daniel Manrique Canales, por mostrarme que, a pesar de las diferencias, lo que siempre va a importar es la familia.

A Susana Contreras Segá, por enseñarme lo que es y cuánto realmente vale la amistad durante toda mi etapa universitaria, estando seguro que me seguirá enseñando lo mismo durante toda mi vida.

A Diego Monteza Dominguez, por enseñarme el significado de la paciencia y la fortaleza que existe dentro de mí para lograr cada sueño en esta vida, por más pequeño que sea.

A mis maestros, amigos y a todos aquellos que considero parte de mi familia, por ser piezas claves para ser feliz en este mundo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi asesor, el profesor y amigo Víctor Barrena Arroyo; por su dedicación, paciencia y apoyo en todo el desarrollo de la presente tesis, por aclarar todas mis dudas que surgieron en el camino y por todas las enseñanzas dentro y fuera del plano académico.

Agradecer a las personas que me brindaron oportunidades para aprender y crecer durante toda mi formación como profesional hasta el día de hoy. Empezando por los compañeros de Consultores Asociados en Naturaleza y Desarrollo, por ser el primer empujón y la ventana para aprender todo lo que sé sobre los VANTs, y luego a mi amiga y profesora Ethel Rubín de Celís, y a todos los compañeros de la Sala de Observación – Perú, por apoyarme y seguir empujándome para terminar este reto.

Agradezco también a todo el equipo técnico y de recursos humanos del proyecto DINAFOR “Dinámica de los bosques de la selva central y su adecuación ante el cambio climático”, en especial al profesor Carlos Reynel, coordinador del proyecto y a la profesora Sonia Palacios parte del equipo del proyecto, por su apoyo y motivación para la realización de la presente tesis.

Agradecimientos especiales al Laboratorio de Dendrología y Herbario de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (MOL) y al Instituto Regional de Desarrollo – IRD Selva de la UNALM, por el apoyo brindado.

Nuevamente dar las gracias a mi familia y amigos de la vida, y a todos aquellos que siempre confían en que puedo lograr todo lo que me propongo y el presente es una prueba de ello.

Esta investigación es financiada por Cienciactiva, CONCYTEC.

RESUMEN

La presente investigación se realizó en el área de una parcela permanente de medición del Proyecto DINAFOR “Dinámica de los bosques de la selva central y su adecuación ante el cambio climático”, ubicada dentro de los límites del Instituto Regional de Desarrollo – Génova, en el distrito de Chanchamayo, departamento de Junín. El objetivo fue contribuir en las metodologías de inventarios forestales, mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados en la estimación de volumen, estableciendo una ecuación de volumen con 40 datos de árboles de un bosque secundario joven, en función del diámetro de copa obtenido en un ortomosaico generado a partir de fotografías aéreas capturadas con una cámara digital RGB montada en la aeronave. Se generó un ortomosaico de fotografías aéreas a 100 metros sobre el nivel del suelo, con traslape del 90% entre fotografías, en donde se obtuvo el diámetro de copa. Paralelamente se realizó una sistematización de datos medidos en campo, para calcular el volumen total de cada individuo. Se seleccionaron 7 modelos de ecuación que consideraron como única variable independiente al diámetro de copa y se realizó la regresión lineal basada en los mínimos cuadrados mediante la herramienta “Análisis de Datos” presente en el software Microsoft Excel. Los resultados obtenidos se utilizaron para la selección de ecuaciones, se consideró el análisis de los siguientes criterios estadísticos: coeficiente de determinación (R^2), pruebas de significancia estadísticas de Fisher y t – student y el análisis de residuales. Dentro de este primer análisis, solamente 4 modelos cumplieron con todos los criterios a excepción del análisis de residuales, ya que presentaron heterocedasticidad de varianzas. Debido a ello, se realizó la ponderación de las ecuaciones, utilizando 8 factores de ponderación y obteniendo 28 modelos de ecuaciones ponderadas, que se analizaron y seleccionaron de acuerdo a los mismos criterios estadísticos indicados anteriormente. Solamente 3 modelos cumplieron con la homocedasticidad de varianzas de sus residuos, con lo cual se calculó el Índice de Furnival para seleccionar la mejor ecuación, llegando a la conclusión que la mejor ecuación que estima el volumen de fustes de árboles dominantes de un bosque secundario joven en Chanchamayo, Junín es: $V = 0,18803451 + 0,00968219d_{\text{copa}}^2$.

Palabras claves: Aeronaves, Fotografía aérea, Volumen, Copa, Fotogrametría.

ÍNDICE GENERAL

	Página
I. Introducción	1
II. Revisión de Literatura	3
1. Bosque húmedo tropical	3
2. Estimación del volumen de árboles.....	7
2.1. Medición de los árboles en pie.....	7
2.1.1. Medición del diámetro	7
2.1.2. Medición de la altura.....	8
2.1.3. Medición del diámetro de copa	9
2.2. Volumen.....	10
2.3. Ecuaciones de volumen	11
2.4. Regresión lineal basado en el método de los mínimos cuadrados	14
2.4.1. Coeficiente de determinación (R^2).....	17
2.4.2. Prueba de significancia del conjunto de variables (prueba estadística fisher)	18
2.4.3. Prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión (Prueba estadística t-Student).....	19
2.4.4. Análisis de los residuos.....	19
2.5. Análisis de regresión ponderada	22
2.6. Índice de furnival.....	23
3. Fotogrametría.....	24
3.1. Fotogrametría digital.....	25
3.1.1. Proceso fotogramétrica y productos	27
4. Vehículo aéreo no tripulado (vant)	29
4.1. Planificación del vuelo	34
4.1.1. Distancia de muestreo en el terreno.....	36
III. Materiales y Métodos.....	37
1. Lugar de estudio	37
1.1. Ubicación geográfica.....	37
1.2. Características del área de estudio	40
2. Equipos y materiales.....	42
2.1. Equipos.....	42
2.2. Softwares.....	42
2.3. Materiales.....	42
3. Metodología	43
3.1. Fase de planificación.....	43
3.1.1. Planificación del vuelo.....	43
3.1.2. Reconocimiento del área de estudio.....	45
3.2. Fase de campo.....	46
3.2.1. Ejecución del vuelo y toma de fotografías aéreas.....	46
3.2.2. Selección de árboles	47
3.2.3. Toma de datos de campo	47
3.3. Fase de gabinete.....	49
3.3.1. Procesamiento de fotografías aéreas	49
3.3.2. Selección del ortomosaico.....	50
3.3.3. Delimitación del área de copa.....	50
3.3.4. Sistematización de los datos de campo.....	51
3.3.5. Comparación de los diámetros de copa	51
3.3.6. Cálculo de volúmenes de fustes.....	52

3.3.7.	Análisis de variables.....	52
3.3.8.	Selección de los modelos de ecuación.....	52
3.3.9.	Análisis de regresión lineal basado en el método de los mínimos cuadrados	53
3.3.10.	Ponderación de ecuaciones	54
3.3.11.	Análisis de regresión lineal basado en el método de los mínimos cuadrados para las ecuaciones ponderadas	55
3.3.12.	Elección de la mejor ecuación.....	55
3.3.13.	Comparación entre el volumen estimado y el volumen real.....	55
IV.	Resultados y discusión	57
1.	Fase de campo.....	57
1.1.	Reconocimiento del área de estudio	57
1.2.	Parámetros de vuelo y sobrevuelo.....	57
1.3.	Selección de árboles.....	59
1.4.	Medición en campo.....	62
2.	Fase de gabinete.....	63
2.1.	Selección del ortomosaico.....	63
2.2.	Distancia de muestreo en el terreno	64
2.3.	Delimitación de la copa del árbol.....	64
2.4.	Sistematización de los datos	67
2.5.	Comparación de los diámetros de copa.....	68
2.6.	Cálculo de volúmenes individuales de fustes.....	69
2.7.	Análisis de variables	70
3.	Ecuaciones de volumen.....	73
3.1.	Análisis de regresión basado en el método de los mínimos cuadrados	73
3.2.	Análisis de regresión ponderada	79
3.2.1.	Análisis de residuales	81
4.	Elección de la mejor ecuación	90
4.1.	Índice de furnival.....	90
4.2.	Ecuación de volumen seleccionada	90
V.	Conclusiones.....	95
VI.	Recomendaciones	97
VII.	Referencias bibliográficas	99
VIII.	Anexos.....	111

Índice de tablas

Tabla 1:	Modelos de ecuaciones más utilizados.....	13
Tabla 2:	Características de los principales tipos de VANTs.	31
Tabla 3:	Ventajas y Desafíos de los VANTs.	33
Tabla 4:	Imágenes de aviones tripulados vs imágenes de aviones no tripulados.	33
Tabla 5:	Tabla comparativa entre aviones y multirrotores.	34
Tabla 6:	Chanchamayo y sus distritos: capital, altitud, superficie y perímetro.	38
Tabla 7:	Coordenadas de la “Parcela Génova Ladera - 2”	40
Tabla 8:	Características climáticas según distritos.	40
Tabla 9:	Condiciones generales del vuelo.....	44
Tabla 10:	Cámara del VANT.	44
Tabla 11:	Cobertura fotográfica y vuelo.	45
Tabla 12:	Modelos de ecuación de volumen seleccionadas.	53
Tabla 13:	Evaluación de las parcelas permanentes de medición.....	57
Tabla 14:	Parámetros de vuelo.	58
Tabla 15:	DAP y altura de fustes para 50 individuos de la “Parcela Génova Ladera - 2” ...	62
Tabla 16:	Resultados de los ortomosaicos generados,.....	63
Tabla 17:	Áreas y diámetros de copas.....	66
Tabla 18:	Parámetros estadísticos para el diámetro de copa.	66
Tabla 19:	Ejemplo de la sistematización de los datos de campo,.....	67
Tabla 20:	Resultados de una prueba de hipótesis de dos colas.	68
Tabla 21:	Volumen de fustes (m^3) de árboles individuales	70
Tabla 22:	Ejemplo del análisis de regresión para el Modelo 1,.....	73
Tabla 23:	Ejemplo del análisis de regresión para el Modelo 1.....	73
Tabla 24:	Ejemplo del análisis de regresión para el Modelo 1.....	74
Tabla 25:	Ecuaciones y su coeficiente de determinación.	74
Tabla 26:	Ecuaciones y su valor Fisher.....	75
Tabla 27:	Ecuaciones y su valor t - student.....	75
Tabla 28:	Ecuaciones ponderadas.	79
Tabla 29:	Resumen del análisis de regresión.	80
Tabla 30:	Índice de Furnival.....	90
Tabla 31:	Prueba de hipótesis para dos muestras independientes y pequeñas.....	91

Índice de figuras

Figura 1:	Curva de transición de bosques.....	3
Figura 2:	Gráfico de dispersión de puntos y la línea de regresión población lineal – simple.....	15
Figura 3:	Gráfico de residuales (homocedasticidad).....	20
Figura 4:	Gráfico de residuales (Heterocedasticidad).....	21
Figura 5:	Gráfico de residuales (Relación no lineal)	21
Figura 6:	Gráfico de residuales (Observación influyente).....	21
Figura 7:	Imagen digital en RGB.....	26
Figura 8:	Clasificación de aeronaves por su forma de sustentación.....	29
Figura 9:	Relación entre el GSD y la altura de vuelo.	36
Figura 10:	Ubicación de la provincia de Chanchamayo en el departamento de Junín.	37
Figura 11:	Ubicación de la provincia de Chanchamayo en el departamento de Junín.	38
Figura 12:	Mapa de ubicación de la Parcela Génova Ladera - 2 – PPM.....	39
Figura 13:	Fase de planificación.....	43
Figura 14:	Fase de campo.	46
Figura 15:	Medición de los diámetros a diferentes alturas con el Relascopio de Bitterlich.	48
Figura 16:	Medición del radio de copa mediante la proyección de la misma.	48
Figura 17:	Fase de gabinete.	49
Figura 18:	Esquema del recorrido del VANT para la toma de fotografías aéreas.	59
Figura 19:	Ortomosaico para la selección de árboles.....	60
Figura 20:	Selección de árboles con su número correlativo en el iPad Mini 4.	61
Figura 21:	Identificación de árboles para su medición.	61
Figura 22:	Ortomosaico a 100 metros de altura del área de estudio,.....	64
Figura 23:	Copa delimitada para un árbol,	65
Figura 24:	Distribución de los árboles por clase diamétrica.....	68
Figura 25:	Gráfica de la distribución Z en la prueba de hipótesis.	69
Figura 26:	Relación del volumen (m^3) con el diámetro de copa (m)	71
Figura 27:	Relación del volumen (m^3) con el diámetro de copa al cuadrado (m).....	71
Figura 28:	Relación del volumen (m^3) con el diámetro de copa al cubo (m).....	72
Figura 29:	Relación del volumen (m^3) con el radio de copa (m).....	72
Figura 30:	Análisis de residuales de la ecuación 1.....	76

Figura 31:	Análisis de residuales de la ecuación 2.....	77
Figura 32:	Análisis de residuales de la ecuación 3.....	77
Figura 33:	Análisis de residuales de la ecuación 4.....	78
Figura 34:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 7.	81
Figura 35:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 8.	82
Figura 36:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 9.	82
Figura 37:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 10.	83
Figura 38:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 11.	83
Figura 39:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 12.	84
Figura 40:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 13.	84
Figura 41:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 14.	85
Figura 42:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 15.	85
Figura 43:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 16.	86
Figura 44:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 17.	86
Figura 45:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 18.	87
Figura 46:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 19.	87
Figura 47:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 20.	88
Figura 48:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 21.	88
Figura 49:	Análisis de residuos de la ecuación ponderada 22.	89
Figura 50:	Volumen real versus volumen estimado de 9 árboles de la Parcela Génova Ladera - 2.....	91
Figura 51:	Distribución t student	92
Figura 52:	Volumen real versus volumen estimado de árboles de la Parcela Génova Ladera - 2.....	92

Índice de anexos

Anexo 1 Verificación de condiciones de vuelo para el vant	111
Anexo 2 Identificación de áreas de claros	112
Anexo 3 Costos de adquisición del vant y vuelo	113
Anexo 4 Medición del diámetro a la altura del pecho	114
Anexo 5 Medición de los diámetros a diferentes alturas	115
Anexo 6 Medición de los radios de copa	116
Anexo 7 Ortomosaico a 60 metros de altura.....	117
Anexo 8 Ortomosaico a 70 metros de altura.....	118
Anexo 9 Ortomosaico a 80 metros de altura.....	119
Anexo 10 Ortomosaico a 90 metros de altura.....	120
Anexo 11 Ortomosaico a 150 metros de altura.....	121
Anexo 12 Sistematización de los datos.....	122
Anexo 13 Regresión del modelo 1	139
Anexo 14 Regresión del modelo 2	140
Anexo 15 Regresión del modelo 3	141
Anexo 16 Regresión del modelo 4	142
Anexo 17 Regresión del modelo 5	143
Anexo 18 Regresión del modelo 6.....	144
Anexo 19 Regresión del modelo 7.....	145
Anexo 20 Regresión del modelo ponderado 7.....	146
Anexo 21 Regresión del modelo ponderado 8.....	147
Anexo 22 Regresión del modelo ponderado 9.....	148
Anexo 23 Regresión del modelo ponderado 10.....	149
Anexo 24 Regresión del modelo ponderado 11.....	150
Anexo 25 Regresión del modelo ponderado 12.....	151
Anexo 26 Regresión del modelo ponderado 13.....	152
Anexo 27 Regresión del modelo ponderado 14.....	153
Anexo 28 Regresión del modelo ponderado 15.....	154
Anexo 29 Regresión del modelo ponderado 16.....	155
Anexo 30 Regresión del modelo ponderado 17.....	156
Anexo 31 Regresión del modelo ponderado 18.....	157

Anexo 32 Regresión del modelo ponderado 19.....	158
Anexo 33 Regresión del modelo ponderado 20.....	159
Anexo 34 Regresión del modelo ponderado 21.....	160
Anexo 35 Regresión del modelo ponderado 22.....	161

I. INTRODUCCIÓN

Los bosques montanos y premontanos se encuentran entre los 1000 – 3500 de altura, en América Latina estos ecosistemas representan aproximadamente 24 millones de hectáreas con extensiones importantes en México, Guatemala, Nicaragua, Honduras para Mesoamérica; y Perú, Colombia, Venezuela y Argentina para Sudamérica (Kapos, *et al.* 2000). En nuestro país, estas formaciones boscosas forman parte de la vertiente oriental andina en la Selva Central, ubicándose en las regiones de Junín y Pasco. Estos bosques se encuentran sobre relieves empinados y pendientes de difícil acceso, además presentan una gran variedad de especies de flora y fauna que se distribuyen en diferentes hábitats, muchas de ellos son endémicas y cumplen un importante rol ecológico (Giacomotti, 2016).

La presión del hombre en las actividades antrópicas ha puesto en amenaza a estos bosques, sufriendo pérdidas por deforestación y cambios por la variabilidad climática. Es por ello que radica la importancia de su estudio y monitoreo para futuras decisiones y el complementar el en los conocimientos sobre su dinámica.

El desarrollo y aplicación de la teledetección y de los sistemas de información geográfica sirven para la planificación y ejecución de actividades que conllevan la recopilación de información de manera remota. Dentro de este avance, se encuentra el desarrollo acelerado de los Vehículos Aéreos No Tripulados o VANTs, los cuales, en los últimos años han aumentado su popularidad debido a su facultad de poder dar a los usuarios una vista a vuelo de pájaro instantánea (Dustin, 2015). Estos VANTs tienen una amplia gama de aplicaciones que abarcan a la ingeniería civil, arquitectura, ciencias audiovisuales, ciencias de la comunicación, ingeniería ambiental y evaluación de recursos naturales, tan sólo por mencionar los más resaltantes.

Dentro de la evaluación de recursos forestales, estas aeronaves son una herramienta para monitorear la cobertura tanto de bosques naturales como de plantaciones, desarrollando sistemas de planificación y gestión para cada tipo de cobertura boscosa y una mejor toma de decisiones. De los VANTs se pueden obtener datos más detallados acerca de la ocurrencia,

extensión y motores de la degradación, así como de su crecimiento. (Paneque – Gálvez, *et al.* 2014)

Una de las variables más estudiadas al momento de realizar un levantamiento de información en campo para determinar la existencia y productividad de una cobertura boscosa, es el volumen. Este volumen es calculado en base a un inventario forestal, en el cual se utiliza una muestra para la estimación del volumen mediante una ecuación de volumen en función de alguna de las características medibles del árbol, como pueden ser: diámetro a la altura del pecho, altura del fuste o diámetro de copa.

En la presente investigación se ha utilizado un VANT para la toma de fotografías aéreas y datos dasométricos medidos en campo de árboles dominantes presentes en una parcela permanente de medición del Proyecto DINAFOR - “Dinámica de los bosques de la selva central y su adecuación ante el cambio climático”, en el departamento de Junín.

El objetivo general es contribuir al desarrollo de metodologías en inventarios forestales y evaluación de bosques a través del uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs). Los objetivos específicos son, el determinar los parámetros de vuelo del VANT para la captura de fotografías aéreas en un bosque secundario joven y elaborar una ecuación de volumen en función del diámetro de copa de árboles dominantes en el distrito de Chanchamayo, departamento de Junín.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

1. BOSQUE HÚMEDO TROPICAL

Vickery (1987), menciona que esta vegetación es una de las más antiguas y que en teoría cubre gran parte de la superficie terrestre comprendida entre latitudes que van de los 10°N a 10°S, este bosque es la vegetación clímax en áreas con 2000 mm a más de 4000 mm de precipitación por año, temperaturas promedio de 25°C con poca variación durante el año y una humedad promedio de 80%.

Loayza (1982), indica que estos bosques se observan aún abundantes en muchos países de las zonas tropicales y subtropicales, son el eslabón final de la sucesión ininterrumpida de comunidades vegetales llamada clímax. Louman (2001), define a esta sucesión como un proceso de cambio en la estructura y composición de la vegetación en un sitio determinado, tal como se observa en la Figura 1, en donde a lo largo del tiempo se encuentran una serie de comunidades vegetales diferentes.

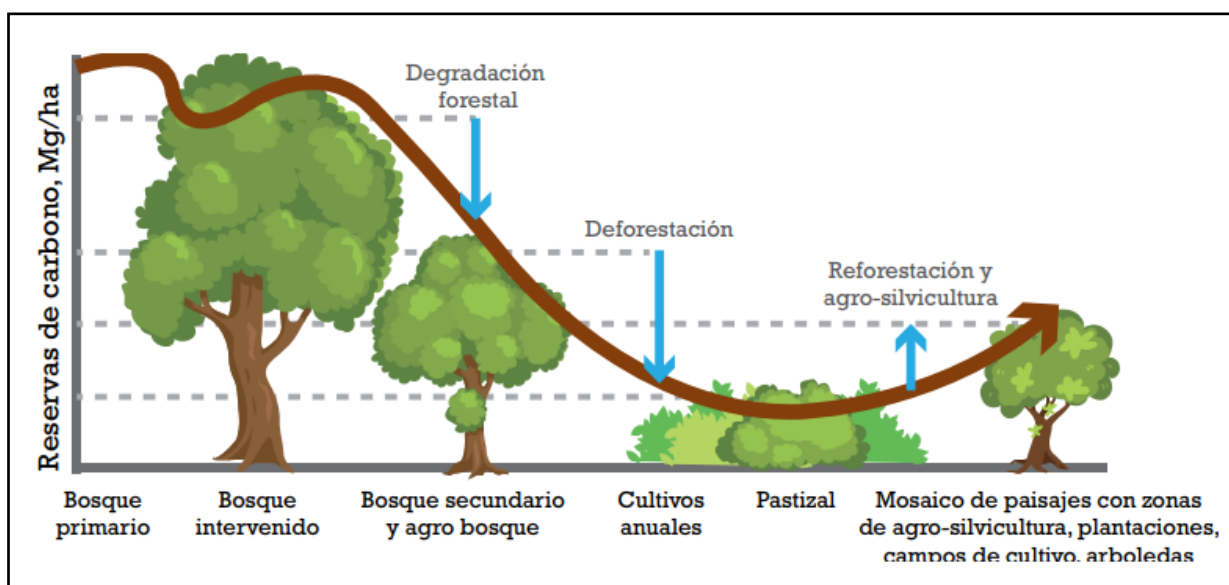


Figura 1: Curva de transición de bosques.

FUENTE: Programa de investigación del CGIAR Bosques, Árboles y Agroforestería citado por MINAM (2016).

En la actualidad, la mayor área de este tipo de bosque se encuentra en la Cuenca Amazónica de Sudamérica, y también grandes extensiones en la región Indo-Malasia y en África este bosque se encuentra alrededor del Golfo de Guinea y en el Valle de Congo (Vickery, 1987).

MINAM (2016), señala que los bosques en el Perú constituyen el ecosistema de mayor superficie, con 73 280 424 hectáreas, que representan el 57,3%, dentro de estos bosques se encuentran los bosques húmedos amazónicos que cubren el 53,9% del país.

FAO y SERFOR (2016), indican que, en nuestro país, la región de la selva está ubicada en la zona oriental y posee una superficie aproximada de 77 762 019,29 hectáreas y va de los 100 hasta los 3800 msnm, con una cubierta vegetal en su mayoría arbórea y siempre verde. Esta región se subdivide en Ceja de Selva (por encima de los 2000 msnm), Selva alta (entre los 500 y 2000 msnm) y Selva baja (por debajo de los 500 msnm).

Para la evaluación, toma y generación de datos del recurso forestal en un Inventario Nacional Forestal, FAO y SERFOR (2016), dividen a la región selva en 3 ecozonas:

- Ecozona Selva Alta Accesible: Abarca una superficie aproximada de 10 942 030 hectáreas que representa el 8,51% con respecto al área total del país. Está dominado por cobertura arbórea de fuste recto y copas amplias en las zonas bajas, con árboles de hasta 35 metros de altura.
- Ecozona Selva Alta Difícil: Cubre una superficie aproximada de 11 477 988 hectáreas, que representa el 8,93% del área total del país. Es una ecozona con fisiografía generalmente montañosa de fuertes pendientes y muy disectadas, debido a esto presenta suelos muy superficiales que logran que domine vegetación arbórea de portes bajos en las partes altas, achaparradas, de fuste retorcido y copas reducidas con raíces superficiales. Y, por otro lado, las partes bajas con suelos más profundos, se presentan árboles más erguidos, altos con fustes rectos, copas amplias y raíces más profundas.
- Ecozona Selva Baja: Es la más extensa de las ecozonas y representa aproximadamente el 36,68% del área del país. Predomina la vegetación de porte arbóreo, y éstos pueden llegar hasta los 45 metros de altura, con fustes definidos y rectos, copas amplias y frondosas.

SERFOR (2016), indica que, para la evaluación de bosques, se deben tomar en cuentas las siguientes variables de interés:

- Composición florística: Hace referencia a las familias, géneros y especies de los árboles. Esto permite obtener información sobre la abundancia de especies por unidad muestral, diversidad de especies y familias registradas en el área de estudio.
- Estructura horizontal del bosque: Se puede evaluar, a través del análisis de la distribución de los diámetros de los individuos, el estado poblaciones de los bosques para tomar decisiones acerca de su conservación. Louman, *et al.* (2001), señala que la estructura horizontal de un bosque se representa en la distribución de los árboles por clases diamétricas, siendo esta estructura el resultado de las plantas al ambiente y a las limitantes y amenazas que pueden existir. Malleux (1982), por otro lado, indica que el diámetro es el parámetro más importante en términos cuantitativos para un inventario forestal, y esto por dos razones: a) Porque puede ser medido en forma directa y, por lo tanto, se pueden obtener datos precisos y b) porque, en base a él se pueden obtener relaciones con los demás parámetros del árbol como son las alturas, volúmenes y diámetros de copa.
- Índice de Valor de Importancia (IVI): Se utiliza para determinar la dominancia de las familias y especies, y el grado de heterogeneidad del ecosistema. Lampreth (1900), menciona que este índice es uno de los más conocidos, ya que resume los parámetros de abundancia, frecuencia y dominancia relativas y describe la comunidad vegetal en el presente, da una referencia aproximada de cómo es la estructura horizontal del bosque.
- Número de individuos: Es el número de especímenes que tienen la talla mínima para su medición, que en promedio se pueden hallar en un área de referencia.
- Área basal: Es el área calculada de las secciones de los fustes que tienen la talla mínima de medición y han sido registros que corresponde en promedio a un área de referencia que en su mayoría es 1 hectárea. Cancino (2006), indica que esta área corresponde a la suma de la sección transversal del fuste a la altura del diámetro a la altura del pecho de todos los árboles por unidad de superficie.
- Volumen: Representa los metros cúbicos (m^3) de material leñoso proveniente de árboles y/o arbustos que tienen la misma talla de medición y que corresponde en promedio a un

área de referencia (1 hectárea). Malleux (1982), señala que este valor es importante como indicador del potencial o capacidad de producción del bosque.

- Condición fitosanitaria: Se evalúa si es que los individuos han sufrido algún tipo de daño, sea por causa natural o antrópica, y que comprometa su supervivencia o capacidad productiva.
- Estado: Se indica si el individuo está vivo o muerto, o es un tocón. Esta diferenciación es importante para los cálculos de volumen, biomasa y carbono existente.
- Regeneración natural: Se hace referencia a los individuos jóvenes (latizales y brinzales), de los que se hace el conteo para estimar la abundancia de los mismos y hallar un promedio a un área de referencia.

Louman (2001), menciona que en los bosques tropicales húmedos se pueden realizar medición en sitios permanentes demarcados denominados parcelas permanentes de medición, donde periódicamente se miden con el objetivo de identificar, describir y cuantificar los procesos dinámicos del bosque. Gómez y Salazar (2010), señalan que los datos que se obtienen de las parcelas como crecimiento y producción, tienen implicancias directas para el manejo forestal y así tomar decisiones en el corto, mediano y largo plazo para invertir en dicha actividad. Esta información obtenida es usada para construir, mejorar o actualizar los cálculos, en cuanto a la dinámica del bosque en su estado natural e intervenido para mejorar su estructura.

PNUMA (1998), menciona una serie de beneficios por lo cual los bosques húmedos tropicales son de gran importancia:

- Estabilización climática y atmosférica: Debido a que los bosques son importante almacén de carbono, por lo que son un factor clave en la absorción del dióxido de carbono (CO₂) y en la producción de oxígeno (O₂).
- Reguladoras fundamentales del ciclo hídrico y de la humedad.
- Regulación hídrica en cuencas y aminoramiento de inundaciones y deslaves: Debido a su existencia, el agua desciende más lentamente y puede ser aprovechada de mejor manera por los seres vivos.

- Protección de suelos y control de sedimentación: Reducen y controlan los procesos de erosión en zonas de alto poder pluvial y de sedimentación de los cuerpos de agua, en particular, se aumenta la vida útil de presas hidroeléctricas y de otro tipo.
- Fuente de productos forestales: Se hace mención a los productos maderables y no maderables que ofrecen potencialidad económica alta.
- Fuente de productos de la vida silvestre.
- Productos farmacéuticos.
- Valor estético y turístico.

2. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE ÁRBOLES

Cancino (2006), señala que el estado de un rodal en un momento determinado del tiempo se puede caracterizar a partir de mediciones en los árboles y observaciones en parcelas u otro tipo de unidad de muestreo. Estas mediciones permiten obtener tanto resultados cualitativos y cuantitativos como el volumen individual de los árboles y de toda el área de bosque a evaluar.

2.1. MEDICIÓN DE LOS ÁRBOLES EN PIE

2.1.1. MEDICIÓN DEL DIÁMETRO

Romanh y Ramírez (2010), indican que la medición del diámetro consiste en determinar la longitud de recta que al pasar por el centro de un círculo termina en los puntos en que toca a la circunferencia. Lo importante de esta medición radica en que es una dimensión que casi siempre se puede medir en forma directa y con ésta se puede calcular el área de la sección transversal y el volumen.

Contreras, *et al.* (1999), señalan que esta medición corresponde al diámetro del árbol medido a 1,30 metros del nivel del suelo en condiciones normal, es decir, cuando el árbol se encuentra de manera perpendicular al suelo y presenta un fuste recto y cilíndrico. Sin embargo, en el campo existen muchos casos particulares que ameritan la modificación de dicha medición.

Prodan, *et al.* (1997), mencionan que la medición de esta variable es la operación más sencilla y corriente de medición. En árboles de pie, la altura para medir el diámetro representativo del árbol es 1,30 m desde el nivel del suelo y se denomina diámetro a la altura del pecho.

Cancino (2006), indica que los instrumentos utilizados para la medición de los diámetros se denominan dendrómetros, entre los cuales destacan por su facilidad de uso las forcípulas (de brazos paralelos o finlandensas) y las huinchas o cintas diamétricas. Otro instrumento útil es el Relascopio de Bitterlich.

2.1.2. MEDICIÓN DE LA ALTURA

Chave (2005), señala que la altura es una variable geométrica fundamental para los árboles. Sin embargo, la mayoría de las mediciones se realizan en forma de inspección visual en donde casi siempre se produce un sesgo, ya que es difícil valorar el tamaño vertical de objetos entre los 10 y 40 metros de altura.

Ugalde (1981), menciona que la altura es una variable necesaria para estimar el volumen y el crecimiento para la clasificación de sitios.

En relación con las alturas, Romanh y Ramírez (2010) indican que según la parte del árbol de que se trate, se distinguen las siguientes:

- a) Altura total: Del suelo hasta el ápice de la copa. Cailliez (1980), señala que esta altura es la longitud de la línea recta que une el pie del árbol con la extremidad de la yema terminal del mismo.
- b) Altura del fuste: Del suelo hasta la base de la copa.
- c) Altura de la copa: Es la diferencia de las dos alturas anteriores.
- d) Altura comercial: Hace referencia a la parte del fuste aprovechable; se determina por el diámetro mínimo comercial o por defectos y por altura del tocón.

Para la medición de la altura, se utilizan dos tipos de instrumentos, aquellos hipsómetros basados en principios geométricos; que son: Hipsómetro Christen, hipsómetro Vorkampff – Laue y el hipsómetro Merrit. Por otro lado, también existen los hipsómetros basados en principios trigonométricos, y los más comunes son: Hipsómetro Blume – Leiss y Haga, el nivel Abney y el clinómetro Suunto (Prodan, *et al.* 1997).

Cancino (2006), menciona que, para realizar la medición, se debe posicionar a cierta distancia del árbol, apuntar con el instrumento a la base y al otro punto de interés en el árbol y realizar ambas lecturas en el instrumento, considerando los valores sobre la horizontal como positivos y aquellos debajo como negativos, el valor absoluto de la diferencia entre ambas mediciones entrega la altura buscada.

2.1.3. MEDICIÓN DEL DIÁMETRO DE COPA

La copa es uno de los componentes del árbol que influyen en la producción primaria, ya que sus dimensiones reflejan el vigor del mismo, de modo que copas densas y altas se asocian con un crecimiento vigoroso; y, por el contrario, las copas poco desarrolladas y poco densas reflejan condiciones desfavorables de crecimiento debido a estrés por humedad, competencia, plagas y/o enfermedades de hojas (Schomaker, *et al.* 1999).

Binkley, *et al.* (2011), mencionan que el tamaño de la copa de los árboles es una variable clave ya que se correlaciona con el espacio que ocupa un árbol, así como con el espacio fisiológico y funcional de los árboles. El área de la proyección de la copa y su volumen, por ejemplo; pueden usar como variables representativas para el área foliar y biomasa foliar.

Doruska y Burkart (1994), destacan la importancia de varios investigadores por conocer las características de la copa de los árboles y con ellas predecir la respuesta en crecimiento de los individuos arbóreos.

Corvalán y Hernández (2006), señala que estimar la proyección vertical de la copa es complejo, debido a que la mayoría de las copas son en su mayoría irregular y las ramas de los árboles vecinos se entrecruzan, por lo que su medición se complica.

Para ciertos estudios, es necesario medir el diámetro de copa de los árboles, para ello se mide el diámetro de la proyección de la copa sobre el suelo (Ugalde, 1981).

Para el área de copa, Corvalán y Hernández (2006), indican que se asume como en los fustes, que es equivalente al área de una circunferencia definido por algún promedio del diámetro de copa. Este promedio puede ser calculado de diversas maneras:

- Promedio entre el diámetro máximo y mínimo.
- Promedio entre el doble del radio máximo y mínimo desde el centro del fuste a la periferia de la copa.
- Promedio entre el diámetro máximo y el diámetro a los ángulos rectos del máximo.
- Promedio entre dos diámetros en ángulos rectos, el primero escogido al azar o en una dirección determinada.

- Un solo diámetro escogido al azar o sistemáticamente con referencia a lo que soporta un compás.

La medición del diámetro de la copa de los árboles plantea una problemática, ya que este no puede ser medido con instrumentos ópticos debido a que el rango de diámetros de estos es muy limitado. Este diámetro se determina generalmente mediante la proyección de puntos de su contorno sobre el suelo. Existen varios instrumentos para realizar las proyecciones, uno de ellos es el Moosehorn. Este diámetro también puede determinarse en fotografías aéreas (Prodan, *et al.* 1997).

Malleux (1970), menciona que con las fotografías aéreas verticales sólo es posible visualizar las copas de los árboles del estrato dominante y con cierta dificultad las copas del estrato codominante en bosques tropicales densos, de tal modo que el único parámetro medible en condiciones normales es el diámetro de las copas de los árboles dominantes o codominantes.

2.2. VOLUMEN

Da Cunha y Guimarães (2009), indican que el volumen es el variable que expresada en metros cúbicos (m³) significa la cantidad de madera contenida en los árboles. En un rodal puede considerarse como la suma de los volúmenes de los árboles en pie.

El volumen por unidad muestral se obtiene a partir de mediciones en árboles y se expande a la unidad de superficie utilizar un factor de expansión definido por el tamaño de la unidad muestral. El volumen puede presentar individualmente o por agrupamiento de árboles en clases de tamaño basadas en el diámetro (Cancino, 2006).

Para determinar el volumen, se utiliza comúnmente el método analítico, en donde se asume a la forma del fuste como un sólido geométrico básico (cilindro, paraboloides, cono o neiloide). El volumen de estos sólidos se obtiene por fórmulas específicas, que se utilizan para la cubicación de árboles y trozas, que son Smalian, Huber y Newton (Cancino, 2006).

Escobar (2015), realiza el cálculo de volumen total de fustes mediante la adición de los volúmenes de las secciones medidas, este volumen de cada sección se determina utilizando la fórmula de Smalian:

$$V = \frac{\pi}{4} x \frac{D^2 + d^2}{2} x L$$

En donde:

D = Diámetro mayor de la sección (m)

d = Diámetro menor de la sección (m)

L = Longitud de la sección (m)

2.3. ECUACIONES DE VOLUMEN

Da Cunha y Guimarães (2009), mencionan que una manera de conocer el volumen de madera en un rodal es a través del volumen de sus árboles individuales y una herramienta para determinar el volumen total son los modelos matemáticos de regresión por medio de las tablas de volumen.

Las ecuaciones de volumen son utilizadas para estimar el volumen de un árbol en función de alguna de sus características dasométricas (diámetro a la altura del pecho, altura del fuste, diámetro de copa, etc.); estas se obtienen por medio de un análisis de regresión (Barrena, *et al.* 1986).

El trabajo de construcción de las ecuaciones de volumen consiste, según Philip (1994), consiste de tres partes:

- Medición de los volúmenes individuales de los árboles seleccionados que constituyen una muestra representativa de la población.
- Establecimiento de las relaciones entre las mediciones tomadas sobre los árboles y sus volúmenes.
- Elección del mejor modelo y verificación de la precisión de la tabla de volumen elaborada.
- El ajuste de las ecuaciones se realiza normalmente por medio de técnicas de regresión, donde la variable dependiente es el volumen y las variables independientes son el diámetro a 1,3 metros y la altura total (Cluter, 1980).

Bautista (2000), indica que una de las ventajas de estas ecuaciones en un inventario forestal es que, a partir de mediciones detalladas en un número limitado de árboles elegido al azar dentro del área de estudio, puede dar la estimación objetiva del volumen de un número de

árboles mucho más grande en las unidades de muestreo, y finalmente la estimación de los volúmenes totales dentro de la superficie inventariada.

Para el manejo forestal, existen ocho ecuaciones que son las más utilizadas, estas son: ecuación de Spurr aritmética, logarítmica, polinomial de segundo grado y polinomial de tercer grado, ecuación de Naslund, ecuación australiana, ecuación múltiple de tres parámetros y la ecuación de Schumacher y Hall (Tapia, 1998).

Existen modelos con una sola variable independiente o más, sin embargo; en general, no se utilizan más de dos variables: La primera es siempre el diámetro de referencia, la segunda puede ser el diámetro a una altura fija o a una altura relativa, o la altura del fuste, o la altura total, o el diámetro de copa (Cailliez, 1980).

Se han realizado diversos estudios con la relación del diámetro de copa y la estimación del volumen maderable. Izquierdo (1962), realizó el estudio de volumen en Turrialba, Costa Rica, en áreas de bosque secundario debido a que pudo realizar la medición de alturas de los árboles y densidad en las fotografías aéreas. Setzer y Mead (1988) y Duffy (1963), presentaron el uso de las fotografías aéreas para la elaboración de tablas de volumen que tengan como variables a la altura del árbol, diámetro de copa, entre otras, para Alaska y Canadá respectivamente. Por otro lado, Ojeda y Terraza (1987), estimaron el volumen maderable en bosques mixtos de Iberia – Iñapari en el departamento de Madre de Dios en función del diámetro de copa medido en fotografías aéreas. También, Barrera (1995) estimó el volumen de árboles de un bosque húmedo tropical en el departamento de Huánuco a partir del diámetro de copas y el número de copas medidos en fotografías aéreas. También, Rybakov (2015), utilizó un vehículo aéreo no tripulado para la estimación del volumen de un área boscosa en Finlandia, sin embargo; trabajo con un Modelo Digital de Superficie Fotogramétrico para la obtención del volumen.

En el Tabla 1 se presentan algunos de los modelos de ecuaciones de volumen más utilizados según Loetsch, *et al.* (1973):

Tabla 1: Modelos de ecuaciones más utilizados.

Variables Independientes	Autor	Modelo
d	Kopezky – Gehrhardt	$V = b_0 + b_1 d^2$
	Dissescu – Meyer	$V = b_0 d + b_1 d^2$
	Hohenadl – Krenn	$V = b_0 + b_1 d + b_2 d^2$
	Berhout	$V = b_0 + d^{b_1}$
	Husch, 1963	$\log V = b_0 + b_1 \log d$
	Brenac	$V = b_0 + b_1 d^2$
d,h	Spurr, 1961	$V = b_1 d 2h$
	Spurr, 1952	$V = b_0 + b_1 d^2 h$
	Ogaya	$V = d^2 (b_0 + b_1 h)$
	Stoate	$V = b_0 + b_1 d^2 + b_2 d^2 h + b_3 h$
	Naslund	$V = b_1 d^2 + b_2 d^2 h + b_3 d h^2 + b_3 h$
	Meyer (Comprensiva)	$V = b_0 + b_1 d + b_2 d^2 + b_3 d h + b_4 d^2 h + b_5 h$
	Meyer (Modificada)	$V = b_0 + b_1 d + b_2 d^2 + b_3 d h + b_4 d^2 h$
	Takata	$V = d^2 h / (b_0 + b_1 d)$
	Shumacher – Hall	$\log V = b_0 + b_1 \log d + b_2 \log h$
	Variable Logarítmica Modificada	$\log V = b_0 + b_1 \log(d^2 h)$
	Instituto de Investigaciones Forestales (Alemania)	$\log V = b_0 + b_1 \log d + b_2 \log^2 d + b_3 \log h + b_4 \log^2 h$
d, h y qi ó di ó d_{0,3h}	Spurr Shroot – CUT	$V = b_0 + b_1 q_i d^2 h$
	Var. Combinada	$V = b_0 + b_1 q_i + b_2 d^2 h + b_3 q_i d^2 h$
	Schiffel	$V = d^2 h (b_0 + b_1 q + b_2 \left(\frac{1}{qh}\right))$
	Ogaya	$V = b_0 + b_1 d_{0,3} h d h$
	Pollanschutz	$V = \pi/4 (b_0 d^2 h + b_1 d d_{0,3} h + b_2 h^2)$
	Spurr Diamétrica	$\log V = b_0 + b_1 \log d + b_2 \log h + b_3 \log d_i$
	Spurr Logarítmica	$\log V = b_0 + b_1 \log(d_i d h)$

FUENTE: Loetsch, et al. (1973).

Dónde

V = Volumen cúbico

d1 = Diámetro sobre el nivel del suelo

d = Diámetro sin corteza

hc = Altura de copa

B = Doble grosor de corteza

g = Área basal a la altura del pecho

d_{0,3h} = Diámetro a un tercio del fuste

h = Altura de fuste

q = Cociente de forma

Lojan (1966), señala que existen diferentes ecuaciones para la estimación del volumen de los árboles, pero que no se puede adoptar ninguna para un bosque sin un estudio previo de exactitud o proximidad que hay entre los datos reales y los datos obtenidos con la ecuación, esto implica que se busque o formula una ecuación para cada tipo de bosque.

La determinación y selección de modelos de regresión según Loetsch, *et al.* (1973), normalmente se realiza en tres fases distintas:

- a) Selección de un número de árboles, muestras suficientes y representativas.
- b) Medición de las variables dependientes e independientes.
- c) Selección del mejor modelo de regresión.

2.4. REGRESIÓN LINEAL BASADO EN EL MÉTODO DE LOS MÍNIMOS CUADRADOS

Cailliez, FAO y Furnival, citados por Barrena (1988), mencionan que el método estadístico más utilizado para la estimación del volumen de árboles es el análisis de regresión basado en el método de Mínimos Cuadrados. Para la aplicación de este método debe cumplirse con la hipótesis de los Mínimos Cuadrados, señalados por Bouchon, Cunia y Philip, citados por Barrena (1988):

- La muestra debe ser obtenida al azar.
- La población debe tener una distribución normal
- La variancia debe ser homogénea (homocedasticidad)

Cancino (2006), señala que el análisis de regresión es un método estadístico para el estudio de la interdependencia entre variables. Este análisis se centra en el estudio de la relación matemática entre variables, con el objetivo de predecir valores de una o más variables dependientes a partir de un conjunto de variables predictoras, esta relación puede observarse en la Figura 2. El análisis de correlación se ocupa de la fuerza o intensidad de la asociación entre las variables. Asume que todas las variables son aleatorias.

Montgomery (2006), indica que la relación entre una variable dependiente o de respuesta y una variable independiente o regresora se caracteriza por un modelo matemático llamado modelo de regresión.

Cancino (2006), indica que el modelo de regresión lineal básico es:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_i + \varepsilon_i$$

En donde:

y_i : Es la variable dependiente en el i -ésimo individuo de la población.

x_i : Es la variable independiente en el mismo individuo.

ε_i : Es un desvío o error aleatorio.

β_0, β_1 : Parámetros de la regresión.

Chatterjee y Price (1977), señalan que β_0 es el intercepto o constante del modelo, β_1 es la estimación de la pendiente en x_1 . El intercepto β_0 es el valor promedio de “y” cuando “x” es cero; β_1 mide el cambio en el valor promedio de “y” como el resultado de un cambio unitario en “ x_i ”; “ ε_i ” es el residual del modelo.

Cancino (2006), menciona que, en el análisis de regresión, el problema básico radica en estimar los parámetros de la función de regresión poblacional, de la manera más exacta posible, a partir de observaciones contenidas en una muestra. En la Figura 2, se puede observar el gráfico de dispersión de la regresión lineal.

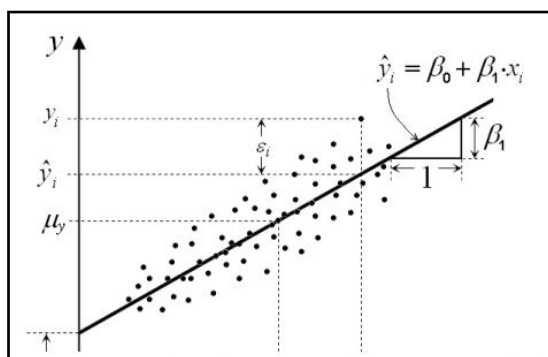


Figura 2: Gráfico de dispersión de puntos y la línea de regresión población lineal – simple.

FUENTE: Cancino (2006)

José (2012), Hanke y Wichern (2006), ESI (sf), indican que el modelo de regresión lineal simple posee los siguientes supuestos propios para el modelo:

- Linealidad: Correcta especificación del modelo. Relación lineal entre la variable independiente con la dependiente. Si no hay linealidad se dice que se encuentra con un error de especificación.
- Homocedasticidad: Se refiere al supuesto de que la variable dependiente (Y) presenta una distribución con igual varianza en todo el rango de valores de la variable independiente (X). Igualdad de varianzas de los residuos y pronósticos.
- No correlación de los errores: Independencia de la variable aleatoria “residuos”. Si no se cumple este supuesto, los estimadores dejan de ser óptimos y las pruebas estadísticas (ANOVA, pruebas t) e intervalos de confianza pierden validez (altera el nivel de confianza).
- Independencia: Los valores de la variable estimada “y” son estadísticamente independientes.
- Normalidad de los errores: José (2012), indica que la normalidad de los errores permite la estimación por intervalos de confianza no sólo para los coeficientes de regresión, sino también para la predicción. Cuando los errores no son normales, los intervalos y las pruebas de hipótesis no son exactas y pueden llegar a ser inválidas.

Haken y Wichern (2006), mencionan que una vez calculada la línea recta ajustada, se debe medir el grado en el que los puntos de datos muestrales se dispersan alrededor de la función de regresión ajustada. Es posible desarrollar una medida de dispersión análoga a la desviación estándar de la muestra. Esta medida es llamada error estándar de la estimación, mide la dispersión de los puntos de datos en la dirección “Y” alrededor de la línea ajustada.

Philip citado por Barrena, *et al.* (1986), menciona que la utilización de análisis de regresión en la construcción de ecuaciones de volumen presenta las siguientes ventajas:

- Proporciona un estimado de la precisión de la predicción o estimación.
- Se cuenta con un método objetivo de elección entre diferentes modelos matemáticos.
- Se necesitan pocos datos para alcanzar una precisión dada.

Cailliez (1980), señala que este método es el que más se utiliza y que el inconveniente de los cálculos ha disminuido con el desarrollo de las computadoras. Además, siempre se debe tratar de tener el modelo más simple, ya que el que tenga menor número de coeficiente hará que exista menos variación en el volumen en función de las entradas.

Philip citado por Barrena, *et al.* (1986), presenta las principales suposiciones en la que se basa los mínimos cuadrados para estimar los parámetros de regresión:

- Las unidades muestrales (árboles) son seleccionados independientemente.
- Los parámetros medidos sobre cada árbol son independientes.
- La variancia del volumen de los árboles es constante e independiente con respecto a las variancias de las variables explicativas.

Cancino (2006), señala que la heterogeneidad de varianza suele ser la asunción más importante ya que tener buenos estimadores de los volúmenes de los árboles a menudo interesa más que estimar los intervalos de confianza.

Romero (2016), menciona que las ecuaciones deben clasificarse y analizarse en base a los siguientes criterios de selección:

2.4.1. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (R^2)

El coeficiente de determinación se define como la proporción o porcentaje de variación total en la variable dependiente respecto a su media, que es explicada por el modelo de regresión (Martínez, 2005).

Hanke y Wichern (2006), mencionan que el coeficiente de determinación mide el porcentaje de variabilidad de “Y” que se puede explicar a través del conocimiento de la variabilidad (diferencias) de la variable independiente.

Uriel (2013), presenta al R^2 como el resultado de la siguiente expresión:

$$R^2 = 1 - \frac{SCE}{SCT}$$

En donde:

SCE: Suma de Cuadrados del Error.

SCT: Suma de Cuadrados Total

Por su definición, este valor se encuentra entre los siguientes límites:

$$0 \leq R^2 \leq 1$$

El R^2 posee como límites al 0 y al 1, teniendo como 0 a la no representatividad del modelo lineal y al 1 como un ajuste lineal perfecto (Martínez, 2005). En el proceso de selección de ecuaciones, se aceptan aquellas que poseen un R^2 mayor del 70% que indica una buena asociación lineal entre las variables. (Acuña, 2010). Por otro lado, Alvarado y Obagi (2008), mencionan que el R^2 debe ser mayor a 0,64 para tener una asociación aceptable y que mínimo valor para aceptar una ecuación en el estudio de ciencias exactas es de 0,75.

Rojo (2007), señala que, a diferencia de la varianza residual, el coeficiente de determinación es adimensional; esto quiere decir que no está afectado por transformaciones lineales de las variables, por ello, si cambiamos las unidades de medida, el coeficiente de determinación permanecerá invariante. De la misma manera, Martínez (2005), menciona que R^2 es una medida adimensional, de fácil cálculo e interpretación, debido a su recorrido acotado entre cero y uno, lo que conduce a una profusa utilización de la misma, con interpretaciones abusivas en unos casos y erróneos en otros.

2.4.2. PRUEBA DE SIGNIFICANCIA DEL CONJUNTO DE VARIABLES (PRUEBA ESTADÍSTICA FISHER)

Dentro del análisis estadístico, se realiza el análisis mediante el estadístico F para determinar la significancia estadística de las variables de la ecuación. En esta prueba, se considera a la hipótesis nula (H_0), como si todos los coeficientes del modelo son iguales a cero, por tanto, ninguna variable aporta nada a la explicación de la variable dependiente (Arriaza, 2006).

Las hipótesis se representan de esta manera:

$$H_0: \beta_1 = 0 \text{ (No existe relación lineal entre } X \text{ e } Y)$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0 \text{ (Si existe relación lineal entre } X \text{ e } Y)$$

Se aceptarán o rechazará una hipótesis nula dependiendo del valor que se haya establecido de significatividad. El p-valor se define como la probabilidad de error en que se incurre en caso de rechazar la hipótesis nula con los datos que se dispone (Botella, *et al.* sf). El p-valor proporciona el grado de credibilidad de la hipótesis nula: si el valor de p fuese “muy pequeño”

(inferior a 0,001), significaría que la hipótesis nula es del todo increíble y por tanto se descarta; si el valor de p oscila entre 0,05 y 0,001 significa que hay fuertes evidencias en contra de la hipótesis nula, por lo que se rechaza o no en función del valor que se hubiese asignado. Finalmente, si el valor de p es “grande” (superior a 0,05), no habría motivos suficientes como para descartar la hipótesis nula, por lo que se tomaría como verdadera (Romero, 2012). Para la estimación de variables de interés forestal, García (2010), realiza la prueba estadística con un nivel de confianza del 95%, de esta manera; p-valores por debajo de 0,05 indican importancia de correlaciones no – cero; por lo que permite dentro del análisis descartar ecuaciones mayores a este p-valor.

2.4.3. PRUEBA DE SIGNIFICANCIA DE LOS COEFICIENTES DEL MODELO DE REGRESIÓN (PRUEBA ESTADÍSTICA T-STUDENT)

Esta prueba estadística se realiza con el fin de determinar si el coeficiente de la variable explicativa es igual a cero (Arriaza, 2006). Teniendo así, las siguientes hipótesis:

H₀: $\beta_1 = 0$ (El coeficiente es estadísticamente igual a cero)

H₁: $\beta_1 \neq 0$ (El coeficiente es estadísticamente diferente a cero)

Esta prueba, también se realiza con un nivel de confianza del 95%; es decir, ecuaciones con p-valores superiores 0,05 son eliminadas. Uriel (2013), menciona que la determinación del p-valor es la operación inversa de encontrar el valor en las tablas estadísticas para un determinado nivel de significación. Por lo que, se debe proponer un nivel de significancia (α) y una vez que el p-valor haya sido determinado, sabes que se rechaza se rechaza la H₀ cuando $\alpha > p$ valor; por el contrario, la H₀ no se rechaza cuando $\alpha < p$ -valor.

2.4.4. ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS

En el contexto de la regresión lineal, se llaman residuos a las diferencias entre los valores de la variable dependiente observados y los valores que predecimos a partir de nuestra recta de regresión (Menéndez, 2002).

El análisis de residuos o residuales permite cotejar si las suposiciones del modelo de regresión se cumplen (Díaz, 2005).

Se puede comprobar:

- Si efectivamente la relación entre las variables X e Y es lineal.

- Si hay normalidad de los errores.
- Si hay valores anormales en la distribución de errores.
- Si hay varianza constante (propiedad de Homocedasticidad)
- Si hay independencia de los errores.

Este análisis de residuales puede ser graficados contra distintas variables, y es muy habitual hacerlo contra las variables independientes, teniendo así a los residuos en el eje de las ordenadas (eje Y) y al volumen en el eje de las abscisas (eje X), de esta manera se puede determinar si cumple con el supuesto de homocedasticidad. Si este análisis no cumple con el supuesto de la varianza constante, se procede a la ponderación de las ecuaciones (Díaz, 2005).

Cardona, *et al.* (2013), menciona que la gráfica de residuales es aquella gráfica en la que los valores de la variable independiente se representan en el eje horizontal y los valores de los residuales correspondientes, en el eje vertical. Se grafica un punto para cada residual.

Orellana (2008), indica que en este análisis se debe verificar la normalidad, es decir, si las observaciones provienen de distribuciones normales todas con la misma varianza σ , entonces los residuos deberían mostrar una distribución aproximadamente normal. Para comprobar esto se utiliza el gráfico de residuales versus los valores predichos, ejemplos de estos gráficos son las Figuras 3, 4, 5 y 6. Si este gráfico muestra una nube de puntos alrededor de cero sin evidencia de estructura, tendencia o cambio en la dispersión, entonces no hay sospecha que se violen ninguno de estos dos supuestos.

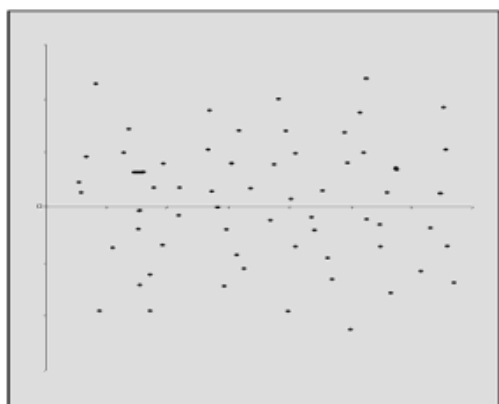


Figura 3: Gráfico de residuales (Homocedasticidad)

FUENTE: Orellana (2008)

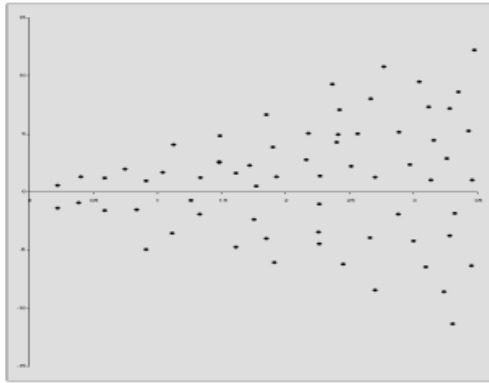


Figura 4: Gráfico de residuales (Heterocedasticidad)

FUENTE: Orellana (2008)

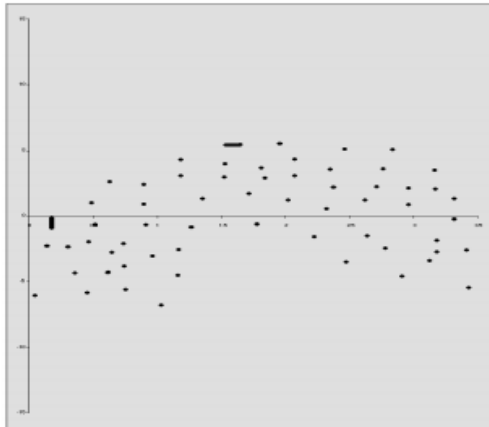


Figura 5: Gráfico de residuales (Relación no lineal)

FUENTE: Orellana (2008)

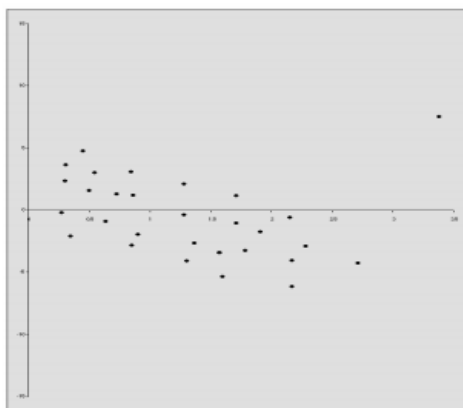


Figura 6: Gráfico de residuales (Observación influyente)

FUENTE: Orellana (2008)

Orellana (2008), señala que, si el modelo lineal no es adecuado para nuestros datos, existen dos caminos posibles:

- Abandonar el modelo de regresión lineal y usar un procedimiento apropiado.
- Emplear alguna transformación de los datos de modo que el modelo de regresión lineal sea adecuado para los datos. Esta transformación se realiza para la variable dependiente o independiente, de modo de “linealizar” la relación.

2.5. ANÁLISIS DE REGRESIÓN PONDERADA

Barrena (1986), indica que, para respetar las condiciones de linealidad, normalidad y de homocedasticidad de los residuales de las ecuaciones de regresión utilizadas para estimar el volumen de árboles, se recomienda realizar transformación de variables o ponderar la ecuación de regresión.

La regresión ponderada (Mínimos Cuadrados Ponderados), es la mejor alternativa en la elaboración de ecuaciones de volumen, puesto que permite resolver las violaciones a las hipótesis de los Mínimos Cuadrados que presentan las poblaciones forestales. De esta manera se pueden terminar las inferencias estadísticas sobre la ecuación de volumen (Barrena, sf). Para cada una de las ecuaciones que se ponderen, se realizar el mismo análisis de regresión.

Montgomery, *et al.* (2006), señala que, en el método de los mínimos cuadrados ponderados, se multiplica la diferencia entre los valores observados y esperados de la variable dependiente, por un peso o factor de ponderación. Este factor a ser usado con este método debe ser inversamente proporcional a las varianzas de los valores por predecir.

En la selección del mejor modelo se pueden usar varios criterios. Entre ellos destacan el índice de Furnival (1961), el índice de Akaike, la diferencia agregada global, la diferencia media, la desviación estándar de los residuos, el coeficiente de variación residual, el error estándar de estimación y el error cuadrático medio residual. Al utilizar estos indicadores debe preferirse aquel modelo que entregue el valor más bajo. Lo contrario sucede cuando se usa el coeficiente de correlación simple, el coeficiente de correlación ajustado o el coeficiente de determinación, criterios que también pueden ser útiles para la selección de modelos (Cancino, 2006). Para aquellas ecuaciones que no se ponderan se utiliza para la selección el Cuadrado Medio del Error (CME) y para aquellas que se ponderan, se determina el Índice de Furnival (IF).

2.6. ÍNDICE DE FURNIVAL

El índice de Furnival (1961) es útil para la comparación de modelos que tienen diferentes variables dependientes. Un modelo cuya variable dependiente es el volumen no puede compararse directamente con otro modelo cuya variable dependiente es una transformación del volumen, como por ejemplo el logaritmo natural del volumen. El índice de Furnival soluciona ese problema (Cancino, 2006).

Cuando la variable dependiente es alguna función del volumen, este índice puede ser considerado como un error estándar promedio transformado a unidades de volumen. En consecuencia, la ecuación que presente el menor índice de Furnival, será la más apropiada (Philip, 1994).

La fórmula del índice de Furnival es la siguiente:

$$IF = [f'(v)]^{-1}\sqrt{S}$$

Dónde:

IF = Índice de Furnival

f(v) = Derivada de la variable

[f'(v)] = Media geométrica de esta derivada

S = Cuadrado medio del error

Furnival (1961), señala que cuando no se han transformado las variables ni se ha ponderado la ecuación de regresión, entonces el IF será igual a la raíz del Cuadrado Medio del Error.

$$IF = \sqrt{CME}$$

Pero si se ha ponderado, la expresión de cálculo será la siguiente:

$$IF = \sqrt{CME} * \text{antilog}\left(\frac{1}{n} * \sum \text{Log}p\right)$$

En donde, “p” es la inversa del factor de ponderación y “n” la cantidad de árboles evaluados para el estudio.

Se recomienda usar el Índice de Furnival si se quiere comparar ecuaciones de volumen con variables dependientes que no se expresen en las mismas unidades (Barrena, 1986).

3. FOTOGRAMETRÍA

Antes de definir fotogrametría, se debe tener en cuenta el concepto primario denominado “cartografía”, definido como el arte de trazar mapas geográficos y la ciencia que los estudia (Torres, 2015).

Para la elaboración de la cartografía, se hace uso de la fotogrametría. Esta permite realizar mediciones sobre fotografías. Y existen dos maneras de trabajar con las fotografías, la primera es si se trabaja con una sola foto, de esta manera se puede obtener información básica de la geometría del objeto y la segunda es cuando se trabaja con dos fotos, se podrá tener la zona de solape o zona común entre éstas y obtener una visión estereoscópica. Básicamente, es una técnica de medición de coordenadas 3D, que utilizar fotografías u otro sistema de percepción remota junto con puntos de referencia topográficos sobre el terreno, como medio fundamental para la medición (Paredes y Beltrán, 2015).

Quirós (2014), define a la fotogrametría como la ciencia para elaborar mapas o planos partiendo de fotografías realizadas bajo unos condicionantes específicos. Para la fotogrametría, se cuentan con los siguientes elementos fundamentales: escala de la fotografía, distancia focal de la cámara y la altura de vuelo.

Otero, *et al.* (sf), indican que como ventajas básicas de la fotogrametría sobre otros sistemas de captura de información se pueden señalar los siguientes:

- Se obtienen representaciones completas de los objetos (información objetiva).
- El registro es instantáneo.
- Se utilizan materiales relativamente económicos y de fácil manipulación y conservación.
- Existe la posibilidad de tratar objetos en movimiento.
- El proceso de captura de la información y el posterior de medida no perturba el objeto a estudiar.
- Proporciona grandes rendimientos.

Herrera (1987), señala que la fotogrametría suele dividirse en dos especialidades de acuerdo con el tipo de fotografía utilizada:

- Fotogrametría terrestre: La fotografía es usada en una posición tal que el eje de la cámara fotográfica resulta horizontal y paralelo al terreno o corteza terrestre.
- Fotogrametría aérea: Fotografías obtenidas desde vehículos aéreos; el eje óptico de la cámara fotográfica resulta sensiblemente perpendicular al terreno o corteza terrestre.

Otero, *et al.* (sf), mencionan que, dependiendo del método empleado, se pueden distinguir tres tipos diferentes de fotogrametría:

- Fotogrametría analógica: La determinación precisa de un objeto en el espacio se consigue mediante la utilización directa de las fotografías (formando modelos estereoscópicos), reconstruyendo el modelo espacial con sistemas ópticos o mecánicos.
- Fotogrametría analítica: El modelo espacial se reconstruye exclusivamente mediante programas informáticos que simulan dicha geometría.
- Fotogrametría digital: Utiliza como dato de entrada las fotografías aéreas previamente transformadas a formato digital, reconstruyendo así mismo el modelo espacial de forma numérica o digital; en este caso los conceptos relativos a tratamiento digital de imágenes cobran gran importancia.

3.1. FOTOGRAMETRÍA DIGITAL

Sánchez (2006), menciona que en la actualidad la fotogrametría analógica y analítica han dado paso a la fotogrametría digital, donde todas las operaciones se realizan analíticamente sobre imágenes digitales en estaciones fotogramétricas por ordenador.

Quirós (2014), menciona que una imagen digital es una matriz bidimensional en la que cada unidad mínima de información es un píxel con coordenadas fila, columna (i, j), tal como se muestra en la Figura 7. Cada píxel, tendrá un valor denominado Nivel Digital (Nd) que estará representado por un nivel de gris en pantalla. Las imágenes a color (RGB), están compuestas por tres matrices, una para el color rojo (Red), otra para el verde (Green) y otra para el azul (Blue).

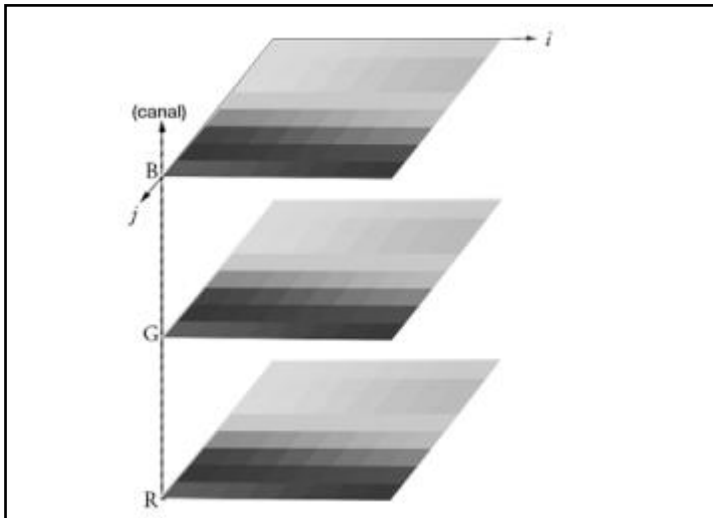


Figura 7: Imagen digital en RGB.

FUENTE: Quirós (2014)

Una imagen digital es una función $F(x, y)$ donde x e y son las coordenadas en elementos diferenciales de imagen (píxel) que tienen atribuido un cierto valor (color o nivel de gris en el caso de imágenes en blanco y negro). Esta matriz de píxeles $F(x, y)$ puede ser unidimensional, como en el caso de las imágenes en blanco y negro o multidimensional, como en el caso de las imágenes en color, formadas por la superposición de tres capas o matrices unidimensionales con los colores básicos rojo, verde y azul (Sánchez, 2006).

Quirós (2014), indica que una imagen digital posee las siguientes características:

- Resolución: Se refiere a la calidad de una imagen que depende del tamaño del píxel. En el caso de imágenes aéreas, la resolución se denomina espacial y tiene correspondencia directa con el tamaño del píxel en el terreno (GSD)
- Dimensión: La dimensión de la imagen indica el ancho y el alto de la imagen. Se suele expresar en cm, pulgadas o píxeles.
- Profundidad de color: Corresponde al número de bits utilizados para describir el color de cada píxel.

Sánchez (2006), señala que, aunque las imágenes con las que se trabaja en la actualidad son digitales, la toma aún puede ser analógica mediante una cámara convencional, ya que el uso de cámaras fotogramétricas digitales aún no está muy extendido debido al alto coste de una cámara digital.

3.1.1. PROCESO FOTOGRAMÉTRICA Y PRODUCTOS

Quirós (2014) presenta el proceso fotogramétrico digital dividido en las siguientes fases:

- Orientación interna: Consiste en un proceso de transformación del sistema de coordenadas píxel (fila, columna) al sistema de coordenadas de la cámara expresadas en mm y referidas a un sistema cartesiano 3D cuyo origen está en el centro de proyección de la cámara. En cámaras digital consiste únicamente en la determinación de la posición del punto principal de la foto con respecto al centro de la imagen digital.
- Orientación relativa: Es la fase del proceso en la que se relacionan geoméricamente las imágenes estereoscópicas, formándose el modelo estereoscópico. Consiste en identificar los puntos homólogos en cada fotografía para posteriormente reconstruir los haces y generar el modelo.
- Orientación absoluta: Consiste en nivelar el modelo, escalarlo y trasladarlo a su verdadera posición en el espacio.
- Orientación exterior: En algunos restituidores digitales, el proceso de la orientación relativa y absoluta se realiza en un solo paso. Para ello se obliga a que el centro de la proyección, el punto de la imagen y el punto del terreno proyecto se encuentren en la misma recta.

Sánchez (2006), señala que la fotografía aérea como tal se encuentra afectada fundamentalmente por dos causas de error:

- Falta de verticalidad del eje de toma.
- Desplazamiento de la imagen debido al relieve.

Según sea la corrección de estos errores en la fotografía se pueden obtener diferentes productos cartográficos:

- a) Mosaicos: Mediante la unión directa de fotogramas, sin corrección geométrica de imagen, considerando zonas centrales del fotograma como casi libre de errores. Otero, *et al.* (sf), indica que cuando una serie de fotografías se ha reunido en una única fotografía compuesta se trata de un mosaico. Cuando se prepara un mosaico grosero, con el fin de proporcionar un índice de las fotografías individuales, se le denomina

“mosaico índice”. La imagen de cada fotografía en un mosaico índice está claramente etiquetada, de tal modo que el observador pueda determinar rápidamente qué fotografía cubre un área determinada. Los mosaicos preparados con más cuidado se pueden utilizar para el control de trabajos en áreas en las que no hay disponible una base cartográfica adecuada. Su ventaja es que suponen una representación continua del territorio, conveniente para su archivo y consulta. Sus desventajas son su coste y el hecho de que no pueden estudiarse estereoscópicamente, aunque existen también los estereomosaicos.

- b) Rectificación: Corrige el error debido a la inclinación del eje de toma. Sánchez (2006), indica que la rectificación es el proceso mediante el cual se elimina el efecto debido a la inclinación del eje de la fotografía. Si bien se ha indicado que el eje fotográfico es vertical, existen pequeñas inclinaciones no predecibles a corregir. Las fotografías rectificadas son, pues, fotografías corregidas a un plano horizontal de referencia (Otero, *et al*, sf).

- c) Ortoproyección: Corrige los dos errores por unidades diferenciales de imagen para formar una fotografía perfectamente métrica. Quirós (2014), señala que la ortoproyección es el método fotogramétrico de obtener fotomapas precisos, corregidos de las deformaciones producidas en la imagen fotográfica por el relieve y la inclinación de la fotografía, mediante la rectificación diferencial de la fotografía original. Sánchez (2006), menciona que una ortofoto es equivalente geoméricamente a un mapa en el que se pueden medir ángulos y distancias en planimetría. Para su producción, se debe tener la imagen georreferenciada y con un modelo digital de elevaciones.

La unión de fotogramas suele realizarse, una vez delimitada la zona central, por elementos planimétricos lineales como carreteras, caminos, ríos, etc, para que la zona de unión de destaque, al mismo tiempo que se iguala tono y contraste en todos los fotogramas, completando finalmente si se desea con toponimia o información vectorial cartográfica (Sánchez, 2006).

4. VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (VANT)

Existen muchas posibles formas de clasificar las aeronaves, en la Figura 8 se observa una de ellas. Es frecuente utilizar una clasificación ateniendo a la forma en la que las aeronaves consiguen su sustentación en la atmósfera (Oñate, 2015).

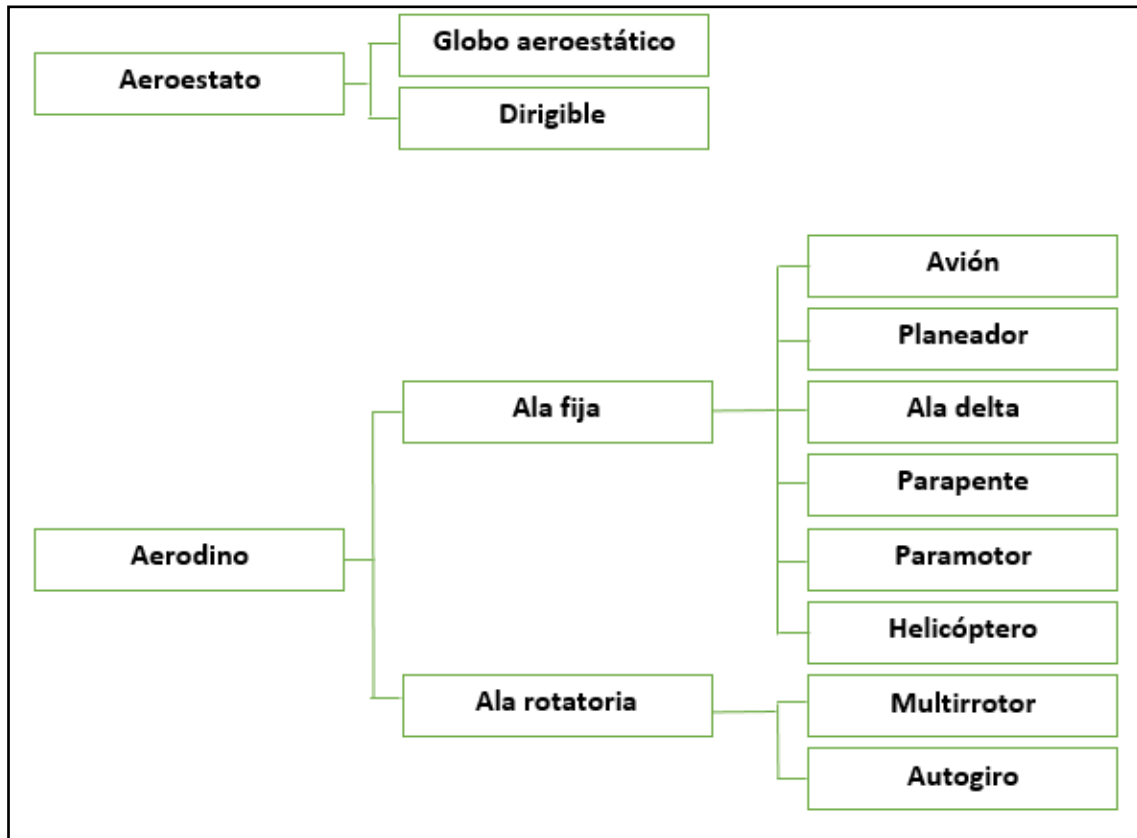


Figura 8: Clasificación de aeronaves por su forma de sustentación.

FUENTE: Oñate (2015)

Pounds (2007), indica que el término “Vehículo aéreo no tripulado” (VANT) o Drone se emplea para designar al conjunto de aeronaves que no llevan tripulantes a bordo y cuyo control es remoto o autónomo. Comprende desde aviones hasta helicópteros de uno o más rotores impulsados con motores eléctricos o de combustión.

Tabuchi (2015), menciona que un “Vehículo Aéreo No Tripulado” (VANT) o Drone se define como una aeronave que no lleva tripulantes y que se controla remotamente o de manera autónoma. El rango de tamaños abarca desde aquellas a escala real – similar a las tripuladas – hasta aquellas en miniatura. La propulsión de estos varía según los requerimientos y puede abarcar desde motores diésel, motores a reacción hasta motores eléctricos.

López (2012), señala que los VANTs de bajo coste aportan como ventajas frente a la aeronáutica tradicional: 1. Menor coste de la aeronave, 2. Menores costes de mantenimiento, 3. Menores costes de operación en general, 4. Menor infraestructura para la operación (pistas de aterrizaje más reducidas, hangares más pequeños, etc.), 5. Menor coste por no necesitar piloto. El interés por los sistemas VANT se despertó hace 20 años, debido a que no se necesita un piloto a bordo de la aeronave, lo que permite el uso de aeronaves más pequeñas, con menores requerimientos de potencia. Estos sistemas pueden realizar misiones peligrosas, en entornos hostiles o bajo condiciones climatológicas adversas, sin comprometer la integridad física del piloto.

Tabuchi (2015), menciona que el avance de la tecnología permitió la miniaturización de diversos componentes, con lo que se pudo diseñar VANTs a menores escalas que sus versiones tripuladas, con las ventajas que esto conlleva. Entre estas se puede mencionar una gran reducción de costos de fabricación y operación, mayor eficiencia, facilidad de despegue y obviamente portabilidad. Por tal motivo, los VANT han empezado a ser usados de manera intensiva en tareas que antes solamente se realizaban con aviones o helicópteros tripulados tales como fotografía aérea, fotogrametría, vigilancia aérea, conservación de fauna y flora, evaluación de desastres, agricultura de precisión, inspección de estructuras altas como chimeneas o torres de alta tensión, entre otras.

López (2012), señala que, por otra parte, otro enorme atractivo de los VANTs, poco explotado por ahora, es la posibilidad de ser utilizados por la industria aeronáutica como herramientas de pruebas de nuevas tecnologías, tecnologías que ya han superado su fase de diseño preliminar, y que requieren ser ensayadas para seguir avanzando en su desarrollo.

García (2017), indica que las experiencias que se están realizando en la actualidad en bosques es a través de masas ordenadas, en árboles plantados a una cierta distancia unos de otros, lo que tiene el inconveniente de solo poder sacar conclusiones de zonas replantadas recientemente, puesto que, en las masas forestales más longevas de la comunidad, los árboles crecen en posiciones aleatorias sin guardar ningún orden. En la Tabla 2, se observan las características de los principales tipos de VANTs.

Tabla 2: Características de los principales tipos de VANTs.

<i>Características</i>	<i>Helicópteros</i>	<i>Alas fijas</i>	<i>Dirigibles</i>	<i>Multirrotores</i>
Capacidad de vuelo estacionario	3	0	4	3
Velocidad de desplazamiento	3	4	1	2
Maniobrabilidad	3	1	1	4
Autonomía de vuelo	2	3	4	2
Resistencia al viento	2	4	1	2
Estabilidad	1	3	4	2
Capacidad de vuelos verticales	4	1	2	4
Capacidad de carga	3	4	1	2
Capacidad de vuelos interiores	2	1	3	4
Techo de vuelo	2	4	3	1

0 = nulo, 1 = malo, 2 = medio, 3 = bueno, 4 = muy bueno.

FUENTE: García (2017)

García (2017), menciona que solo existen 4 métodos de operación en cuanto a la forma de pilotar una aeronave de manera remota, y éstos son los siguientes:

- a) **Modo manual:** En este modo, el piloto remoto es el único responsable del movimiento de la aeronave, éste actúa sobre la emisora radiocontrol, añadiendo mayor o menor potencia a los motores, controlando los diferentes sensores y dispositivos o dirigiendo haciendo el lado que desee el VANT, dentro del radio de radiofrecuencia. Los drones que operan con este modo suelen ser drones bajos de gama, generalmente su coste es reducido en comparación con el resto de los modos.
- b) **Modo aislado:** El funcionamiento es similar al modo manual, con la diferencia de que el piloto remoto no actúa sobre la potencia de los motores, ni dirige la dirección, sino que este indica sus intenciones de operación a un puesto de radiocontrol, para que actúa un autopiloto, que transforma las órdenes recibidas en actuaciones sobre las superficies de control de dirección y de potencia.
- c) **Modo automático:** El plan de vuelo es establecido previamente por el piloto remoto. El dron cuenta con un autopiloto que ejecuta paso a paso el plan previsto, realizando de forma automática las acciones requeridas en cada momento.
- d) **Modo autónomo:** Es parecido al modo anterior, a la hora de establecer un modelo predeterminado de vuelo, con la salvedad de que una vez iniciado el vuelo la aeronave realiza de forma autónoma todo el plan de vuelo, sin requerir la operación del piloto remoto, incluso si se produjera una situación de emergencia.

García (2017), menciona que, en actividades civiles, los multirrotores se suelen operar en modo manual o automático debido a los mayores problemas de equilibrio y de ejecución de las maniobras realizadas por el piloto que se tiene en las naves de ala fija.

Existen muchas posibles formas de clasificar las aeronaves, en la Figura 8 se observa una de ellas. Es frecuente utilizar una clasificación ateniendo a la forma en la que las aeronaves consiguen su sustentación en la atmósfera (Oñate, 2015).

García (2017), señala que los VANTs pueden clasificarse según sus alas, distinguiendo así los siguientes tipos:

- Fijas: Poseen alas adosadas en los laterales de la aeronave, las cuales no poseen movimiento propio, son accionadas por motores a los que se les incorporan unas hélices situadas en un plano horizontal al suelo.
- Móviles o rotóricas: Poseen hélices giratorias, generalmente suelen ser cuadricópteros, situados en un eje vertical al suelo, los cuales giran dos motores siguiendo el sentido horario de las agujas del reloj y los otros dos en sentido antihorario, creando así la fuerza de empuje necesaria para mover al dron hacia arriba o hacia abajo.

Las prestaciones y por lo tanto las aplicaciones varían mucho de un tipo de aeronave a otra, cubriendo cada uno de ellos un espectro de aplicabilidad diferente. En la Tabla 3, se presentan las ventajas y desafíos que debe afrontar un VANT.

Tabla 3: Ventajas y Desafíos de los VANTs.

Ventajas	Desafíos
Peso liviano y fácil de transportar	Tiempo limitado de vuelo dependiendo del modelo
Bajo costo de imágenes de alta resolución	El peso de la cámara que puede cargar es limitado
Bajo costo de funcionamiento y mantenimiento	Existente limitantes y restricciones aéreas
Facilidad para volar en diferentes alturas dependiendo de la información que se necesita	Puede limitarse por la velocidad del viento y ráfagas
Facilidad para capturar áreas no accesibles en carro, barco, etc. o en un cronograma con tiempos ajustados	Cantidad limitada de software adecuados
Capacidad de grabar videos	Requiere mucho tiempo para crear ortomosaicos con mínimos errores referenciados geográficamente
Rápida disponibilidad de datos directamente de campo	Debido a la pequeña área de imagen, varias imágenes deben ser tomadas.

FUENTE: UNEP (2013).

A continuación, la Tabla 4 presenta la comparación de los VANTs con los aviones tripulados. La Tabla 5, presenta la comparación entre los aviones y los vehículos aéreos no tripulados del tipo multirotor.

Tabla 4: Imágenes de aviones tripulados vs imágenes de aviones no tripulados.

IMÁGENES DE AVIONES TRIPULADOS	IMÁGENES DE AVIONES NO TRIPULADOS
La altitud vuelo de los aviones tripulados oscila alrededor de 1500 m. El verde es visible en todo el mapa. La resolución es de 10 cm/pixel. Las sombras generan un impacto severo en la lectura de los datos.	La altitud de vuelo es menor (<300 m). Existe mucho menos aire entre el sensor y el objetivo. El color es significativamente mejor y permite diferenciar coberturas y objetos más fácilmente. Mayor información por píxel.
Todos los edificios son uniformemente inclinados por un costado.	La distorsión es removida gracias a que el recubrimiento del objetivo aborda todos los ángulos. Menor presencia de sombras.

FUENTE: Krzysztof citado por Berrio, et al. (2015)

Tabla 5: Tabla comparativa entre aviones y multirrotores.

VARIABLE	AVIONES	MULTIROTORES
Área cubierta	Mayor cobertura por vuelo, hasta 1000 ha con configuraciones promedio > a 250 ha.	Menor cobertura por vuelo, hasta 50 ha con configuraciones promedio < 20 ha.
Duración batería	Mayor, generalmente realiza el vuelo con el 20 al 50% del motor.	Menor, por mayor número de rotores.
Resolución fotografías	Depende de la altura de vuelo.	Depende de la altura de vuelo.
Estabilidad	Menor	Mayor
Costo	Menor	Mayor
Requiere experiencia y habilidades para su operación.	Mayor	Menor
Duración del vuelo.	Hasta dos horas.	Hasta dos horas.
Implicación personal	Dos pilotos típicos con calificaciones en bimotores CPL (A), IFR, MEP (L)	1 piloto, algunas veces 1 ayudante / observador.
Área de cobertura por vuelo	Cientos de kilómetros cuadrados.	Alrededor 9 km ² (900 ha) para mapa rectangular por vuelo hasta 72 km ² (7200 ha) para vuelo de línea recta
Resolución	500 – 250 m AGL. Menor altitud limitada por ruido. Reglamentos y riesgo en zonas urbanas. Requiere tiempo para conectar a tierra.	4 cm/pix a 100 m AGL – 11 cm/pix a 300 m AGL. Límite superior de altitud a menudo impuesta por las leyes de tránsito aéreo.
Impacto ambiental	Límites de ruido. Consumo de combustible.	A 200 metros en su mayoría inaudibles. Energía eléctrica recargable.
Preparación retoma de la misión	Sobre cartografía. Debe regresar al campo de aviación.	En la estación de tierra sobre un software específico. Se puede guardar cerca de zona de la misión a la espera de tiempo despejado.

FUENTE: *Krysztof citado por Berrio, et al. (2015)*

4.1. PLANIFICACIÓN DEL VUELO

López (2014), indica que ya sea mediante fotogrametría clásica o mediante vuelos no tripulados, todo proyecto de levantamiento fotogramétrico se divide en las siguientes etapas:

- Planificación de vuelo: En la que en función de la resolución que se quiera obtener, la ubicación de la extensión a representar y la orografía del terreno, se obtendrán las posiciones que la cámara ha de tener en cada toma, programando para ello todos los parámetros necesarios en cuanto a altura de vuelo, velocidad de ascenso y desplazamiento, inclinación de la cámara, número de fotos en cada punto, precisión del sistema de posicionamiento, etc.

- Apoyo topográfico: la cual será útil para la correcta georreferenciación del producto final y que consiste a grandes rasgos, en situar puntos en el terreno con coordenadas conocidas y perfectamente reconocibles en las fotografías, a fin de poder resolver la orientación externa y georreferenciar nuestro trabajo.

Sánchez (2006), menciona que, como cualquier otro proyecto de ingeniería, el vuelo fotogramétrico ha de contemplar una serie de aspectos importantes en su proyecto que suelen venir descritos en los pliegos de condiciones del mismo. Por lo general, las facetas más importantes que han de contemplarse son:

- Condiciones generales del vuelo: Zonas y superficies a cubrir por el vuelo, escala aproximada de la imagen, sistema de navegación y adquisición de datos, tipo de objetivo, distancia focal aproximada, tipo de película y tipo de avión o aeronave a utilizar.
- Cámara: Especificaciones de la cámara métrica.
- Cobertura fotográfica y vuelo: Cobertura fotográfica (pasadas longitudinales o transversales), altura de vuelo y tolerancias máximas admisibles sobre el mismo, recubrimientos longitudinales o transversales, ángulo máximo de deriva del vuelo, condiciones fotográficas de la toma, verticalidad de los fotogramas y establecimiento de un proyecto de vuelo previo.
- Material fotográfico: Película, anotaciones en las diapositivas originales, condiciones de revelado, exposición y procesado.
- Material y documentación a entrega.
- Apoyo de campo.

Quirós (2014), menciona que la planificación de un proyecto fotogramétrico se puede dividir en tres fases:

- Planificación del vuelo, que debe seguirse para tomar todas las fotografías aéreas que se usarán en el proyecto.
- Planificación del control terrestre, así como la ejecución de todos los trabajos topográficos que satisfagan la precisión requerida por el proyecto.

- Estimación de los costos, que conlleva el proyecto.

La condición fundamental de toda planificación de vuelo es la obtención de una adecuada cobertura fotográfica con el mínimo de fotografías, tal que cada parte del terreno por pequeña que sea, debe ser cubierta estereoscópicamente (Quirós, 2014).

4.1.1. DISTANCIA DE MUESTREO EN EL TERRENO

García (2017), señala que la altura de vuelo o distancia al objeto está condicionada por la actividad que se desea desarrollar, el nivel de detalle que sea necesario para captar todos los detalles, tomando en consideración la resolución y la focal del objetivo. Por ello hay que tener en cuenta el ground sample distance (GSD) que es la huella o el tamaño del píxel proyectado sobre el terreno, tal como se observa en la Figura 9. También se suele dar como la distancia entre los centros de dos píxeles vecinos en una imagen aérea medidos en planta.

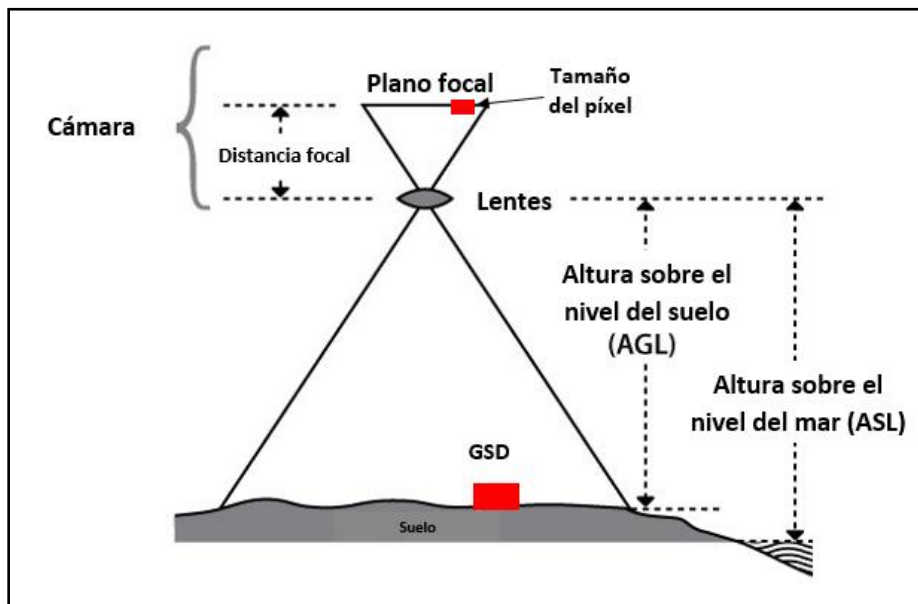


Figura 9: Relación entre el GSD y la altura de vuelo.

FUENTE: García (2017).

López (2014), menciona que el GSD proviene del inglés Ground Sample Distance, o distancia de muestreo en el terreno. En una foto digital del terreno hecha desde el aire, se trata de la distancia medida entre centros de los píxeles en el terreno. Esta magnitud está directamente relacionada con la altura de vuelo y la focal de la cámara por medio de la expresión:

$$GSD = \frac{\text{Altura de vuelo} \times \text{tamaño píxel (sensor)}}{\text{Distancia focal}}$$

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. LUGAR DE ESTUDIO

1.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El área de estudio se encuentra dentro del Instituto Regional de Desarrollo Selva – Génova, el cual es una estación de investigación y producción de diversos frutales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), localizado en el área de influencia del eje interurbano San Ramón – La Merced. El ámbito pertenece a la provincia de Chanchamayo, departamento de Junín, tal como se observa en la Figura 10.

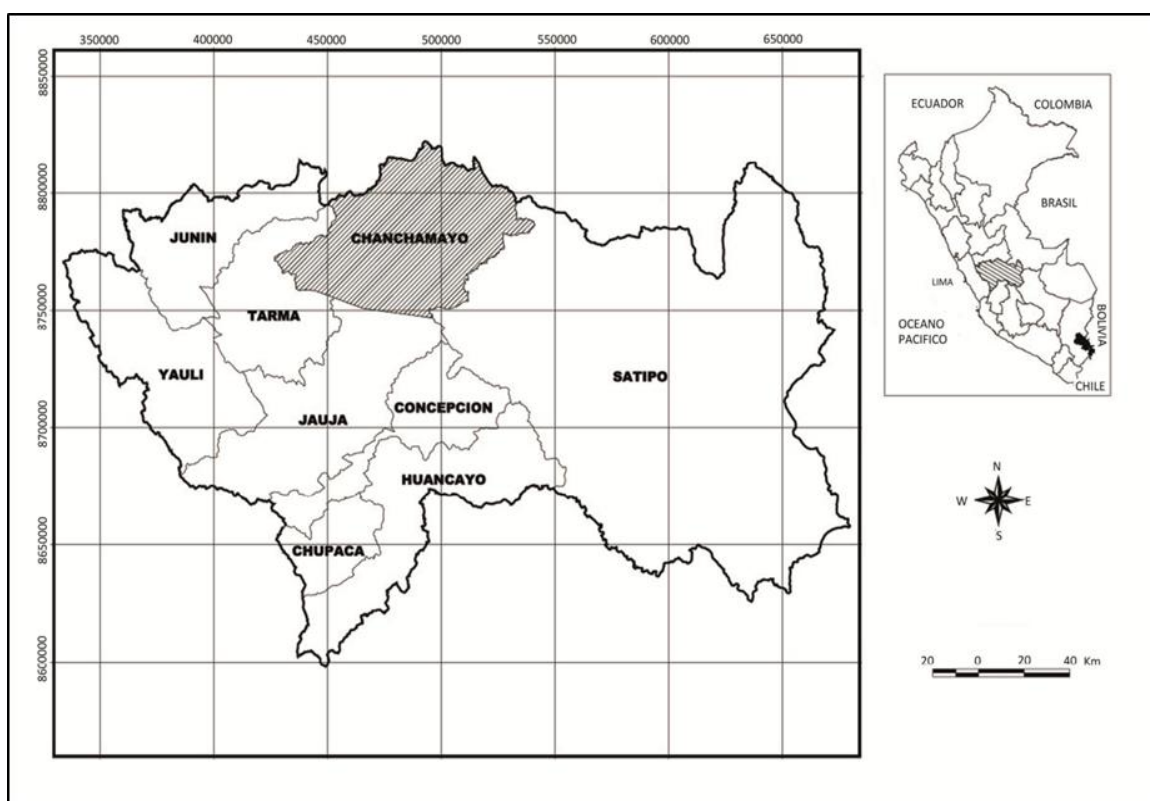


Figura 10: Ubicación de la provincia de Chanchamayo en el departamento de Junín.

FUENTE: Cáceres y Reynel (2010).

La provincia de Chanchamayo se divide en 06 distritos, los cuales se presentan en la Tabla 6:

Tabla 6: Chanchamayo y sus distritos: capital, altitud, superficie y perímetro.

PROVINCIA	CAPITAL	ALTITUD (msnm)	SUPERFICIE (km²)		PERIMETRO (km)
CHANCHAMAYO	LA MERCED	760	760,45	16,3%	253,82
PERENE	PERENE	900	1504,86	32,2%	243,9
PICHANAQUI	BAJO PICHANAQUI	525	1240,46	26,5%	268
SAN LUIS DE SHUARO	SAN LUIS DE SHUARO	750	156,54	3,3%	78,47
SAN RAMÓN	SAN RAMÓN	830	622,36	13,3%	178,19
VITOC	PUCARÁ	850 – 1850	392,64	8,4%	116,4
TOTAL			4677,31	100%	

FUENTE: INEI Junín, citado por MPC (2013).

El IRD Selva- Génova, se encuentra ubicado entre las coordenadas UTM 459500 – 463500 metros (Este) y 8771500 – 8774500 metros (Norte) aproximadamente, en la zona 18 Sur y con Datum WGS64 (Giacomotti, 2016). Su ubicación se puede apreciar en la Figura 11.

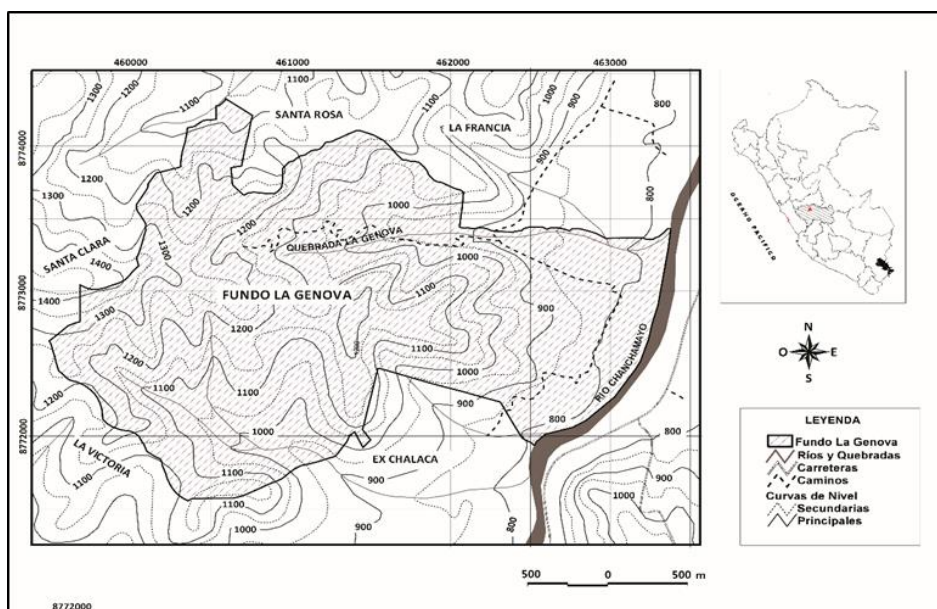


Figura 11: Ubicación del IRD – Génova en el departamento de Junín.

FUENTE: Cáceres y Reynel (2010).

La toma de información tanto fotogramétrica y mediciones de campo, se realizaron en una Parcela Permanente de Medición denominada “Génova Ladera - 2” de 1 hectárea de bosque

secundario joven, ubicada dentro de los límites del IRD Selva - Génova, establecida por el Proyecto de “Dinámica de los Bosques de Selva Central y su adecuación al cambio climático”. Este proyecto tiene como objetivo el estudio de la dinámica de diferentes tipos de bosques utilizando el establecimiento y medición de parcelas permanentes, las cuales van a generar información en el corto y mediano plazo, sobre los cambios en estructura, fisonomía, y características ecológicas de los bosques.

La “Parcela Génova Ladera 2” o “P-PM”, fue una parcela cuadrada instalada en el año 2017 de acuerdo con la metodología RAINFOR, para la instalación de parcelas permanentes de muestreo en bosques tropicales. De igual modo, su medición periódica y monitoreo se realizó y realizará con dicha metodología. Esta parcela correspondió a un bosque secundario joven, cuyas especies registradas de mayor abundancia pertenecieron a las familias Fabaceae, Lauraceae y Moraceae.

En la Figura 12, se observan los vértices y el perímetro de la “Parcela Génova 2” utilizada para la presente investigación.

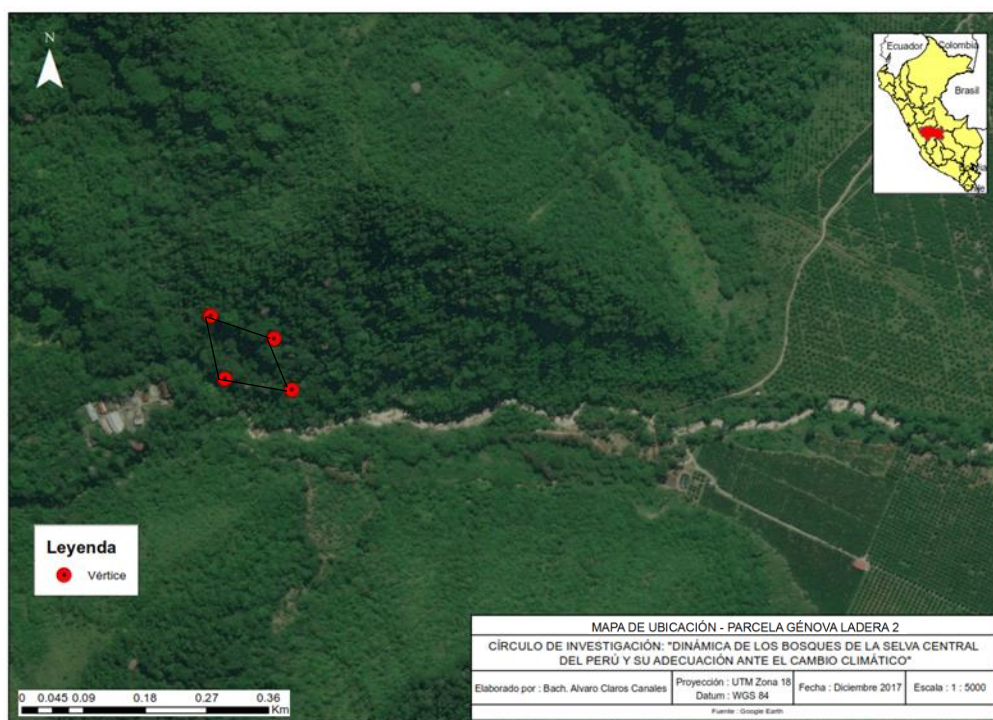


Figura 12: Mapa de ubicación de la Parcela Génova Ladera - 2 – PPM

FUENTE: Elaboración Propia.

En la Tabla 7, se presentan las coordenadas de los vértices de la “Parcela Modelo”, que se encuentran en la zona 18 Sur y con datum WGS84.

Tabla 7: Coordenadas de la “Parcela Génova Ladera – 2”

Vértice	Coordenada UTM Este	Coordenada UTM Norte
1	461634,86	8773469,31
2	461613,93	8773560,74
3	461706,61	8773527,85
4	461732,73	8773452,91

1.2. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Pastor (1992), indica que el clima de esta zona está definido como cálido y húmedo, muy característico de la zona tropical de selva alta, y en términos generales, presenta las siguientes características: Temperatura promedio de 24°C, con una temperatura máxima de 30°C y una mínima de 18°C. Con respecto a la precipitación, este clima, al igual que en todas las laderas orientales de Los Andes, se encuentra bajo la influencia de una masa de aire marítima tropical que proviene del Atlántico y de la evapotranspiración y evaporación del Llano Amazónico.

La Municipalidad Provincial de Chanchamayo (2013), presenta en la Tabla 8, las características climáticas de cada uno de los distritos:

Tabla 8: Características climáticas según distritos.

Provincia	CARACTERÍSTICAS	TEMPERATURA		PRECIPITACIÓN
		MÁX	MÍN	HR*
CHANCHAMAYO	Tropical, cálido, húmedo y lluvioso.	30°C	18°C	2000 mm HR: 60% A 70%
PERENE	Sabana tropical, humedad periódica, lluvias escasa o seca en invierno.	28°C – 32°C	18,5°C – 20,2°C	1800 mm. HR: 75% a 85%
PICHANAKI	Tropical, húmedo y cálido, propio de la Selva, calurosa en épocas de verano y con lluvias torrenciales en épocas de invierno con presencia de vientos.	30°C	25°C	1800 mm. HR: 76% a 86%
SAN LUIS DE SHUARO	Cálido húmedo, lluvias ocurren de noviembre a abril.	30°C	17°C	1949 mm/año. HR: 79%
SAN RAMÓN	Lluvioso, con inundaciones periódicas.	24°C	22°C	2000 mm. HR: 80%
VITOC	Formación Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical		14.1°C	998 mm. HR: 75%

*HR = Humedad Relativa.

FUENTE: PIGARS CHANCHAMAYO, citado por MPC (2013)

ONERN (1976), presenta el Mapa Ecológico del Perú basado en el Sistema de Zonas de Vida de Holdridge, en donde ubica a las ciudades de San Ramón y La Merced en el Bosque Húmedo Premontano Tropical (bh- PT), esta zona de vida se caracteriza por presentar una biotemperatura máxima promedio anual de 24,9°C y una mínima promedio anual de 17,2°C; la precipitación máxima es de 1968 mm.

GORE Junín (2015), indica que la provincia de Chanchamayo cuenta con una gran diversidad de unidades de suelos, que se caracterizan por ser de textura franco, franco arenoso, franco arcilloso, y transiciones; poseen una permeabilidad moderada a moderadamente lenta en su mayoría y son suelos que entran en las categorías de superficiales a muy profundos.

Cáceres y Reynel (2010), señalan que los suelos de la zona se clasifican en tres grupos, de acuerdo con su origen y posición fisiográfica:

- Suelos aluviales recientes en terrazas altas: Se forman a partir de sedimentos aluviales de una antigüedad media y son de fertilidad moderada. Este tipo de suelo es usado para cultivos y cuando estos son abandonados, crece vegetación secundaria.
- Suelos coluvio – aluvio locales: Formados generalmente a partir de materiales gruesos o medios, acumulados por acción gravitacional en la base de las pendientes empinadas o acarreados desde lugares cercanos por acción del agua de escorrentía. Se encuentran distribuidos principalmente a lo largo de las quebradas estrechas. Son de color pardo rojizos oscuros, de textura gruesa a media. Suelo utilizado para cultivos.
- Suelos residuales en ladera y cima de cerros: Son suelos de formación in situ, textura pesada, ácidos, de baja fertilidad y capacidad productiva.

Predomina un paisaje montañoso, con altitudes que oscilan de 800- 2,200 msnm, con presencia de fuertes pendientes que representan alrededor del 80% de la superficie total en las zonas de San Ramón y La Merced (Dancé & Kometter, 1982). GORE Junín (2015), indica que esta zona posee diferentes pendientes pero que por lo general van desde el 0% al 75%.

2. EQUIPOS Y MATERIALES

2.1. EQUIPOS

- 01 Drone Phantom 4 – DJI
- 01 Cámara digital Canon PowerShot D30 3,0’’ 12,1MP
- 01 Laptop Asus Procesador Intel Coreo i7-6700HQ, 12 GB Memoria RAM
- 01 Impresora HP Láser Jet P2035n
- 01 GPS Garmin MAP 64s
- 01 Relascopeio de Bitterlich
- 01 Brújula marca Suunto Modelo KB 14
- 01 Hipsómetro marca Suunto Modelo PM 5/1520
- 02 Walkie talkie marca Motorola.
- 01 Forcípula de madera.
- 01 Wincha de 30 metros.
- 01 Ipad Mini 4 marca Apple

2.2. SOFTWARES

- Pix4D Desktop
- ArcGis 10.5
- Microsoft Word 2016
- Microsoft Excel 2016
- DJI Go

2.3. MATERIALES

- Libreta de campo
- Útiles de escritorio

3. METODOLOGÍA

Para la siguiente investigación, se realizó el vuelo y evaluación de individuos dentro de la “Parcela Génova Ladera - 2” ubicada en el Instituto de Desarrollo Regional Selva – Génova. El procedimiento metodológico se dividió en 3 fases, tal como se muestra a continuación:

3.1. FASE DE PLANIFICACIÓN

La secuencia metodológica de la primera fase se presenta en la Figura 13:



Figura 13: Fase de planificación

FUENTE: Elaboración Propia.

3.1.1. PLANIFICACIÓN DEL VUELO

En esta primera actividad, se enlistaron los principales parámetros a considerarse en el vuelo, tal como lo recomienda Sánchez (2016). Estos parámetros fueron desde los tipos de aeronaves a utilizar hasta las diferentes alturas. Esta planificación constó de un proyecto de vuelo, el cual presentó los siguientes aspectos: (a) Condiciones generales del vuelo, (b) Cámara, (c) Cobertura fotográfica y vuelo, (d) Material y documentación a entregar y (e) Apoyo de campo.

- a) Condiciones generales del vuelo: En este aspecto, se indicó la superficie aproximada a cubrir con el vuelo, el cual estuvo en función del objetivo del vuelo. También se presentaron rangos de escala que estuvieron en función del detalle que se quiera obtener con la imagen aérea u ortomosaico. En el caso de existir diversas opciones de aeronaves que podrían utilizarse, se colocan las que estén acorde al objetivo del vuelo, sin embargo; para esta investigación ya se encuentra establecido el VANT a utilizarse y sus características. En la Tabla 9, se presentan estas características:

Tabla 9: Condiciones generales del vuelo.

ASPECTO DEL PROYECTO	CARACTERÍSTICA	
Condiciones generales del vuelo	Superficie a cubrir el vuelo	Una de las parcelas permanentes de medición que se encuentran ubicadas en el IRD Selva – Génova, el tamaño mínimo que debe tener esta parcela es de 1 hectárea.
	Escala aproximada de la imagen	Entre 1:1300 y 1:1000 para que se pueda visualizar todo el ortomosaico.
	Datum	WGS 1984
	Distancia focal del VANT	3.61 mm
	Tipo de aeronave a utilizar	Aerodino, ala rotatoria, multirrotor. (Modelo: Phantom 4)

- b) Cámara: En este aspecto, se presentaron las posibles características de la cámara deseada para el vuelo que cumpla con el objetivo del vuelo. Como ya se cuenta con el VANT definido, este cuenta con su propia cámara incorporada, por lo que la Tabla 10, presenta sus características:

Tabla 10: Cámara del VANT.

ASPECTO DEL PROYECTO	CARACTERÍSTICA	
Cámara	Sensor	1/2.3" Píxeles efectivos: 12.4M
	Objetivo	FOV 94° 20 mm (35 mm formato equivalente) f/2.8, enfoque a ∞
	Rango ISO	100 – 3200 (video) 100 – 1600 (foto)
	Velocidad del obturador	8 s – 1/8000s
	Tamaño máximo de imagen	4000x3000
	Modos de fotografía	Disparo único. Disparo en ráfaga: 3/5/7 disparos. Exposición Automática en Horquillado (AEB): 3/5. Horquilla de Exposición a 0.7EV Bias. Intervalo HDR
	Modos de video	UHD: 4096×2160 (4K) 24 / 25p 3840×2160 (4K) 24 / 25 / 30p 2704×1520 (2.7K) 24 / 25 / 30p FHD: 1920×1080 24 / 25 / 30 / 48 / 50 / 60 / 120p HD: 1280×720 24 / 25 / 30 / 48 / 50 / 60p
	Tipos de tarjetas SD compatibles	Micro SD. Capacidad Máx.: 64 GB. Clase 10 ó UHS-1 valoración requerida
Temperatura de funcionamiento	De 0° C a 40° C	

- c) Cobertura fotográfica y vuelo: En este aspecto, se indicó el tipo de cobertura que se realizará, el cuál puede ser o solo longitudinal o transversal y/o combinación de ambos. La altura de vuelo que depende del objetivo del vuelo y el recubrimiento longitudinal/transversal. En la Tabla 11, se presenta este aspecto:

Tabla 11: Cobertura fotográfica y vuelo.

ASPECTO DEL PROYECTO	CARACTERÍSTICA	
Cobertura fotográfica y vuelo	Cobertura fotográfica	Se utilizará la cobertura longitudinal, transversal y combinación de ambas.
	Altura de vuelo	A partir de los 60 metros hasta los 150 metros.
	Recubrimiento longitudinal o transversal	El rango del recubrimiento debe ser entre 70 a 90%.

- d) Material y documentación a entregar: Este aspecto detalló el producto o productos que se deben entregar al finalizar el vuelo o que se obtendrá como resultado del mismo. Para esta investigación se recopilaron las fotografías aéreas individuales de los vuelos realizados con sus respectivos ortomosaicos. Este material se entregó a representantes del Proyecto de “Dinámica de los Bosques de Selva Central y su adecuación al cambio climático”.
- e) Apoyo de campo: Este aspecto sirve para indicar los diferentes apoyos de campo que se puedan encontrar con facilidad tanto en la fotografía aérea/ortomosaico y el terreno a sobrevolar. Para esta investigación se utilizó como apoyos de campo a los árboles dominantes o codominantes visibles en el ortomosaico y las áreas abiertas sin vegetación.

3.1.2. RECONOCIMIENTO DEL ÁREA DE ESTUDIO

Esta etapa se llevó a cabo en un viaje de reconocimiento de las parcelas permanentes de medición que se encontraban dentro de límites del IRD Selva – Génova, en donde se realizó un recorrido y reconocimiento por el perímetro para identificar zonas para posibles despegues y aterrizajes, además de la verificación de la complejidad del bosque, altura de los árboles, presencia de claros, especies dominantes, pendiente y demás observaciones pertinentes antes de realizar los vuelos respectivos. También se identificó la hora adecuada de vuelo, la cual dependió de las condiciones de viento y de luminosidad, observables durante los días de reconocimiento.

Estos criterios de verificación de cada una de las parcelas permanentes de medición visitadas, se utilizaron para determinar el área a evaluar. Los criterios de selección fueron: (1) Áreas libres como claros o zonas sin vegetación, (2) Accesibilidad al área y (3) Condiciones climáticas como luminosidad y viento del día.

3.2. FASE DE CAMPO

La secuencia metodológica de la segunda fase se presenta en la Figura 14:

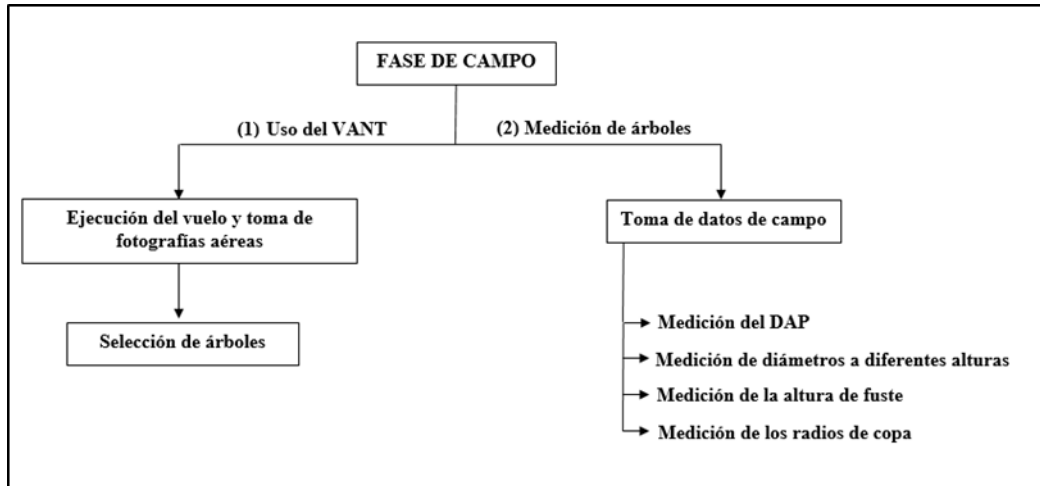


Figura 14: Fase de campo.

FUENTE: Elaboración Propia.

3.2.1. EJECUCIÓN DEL VUELO Y TOMA DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS

El vuelo se realizó tanto de manera manual con la interacción piloto – control y de manera automática con la aplicación Pix4D Capture en el Ipad Mini 4. Se realizaron diferentes vuelos con las siguientes alturas: 60 metros, 70 metros, 80 metros, 90 metros, 100 metros y 150 metros con respecto al suelo. Estos vuelos contaron con traslapes superiores al 85% para generar mayor cantidad de puntos homólogos entre fotografías aéreas. Con respecto a la dirección o cobertura fotográfica, se realizaron vuelos longitudinales, transversales y combinación de ambas direcciones, cubriendo más área que el área de estudio. La toma de fotografías aéreas en el modo manual se realizó cada 2 o 3 segundos, estabilizando el VANT antes de la captura fotográfica, caso opuesto con el vuelo automático, debido a que el software Pix4D Capture determinó el tiempo de obturación y el número de fotografías aéreas en el recorrido.

3.2.2. SELECCIÓN DE ÁRBOLES

Este proceso de selección se realizó en un ortomosaico de prueba con altura de 100 metros, el cual abarcaba el área de estudio. Se seleccionaron los árboles dominantes, cuya copa sea visible y reconocible en el ortomosaico y en el terreno dentro del límite de la “Parcela Génova Ladera - 2”. Para conseguir este objetivo, se exportó este ortomosaico al Ipad Mini 4 para contar con la misma resolución, y pueda ser llevada al campo para el reconocimiento de los árboles. Una vez en el área de estudio, se visualizó el ortomosaico y se eligió el árbol dominante, el cual se buscaba en el terreno para ser codificado y posteriormente medido, este árbol era codificado con un número correlativo en el iPad Mini 4 y en el terreno con una cinta, este procedimiento se realizó para 50 árboles.

3.2.3. TOMA DE DATOS DE CAMPO

Se realizó la medición de 50 árboles en campo, de acuerdo con la metodología mencionada por Barrena, *et al.* (2007), para la medición de forma y volumen:

- Medición del diámetro a la altura del pecho: Se realizó la medición del DAP en centímetros a 1,30 metros de altura con respecto al suelo con una forcípula de madera. Se realizaron dos mediciones perpendiculares para obtener un DAP promedio.
- Medición de diámetros a diferentes alturas: Estos diámetros en centímetros a diferentes alturas se midieron con un Relascopio de Bitterlich, con dos mediciones por árbol, tal como se observa en la Figura 15. Si la altura del fuste era mayor o igual a los 12 m de altura de fuste (H_f), el diámetro se midió cada 2 m y si la altura del fuste era menor o igual a los 12 m de fuste (H_f), el diámetro se medía cada 1 m.

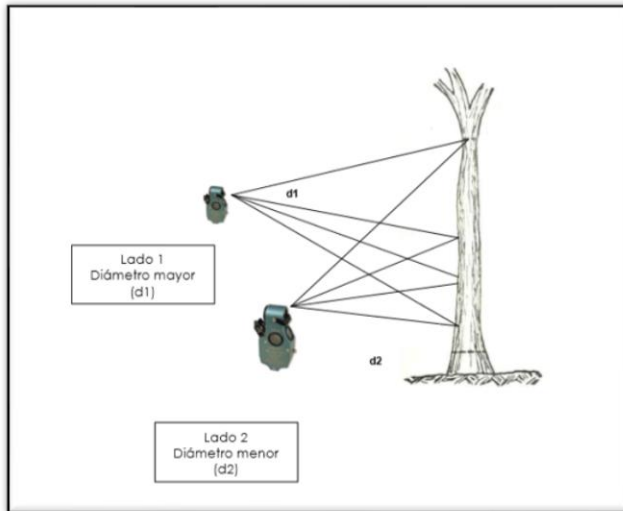


Figura 15: Medición de los diámetros a diferentes alturas con el Relascopio de Bitterlich.

FUENTE: Barrena, et al. (2007)

- Medición de altura del fuste: Esta medición se realizó con el Relascopio de Bitterlich en la franja que posee de hipsómetro. La altura se expresó en metros.
- Medición de los radios de copa: Se midieron los radios de copa en metros, en la dirección a los ejes cardinales con una cinta métrica de 30 metros utilizando la proyección de la copa en el suelo, tal como se observa en la Figura 16.

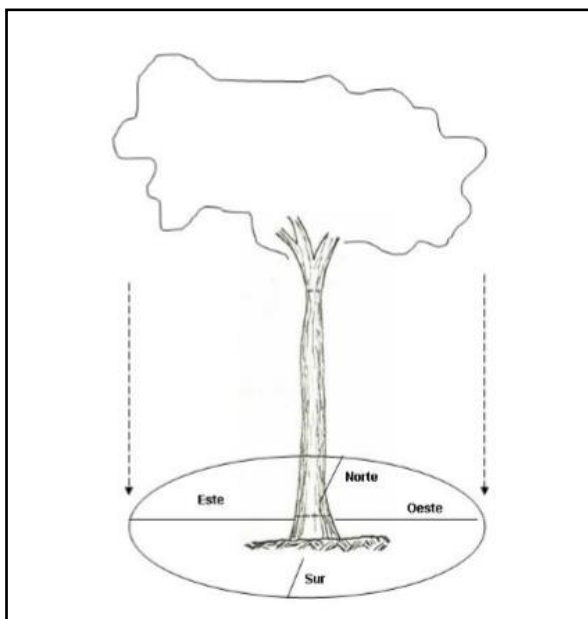


Figura 16: Medición del radio de copa mediante la proyección de la misma.

FUENTE: Barrena, et al. (2007)

3.3. FASE DE GABINETE

La secuencia metodológica de la tercera fase se presenta en la Figura 17:

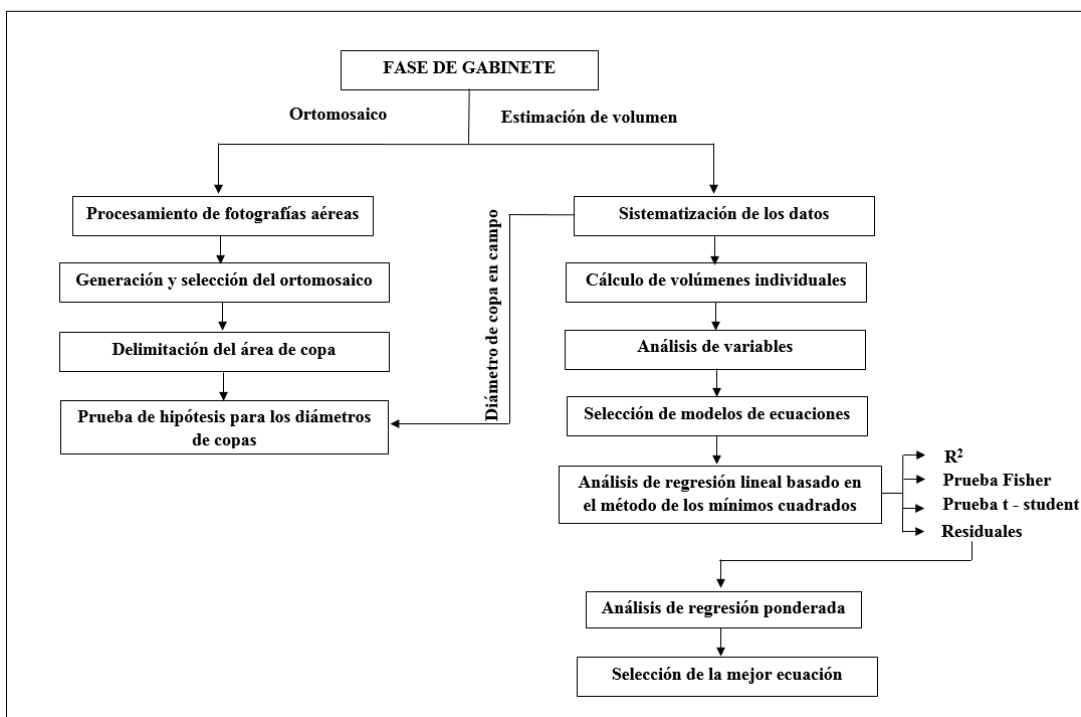


Figura 17: Fase de gabinete.

FUENTE: Elaboración Propia.

3.3.1. PROCESAMIENTO DE FOTOGRAFÍAS AÉREAS

Se procesaron las fotografías aéreas de cada uno de los diferentes vuelos realizados sobre la “Parcela Génova Ladera - 2” en el programa Pix4Ddesktop. Este programa identificó automáticamente las características de la cámara que se utilizó para la toma de fotografías aéreas, y dividió al proceso en 3 etapas:

- **Procesamiento inicial:** Se identificaron los puntos en común entre las fotografías aéreas, se optimizó la georreferenciación con los puntos centrales de cada fotografía y se prepararon las mismas para las demás etapas.
- **Nubes de puntos y malla:** Se generó la nube de puntos, con los puntos comunes de las fotografías aéreas y el agrupamiento de los mismos.
- **MDS, ortomosaicos e índices:** Para finalizar, se terminó la ortorectificación para la generación del ortomosaico, adicionalmente se generó un modelo digital de superficie e índices.

3.3.2. SELECCIÓN DEL ORTOMOSAICO

Una vez generados todos los ortomosaicos obtenidos en los vuelos con las siguientes alturas: 60, 70, 80, 90, 100 y 150 metros con respecto al suelo; se procedió a elegir el ortomosaico para trabajar en él. La selección del ortomosaico fue de manera visual, se basó en la calidad de las imágenes, aquél ortomosaico que no presentó mucha distorsión en toda su cobertura fue elegido. Por otro lado, se verificó la claridad de las copas que van a delimitarse para la presente investigación.

- Cálculo de la Distancia de Muestreo en el Terreno (GSD)

Se calculó el GSD en centímetros/píxel, mediante la siguiente fórmula:

$$GSD = \frac{\text{Altura de vuelo} \times \text{tamaño píxel (sensor)}}{\text{Distancia focal}}$$

3.3.3. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE COPA

La medición del área de copa en el ortomosaico se realizó con la generación de un archivo shapefile que se editó y creó respetando los límites de las copas de los árboles evaluados en campo en el software ArcGis 10.5. En este archivo shapefile, se agregó dos columnas adicionales a la tabla de atributos, denominadas: “Número_Arb”, que correspondió al número del árbol evaluado y “área” que correspondió al área de la copa dibujada. Esta delimitación se realizó con la ayuda de otros mosaicos auxiliares generados a diferentes alturas y con las fotografías individuales del mismo ortomosaico del estudio.

Se delimitaron los 50 árboles evaluados en campo y se procedió a calcular el área de cada uno en la tabla de atributos en el ArcMap 10.5, y con el área obtenida se obtuvo el diámetro de copa promedio asumiendo la forma de la copa como un círculo mediante la fórmula señalada por Ugalde (1981):

$$\text{Área (m}^2\text{)} = \frac{\pi \times D_{\text{copa}}^2}{4}$$

En donde:

D_{copa}: Diámetro de copa en metros.

A: Área de copa en metros cuadrados.

3.3.4. SISTEMATIZACIÓN DE LOS DATOS DE CAMPO

Los datos obtenidos se ordenaron de manera que los diámetros a diferentes alturas estén correspondientes a sus alturas de medición respectivas, tal como lo indican Guillén (2014) y Romero (2017), además estos se ordenaron junto a sus respectivos radios de copa medidos en campo.

3.3.5. COMPARACIÓN DE LOS DIÁMETROS DE COPA

Teniendo los diámetros de copa medidos en campo y los diámetros de copa obtenidos en el ArcMap 10.5, se procedió a realizar una prueba de hipótesis para comparar dichos diámetros y comprobar si existe diferencia estadística entre ambos parámetros. En esta prueba se evaluaron las siguientes premisas:

- Hipótesis nula (H_0): $\mu_{\text{campo}} = \mu_{\text{mosaico}}$ (El promedio de los diámetros medidos en campo es igual al de los diámetros medidos en el mosaico)
- Hipótesis alterna (H_1): $\mu_{\text{campo}} \neq \mu_{\text{mosaico}}$ (El promedio de los diámetros medidos en campo es diferentes al de los diámetros medidos en el mosaico)

Estas premisas consideraron al promedio de los datos, con lo cual fueron evaluadas con un estadístico de prueba que corresponde a una distribución normal para muestras independientes y grandes, presentado por Rodríguez, *et al.* (2007):

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma^2}{n_1} + \frac{\sigma^2}{n_2}}}$$

En donde:

\bar{x} : Promedio de la muestra

μ : Promedio de la población

σ : Desviación estándar de la población

n: Número de datos

Esta prueba de hipótesis fue realiza en el software Microsoft Excel, con la herramienta “Análisis de datos”.

3.3.6. CÁLCULO DE VOLÚMENES DE FUSTES

Para determinar los volúmenes individuales, se procedió a calcular los volúmenes de las secciones de cada uno de los árboles mediante la fórmula de Smalian indicada por Escobar (2014):

$$V = \frac{\pi}{4} x \frac{D^2 + d^2}{2} x L$$

En donde:

D = Diámetro mayor de la sección (m)

d = Diámetro menor de la sección (m)

L = Longitud de la sección (m)

Los volúmenes de cada sección fueron sumados para obtener el volumen de fuste individual total de cada uno de los 50 árboles medidos.

3.3.7. ANÁLISIS DE VARIABLES

Esta etapa se realizó con el objetivo de observar en gráficos de dispersión con respecto a ambas variables de las ecuaciones (Volumen y diámetro de copa), la existencia y distribución de datos que se encuentren lejos de la distribución global, que puedan ser considerados como datos “outliers” para ser eliminados en los análisis futuros de la investigación. En estos gráficos de dispersión generados, se ubicó al volumen calculado en el eje de las ordenadas y a las variantes del diámetro de copa (diámetro de copa, radio de copa, diámetro de copa al cuadrado y diámetro de copa al cubo) en el eje de las abscisas.

3.3.8. SELECCIÓN DE LOS MODELOS DE ECUACIÓN

Los modelos de ecuación se seleccionaron en consenso con el asesor de la investigación, teniendo como premisa que se considere como variable independiente al diámetro de copa del árbol y como variable dependiente al volumen del fuste, estos modelos de ecuación fueron seleccionados tal como se muestra en la Tabla 12:

Tabla 12: Modelos de ecuación de volumen seleccionadas.

Modelo	Ecuación
1	$V = b_0 + b_1dcopa$
2	$V = b_0 + b_1dcopa^2$
3	$V = b_0 + b_1dcopa^3$
4	$V = b_0 + b_1dcopa/2$
5	$V = b_0 + b_1dcopa + b_2dcopa^2$
6	$V = b_0 + b_1dcopa + b_2dcopa^2 + b_3dcopa^3$
7	$V = b_0 + b_1dcopa^{1/2}$

3.3.9. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL BASADO EN EL MÉTODO DE LOS MÍNIMOS CUADRADOS

Este análisis se realizó en el software Excel 2016, con la herramienta “Análisis de datos”, teniendo en cuenta un nivel de confianza del 95%. Este análisis fue realizado para 40 árboles. Estos resultados fueron analizados y utilizados para el descarte de los modelos de ecuaciones de volumen que no cumplan con los criterios mencionados a continuación:

- a) Coeficiente de determinación (R^2): Es el primer criterio que se analizó como resultado de este análisis, en este criterio se tomó en consideración lo mencionado por diversos autores como valor mínimo aceptable de este coeficiente. Para este análisis se consideró un valor mínimo de 0,65 como R^2 debido a que fue el mínimo valor indicado en investigaciones para considerar una asociación aceptable, por lo que aquellas ecuaciones que contaban con un valor menor a este eran descartadas para el posterior análisis.
- b) Prueba estadística Fisher (F): Para el segundo criterio, se tomó en cuenta los resultados obtenidos para el p – valor, teniendo en cuenta las siguientes premisas:

$$H_0: \beta_1 = 0 \text{ (No existe relación lineal entre } X \text{ e } Y)$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0 \text{ (Si existe relación lineal entre } X \text{ e } Y)$$

Se realizó esta prueba con un nivel de confianza del 95%, por lo que tal como lo indica Romero (2012) y García (2010), se van a aceptar aquellas ecuaciones con un p – valores menores a 0,05 (nivel de significación elegido).

- c) Prueba estadística t – student (t): En este criterio, se realiza una prueba estadística con el fin de determinar si el coeficiente de la variable explicativa es igual a cero como lo indica Arriaza (2006), teniendo las siguientes premisas:

$H_0: \beta_1 = 0$ (El coeficiente es estadísticamente igual a cero)

$H_1: \beta_1 \neq 0$ (El coeficiente es estadísticamente diferente a cero)

Los resultados obtenidos del p-valor son utilizados para aceptar o descartar ecuaciones, en donde una ecuación con un p-valor mayor a 0,05, será descartada del análisis.

- d) Análisis de residuales: Este análisis se realizó graficando los residuales (eje x) y el volumen estimado (eje y), para observar la distribución de los residuos y corroborar que cumple con el supuesto de homocedasticidad. Al observar que ninguna ecuación cumple este supuesto, se procedió a ponderar las ecuaciones de volumen.

3.3.10. PONDERACIÓN DE ECUACIONES

En esta etapa del proceso, se ponderó tanto la variable dependiente como la independiente a través de un factor “K”, con esto se realizó un nuevo análisis de regresión con todos los criterios mencionados anteriormente. Los factores de ponderación utilizados fueron:

$$\frac{1}{dcopa}; \frac{1}{dcopa^{1.1}}; \frac{1}{dcopa^{1.2}}; \frac{1}{dcopa^{1.3}}; \frac{1}{dcopa^{1.4}}; \frac{1}{dcopa^{1.5}}; \frac{1}{dcopa^{1.6}}; \frac{1}{dcopa^2}$$

En el siguiente ejemplo, se observa cómo se realizó la ponderación para una de las ecuaciones:

$$V = b_0 + b_1 dcopa$$

Se toma también como un ejemplo uno de los factores de ponderación que se eligieron, que es: $\frac{1}{K} = \frac{1}{dcopa}$, y este valor se multiplica a todas las variables presentes en la ecuación, obteniendo así la siguiente ecuación ponderada:

$$\frac{V}{dcopa} = \frac{b_0}{dcopa} + b_1$$

Esta ponderación se realizó a todos los modelos de ecuación que fueron aceptados después del análisis anterior, obteniendo de esta manera más modelos de ecuación con cada uno de los factores de ponderación seleccionados.

3.3.11. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL BASADO EN EL MÉTODO DE LOS MÍNIMOS CUADRADOS PARA LAS ECUACIONES PONDERADAS

Las ecuaciones ponderadas que se obtuvieron con cada de uno de los factores de ponderación fueron analizadas mediante la regresión basada en el método de los mínimos cuadrados de la misma manera que se indica en el punto 3.3.10, considerando los mismos criterios de análisis.

3.3.12. ELECCIÓN DE LA MEJOR ECUACIÓN

Para finalizar el proceso metodológico, se procedió a calcular los Índices de Furnival (IF) para las ecuaciones ponderadas que no se han descartado, ya que este índice permite comparar modelos con diferentes variables dependientes.

Este índice, se calculó con la siguiente fórmula mencionada por Furnival (1961):

$$IF = \sqrt{CME} * antilog\left(\frac{1}{n} * \sum Logp\right)$$

En donde, “p” es la inversa del factor de ponderación, CME es el Cuadrado Medio del Error y “n” la cantidad de árboles evaluados para el estudio.

3.3.13. COMPARACIÓN ENTRE EL VOLUMEN ESTIMADO Y EL VOLUMEN REAL

Para corroborar la confiabilidad estadística de la ecuación seleccionada y de los volúmenes estimados, se procedió a realizar una prueba de hipótesis con 9 individuos dominantes. En esta prueba se evaluaron las siguientes premisas:

- Hipótesis nula (H₀): $\mu_{Volreal} = \mu_{Volestimado}$ (El promedio del volumen real en campo es igual al volumen estimado con la ecuación)
- Hipótesis alterna (H₁): $\mu_{dcampo} \neq \mu_{dmosaico}$ (El promedio del volumen real en campo es diferente al volumen estimado con la ecuación)

Estas premisas consideraron al promedio de los datos, con lo cual fueron evaluadas con un estadístico de prueba que corresponde a una distribución t – student que corresponde para muestras independientes y pequeñas, con varianzas poblaciones iguales presentado por Rodríguez, *et al.* (2007):

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{s^2}{n_1} + \frac{s^2}{n_2}}}$$

- En donde:
- \bar{x} : Promedio de la muestra
- μ : Promedio de la población
- σ : Desviación estándar de la muestra.
- n: Número de datos

Esta prueba de hipótesis fue realizada en el software Microsoft Excel, con la herramienta “Análisis de datos”.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. FASE DE CAMPO

1.1. RECONOCIMIENTO DEL ÁREA DE ESTUDIO

Se realizó el reconocimiento y recorrido de las parcelas permanentes de medición. Esta fase, se puede observar en los Anexos 1 y 2.

En la Tabla 13 se muestran las parcelas que fueron visitadas y su condición para la selección de la parcela a sobrevolar.

Tabla 13: Evaluación de las parcelas permanentes de medición.

N°	Código PMP	Nombre PMP	Criterios			Condición
			1	2	3	
1	P - GSX	Génova – Subxerófilo	*	*	*	APTA
2	P – GST2	Génova – Bosque secundario tardío 2		*		NO SE RECOMIENDA
3	P - GBST	Génova – Bosque secundario tardío	*	*	*	APTA
4	P - PM	Génova – Parcela Génova Ladera - 2	*	*	*	APTA

*: Cumple con el criterio.

Como se puede observar en la Tabla 13, de las 4 parcelas permanentes de medición visitadas, solamente 3 se encontraban aptas para el sobrevuelo, optando por elegir la P – PM (Génova Ladera - 2), debido a su cercanía al Centro Experimental Génova, lo cual permitiría cargar las baterías en caso se agoten para realizar vuelos ininterrumpidos.

1.2. PARÁMETROS DE VUELO Y SOBREVUELO

Dentro de la planificación del vuelo existieron parámetros que ya estaban definidos como eran los de la cámara digital debido a que se encontraba incorporada e instalado al VANT que se utilizó en la presente investigación. Sin embargo, existieron parámetros que se eligieron de acuerdo a la elección del área a sobrevolar.

En la Tabla 14, se presentan los resultados los parámetros de vuelo utilizados para el área de la parcela permanente de muestro – Parcela Génova Ladera - 2.

Tabla 14: Parámetros de vuelo.

<i>Parámetro de vuelo</i>	<i>Resultado</i>
Modo de vuelo	Manual y Automático
Altura de vuelo	60, 70, 80, 90, 100 y 150 metros
Velocidad horizontal	1 m/s
Tiempo de obturación de fotografías	2 segundos
Traslape entre fotografías	90%

El primer parámetro de vuelo es el modo de vuelo, el cual fue manual debido a que el vuelo automático presentó 2 problemas: El primero fue la poca cantidad de fotografías aéreas tomadas en su recorrido, debido a que solamente tomaba una cantidad de 10 a 12 fotografías por recorrido y el segundo fue la desviación en su recorrido que sufrió el VANT al momento de ser programado, debido a que el software Pix4D Capture no tomó en cuenta la altura de los árboles ni el tamaño de las copas, ocasionando el choque y pérdida del VANT en una copa. Resultando en la ejecución de vuelos manuales a partir del accidente en mención.

Se realizaron vuelos a diferentes alturas, teniendo como resultado una altura óptima de 100 metros con respecto al suelo, debido a que se obtuvo claridad en las fotografías aéreas con respecto a las copas. Con alturas menores a 100 metros se contaba con el riesgo de tener al VANT cercano a copas de árboles y con alturas mayores a 100 metros se obtuvieron fotografías aéreas con poco detalle y claridad. Sin embargo, todos los productos generados a diferentes alturas de vuelo se utilizaron como insumos auxiliares en la delimitación de las copas.

La velocidad horizontal fue 1 m/s, velocidad lenta debido a que se debían tomar fotografías aéreas de la mayor parte del área y permitir la estabilización de la cámara. Este parámetro fue constante en todo el vuelo, la cual fue establecida por el software DJI GO.

El tiempo de obturación de las fotografías aéreas fue definido por el piloto del VANT, el cual permitió estacionar el VANT de manera segura y eficiente en 2 segundos para la toma de fotografías.

El traslape entre fotografías aéreas fue de 90%. Se consideró el valor máximo para traslape que permitiera identificar mayor cantidad de puntos homólogos, menor distorsión y mejor procesamiento digital.

La dirección de vuelo se determinó en base a la facilidad del VANT para completar el vuelo con las baterías disponibles. Se realizó un recorrido de vuelo de una sola grilla (solo ida desde el punto de despegue), para la toma de fotografías aéreas. El esquema del recorrido de vuelo se observa en la Figura 18.

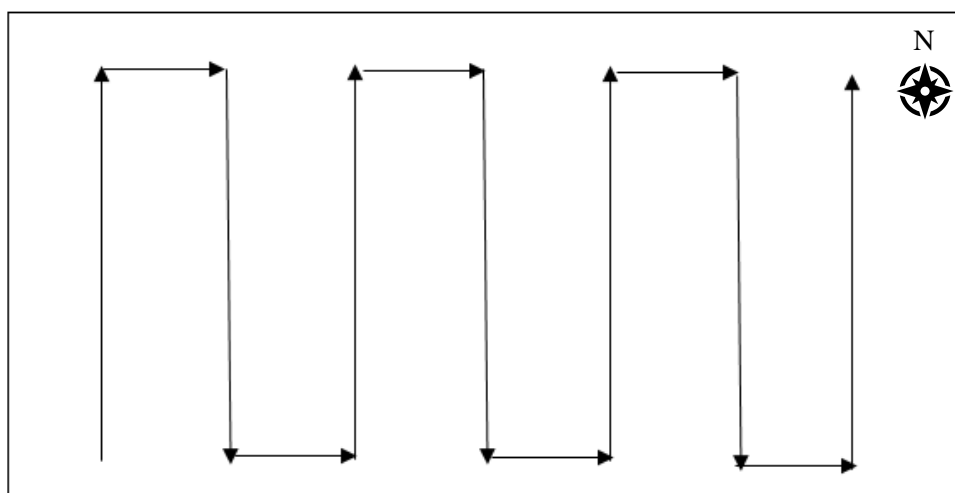


Figura 18: Esquema del recorrido del VANT para la toma de fotografías aéreas.

FUENTE: Elaboración Propia.

El vuelo se realizó teniendo en cuenta abarcar más área alrededor de la zona de estudio, de esta manera se obtuvieron mayor cantidad de fotografías aéreas para disminuir la distorsión en la generación del ortomosaico.

Los costos de la adquisición y trabajo de campo para el vuelo se presentan en cuadros en el Anexo 3.

1.3. SELECCIÓN DE ÁRBOLES

La selección de árboles se realizó con un ortomosaico de prueba con altura de 100 metros de vuelo, este ortomosaico puede observarse en la Figura 19; en donde se delimitó el perímetro de la Parcela Génova Ladera - 2 de color rojo, y se exportó este archivo al iPad Mini 4 para que pueda ser llevado a campo.



Figura 19: Ortomosaico para la selección de árboles.

Para la selección de árboles, no se eligió la opción de identificar al árbol con la coordenada UTM que brindaba el ortomosaico, debido a que el tamaño del píxel del ortomosaico era menor a 5 centímetros y el error mínimo común del GPS utilizado fue de 3 metros, razón por la cual no se pudo ubicar al árbol ingresando la coordenada obtenido por la gran diferente de distancia en metros.

El árbol primero se identificaba en el ortomosaico y se colocaba un número relativo, tal como se puede observar en la Figura 20. Este árbol se buscaba por la parcela de evaluación, teniendo en cuenta la forma de la copa, forma de las hojas visibles y ubicación referencial observada en el ortomosaico. Al reconocer al árbol en campo, tal como se observa en la Figura 21, se colocaba una cinta con el número asignado.

Se logró identificar 50 árboles dominantes dentro del área de evaluación.



Figura 20: Selección de árboles con su número correlativo en el iPad Mini 4.



Figura 21: Identificación de árboles para su medición.

1.4. MEDICIÓN EN CAMPO

Este procedimiento se realizó en 2 días de trabajo, teniendo en cuenta las premisas para la evaluación de características dasométricas para cada uno de los 50 árboles seleccionados. Los Anexos 4, 5 y 6, muestran el trabajo de campo realizado.

La Tabla 15 presenta la información obtenida de los árboles en pie, tanto para los diámetros a la altura del pecho y la altura del fuste, obtenidos con el Relascopio de Bitterlich.

Tabla 15: DAP y altura de fustes para 50 individuos de la “Parcela Génova Ladera - 2”

<i>Número</i>	<i>DAP (cm)</i>	<i>Altura de fuste (m)</i>	<i>Número</i>	<i>DAP (cm)</i>	<i>Altura de fuste (m)</i>
1	18,75	13,8	26	28	15,75
2	21,875	19,5	27	25,375	14,7
3	29,75	14,7	28	14,875	14
4	29,75	17	29	14,375	8
5	24	21,5	30	28	13,6
6	35,875	16,6	31	20	11
7	38	19,35	32	20,25	12,6
8	33,375	15	33	26,25	10,75
9	30,75	17,3	34	28,5	5,25
10	15,5	14,4	35	27,5	18
11	18	14	36	27	14
12	24,25	15,2	37	21	18,4
13	22	14	38	24,875	8
14	29	15,2	39	21,25	7,75
15	13,75	11	40	10	6
16	22,5	8,1	41	18,75	6
17	41,625	18	42	15	19,5
18	19	13,65	43	30	19,5
19	40	9,5	44	20	9
20	27	7,5	45	28	17,6
21	35	5,8	46	42,5	21,5
22	20,5	9	47	47,5	17
23	40	15,5	48	30	13,2
24	28,25	8	49	55	17,5
25	49,5	14,4	50	21	13,3

Con respecto a los diámetros de copa, el valor mínimo fue de 10 cm y el valor máximo de 55 cm, un promedio de 27,06 cm y una desviación estándar de 9,668. Para la altura del fuste, el valor mínimo fue de 5,25 m y el valor máximo de 21,5 m, un promedio de 13,598 m y una desviación estándar de 4,391.

2. FASE DE GABINETE

2.1. SELECCIÓN DEL ORTOMOSAICO

Con los diferentes vuelos realizados sobre el área evaluada, se generó un ortomosaico para cada altura. En la Tabla 16, se presentan los resultados para cada ortomosaico.

Tabla 16: Resultados de los ortomosaicos generados.

<i>Ortomosaico</i>	<i>Observación</i>
A 60 metros	Distorsión presente en el área de evaluación.
A 70 metros	Distorsión presente en el área de evaluación.
A 80 metros	Distorsión presente en el área de evaluación.
A 90 metros	Distorsión presente en el área de evaluación.
A 100 metros	Ortomosaico libre de distorsión en el área de evaluación.
A 150 metros	Poco detalle de las copas en el ortomosaico.

Cada ortomosaico fue obtenido en el software Pix4D Desktop, la distorsión de los mosaicos se debió a la implicancia de sobrevolar sobre vegetación debido a que se generaron puntos homólogos en las fotografías aéreas que se repetían o se interpretaban como otros puntos al momento de la generación de la nube de puntos, además de estos puntos, la influencia del viento jugó un papel importante, debido a que generó movimiento de las hojas lo que resultó en zonas ondeadas en el ortomosaico. Sumado a este criterio, también se verificó la claridad de las copas de los 50 árboles seleccionados.

A grandes alturas, como fue el caso del ortomosaico a 150 metros, se perdió el detalle en las copas, y para esta investigación en particular, las alturas menores a 100 metros resultaron con distorsión en diferentes partes del ortomosaico. En los Anexos 7-11, se pueden observar los ortomosaicos descartados para la presente investigación. La Figura 22, se presenta el ortomosaico de 100 metros seleccionados, generado a partir de 230 fotografías aéreas.



Figura 22: Ortomosaico a 100 metros de altura del área de estudio.

2.2. DISTANCIA DE MUESTREO EN EL TERRENO

En el ortomosaico seleccionado a 100 metros de altura, se tiene una distancia focal de 3,61 mm, un ancho del sensor de 6,3178 mm, un ancho de la imagen de 4000 píxeles y un alto de la imagen de 3000 píxeles, con estos datos se obtuvo una distancia de muestreo en el terreno de 4,73 cm/píxel.

2.3. DELIMITACIÓN DE LA COPA DEL ÁRBOL

Este procedimiento de delimitación se realizó para los 50 árboles seleccionados, con una escala de trabajo varío desde 1:100 hasta 1:40, dependiendo del individuo evaluado. La Figura 23, muestra un ejemplo de la copa delimitada para el árbol N° 30.



Figura 23: Copa delimitada para un árbol.

La Tabla 17 contiene las áreas obtenidas en el software ArcGis 10.5 y los diámetros obtenidos mediante la fórmula señalada por Ugalde (1981).

Tabla 17: Áreas y diámetros de copas.

<i>Árbol</i>	<i>Área de copa medida en el ortomosaico</i>	<i>Diámetro de copa del ortomosaico</i>	<i>Árbol</i>	<i>Área de copa medida en el ortomosaico</i>	<i>Diámetro medido en el ortomosaico</i>
1	16,134	4,532	26	45,077	7,576
2	69,215	9,388	27	9,643	3,504
3	68,891	9,366	28	20,504	5,109
4	13,002	4,069	29	11,344	3,800
5	40,457	7,177	30	20,062	5,054
6	49,536	7,942	31	26,258	5,782
7	44,093	7,493	32	21,923	5,283
8	39,831	7,121	33	24,035	5,532
9	61,726	8,865	34	16,161	4,536
10	16,466	4,579	35	28,297	6,002
11	38,034	6,959	36	17,264	4,688
12	35,065	6,682	37	8,562	3,302
13	19,386	4,968	38	12,413	3,975
14	12,789	4,035	39	8,467	3,283
15	6,563	2,891	40	6,775	2,937
16	31,049	6,287	41	11,361	3,803
17	53,894	8,284	42	30,639	6,246
18	13,890	4,205	43	18,625	4,870
19	29,102	6,087	44	19,097	4,931
20	10,167	3,598	45	37,990	6,955
21	25,839	5,736	46	50,985	8,057
22	15,157	4,393	47	128,112	12,772
23	49,830	7,965	48	19,410	4,971
24	13,580	4,158	49	175,807	14,961
25	200,494	15,977	50	28,084	5,980

La Tabla 18 presenta los parámetros estadísticos básicos del diámetro de copa. Observando que en promedio se tiene 6,133 m, un valor máximo de 15,977 m, un valor mínimo de 2,981 m, una desviación estándar de 2,763 y un CV de 45,05%, lo cual indica una baja variabilidad.

Tabla 18: Parámetros estadísticos para el diámetro de copa.

<i>Parámetro</i>	<i>Resultado</i>
Promedio	6,133 metros
Máximo	15,977 metros
Mínimo	2,981 metros
Desviación estándar	2,763
Coficiente de variabilidad (%)	45,05%

2.4. SISTEMATIZACIÓN DE LOS DATOS

La sistematización de los 50 árboles evaluados puede observarse en el Anexo 12. A manera de ejemplo, se presenta en la Tabla 19 el orden realizado para el árbol N° 1.

Tabla 19: Ejemplo de la sistematización de los datos de campo.

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radios de copa (m)			
				N	S	O	E
1	0	21,25	21,25	2	2,6	2	2,2
	1,3	20	17,5				
	2	17,5	17,5				
	4	15	15				
	6	12,5	12,5				
	8	12,5	10				
	10	10	10				
	12	7,5	7,5				
	13,8						

La medición del diámetro a la altura del pecho (DAP) permitió generar un histograma de la distribución diamétrica de la muestra evaluada que se puede observar en la Figura 24. Esta distribución diamétrica se realizó con clases diamétricas de intervalos de 5 centímetros. Las clases diamétricas varían desde los 10 cm hasta los 55 cm, observándose una distribución normal de los datos debido a que en la muestra se encuentran individuos dominantes y codominantes, los cuales en su mayoría se encuentran en las clases de <20 y 25> y <35 y 30>. Se observa además que en clases diamétricas superiores se encuentra un número reducido de individuos, esto se explica al ser el área evaluado un bosque secundario joven, sin muchos individuos en toda su extensión de grandes diámetros.

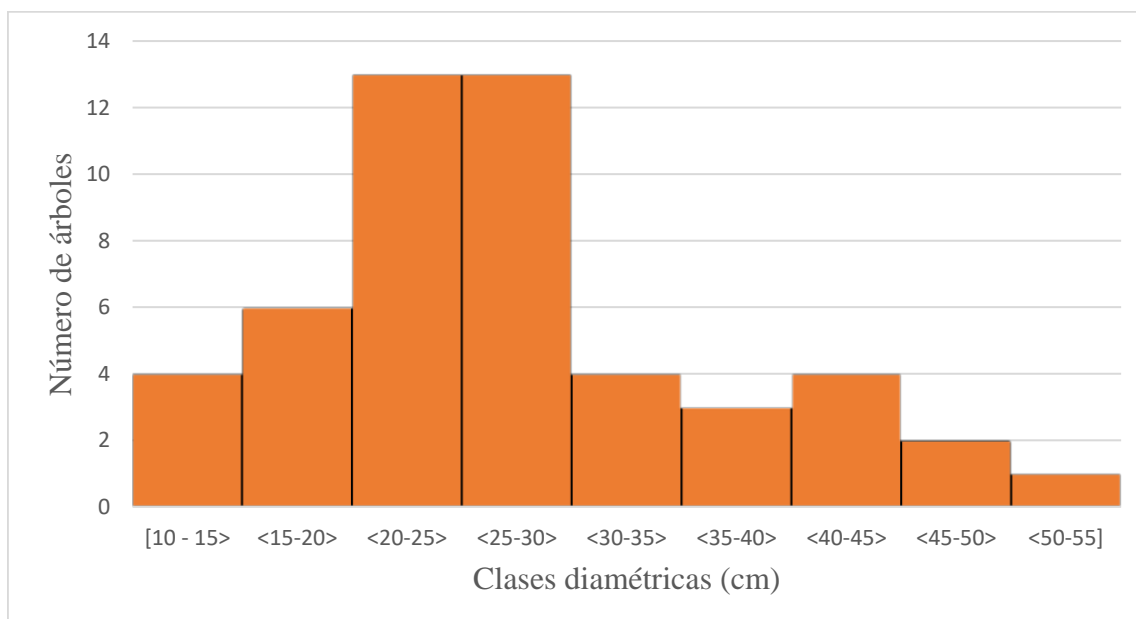


Figura 24: Distribución de los árboles por clase diamétrica.

FUENTE: Elaboración Propia.

2.5. COMPARACIÓN DE LOS DIÁMETROS DE COPA

La Tabla 20 muestra los resultados de la prueba de hipótesis de dos colas.

Tabla 20: Resultados de una prueba de hipótesis de dos colas.

	<i>Promedio del diámetro medido en campo</i>	<i>Promedio del diámetro obtenido del ortomosaico</i>
Media	6,1657	6,133379755
Varianza (conocida)	7,576	7,634
Observaciones	50	50
Diferencia hipotética de las medias	0	
z	0,0586	
Valor crítico de z (dos colas)	1,959963985	

En esta prueba estadística, se obtuvo un valor Z de 0,0586 para los 50 árboles evaluados; valor que se encuentra dentro de la “Zona de Aceptación” tal como se observa en la Figura 25, razón por la cual se aceptó la hipótesis nula planteada. Con este resultado, se corroboró la coherencia y confiabilidad estadística entre los diámetros de copa medidos en el terreno y los diámetros de copa obtenidos mediante fórmula en el ortomosaico, para la elaboración de las ecuaciones de volumen.

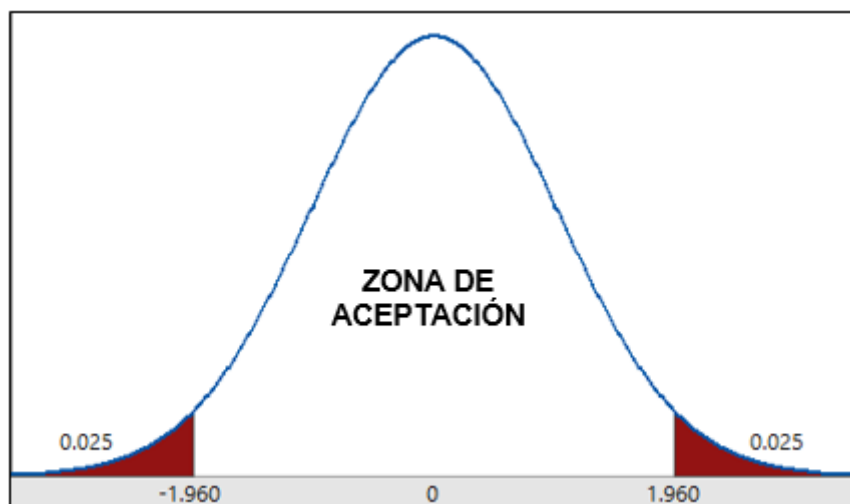


Figura 25: Gráfica de la distribución Z en la prueba de hipótesis.

FUENTE: Elaboración Propia.

2.6. CÁLCULO DE VOLÚMENES INDIVIDUALES DE FUSTES

Los volúmenes individuales de cada uno de los árboles evaluados fueron resultado de la suma del volumen de las secciones calculadas con la fórmula de Smalian. Se obtuvo un valor total de 35,287 m³ para los 50 árboles, teniendo un volumen promedio de 0,706 m³. Respecto al rango de datos, el menor volumen que se presenta en la muestra es de 0,032 m³ y el mayor valor es de 3,221 m³, se tiene una desviación estándar de 0,637 y un coeficiente de variabilidad de 90,23%, lo cual indica una alta variabilidad en los datos.

En la Tabla 21, se presenta el resultado para cada uno de los árboles evaluados.

Tabla 21: Volumen de fustes (m³) de árboles individuales

<i>N° árbol</i>	<i>Volumen del fuste (m³)</i>	<i>N° árbol</i>	<i>Volumen del fuste (m³)</i>
1	0,189	26	0,659
2	0,635	27	0,703
3	0,910	28	0,184
4	0,958	29	0,104
5	0,674	30	0,649
6	1,157	31	0,295
7	1,309	32	0,379
8	0,902	33	0,444
9	0,841	34	0,258
10	0,216	35	0,484
11	0,271	36	0,693
12	0,420	37	0,375
13	0,498	38	0,403
14	0,643	39	0,295
15	0,140	40	0,032
16	0,278	41	0,136
17	1,571	42	0,354
18	0,383	43	1,195
19	0,737	44	0,183
20	0,418	45	0,812
21	0,526	46	2,300
22	0,363	47	2,196
23	1,577	48	0,579
24	0,467	49	3,221
25	1,967	50	0,304

2.7. ANÁLISIS DE VARIABLES

Las Figuras 26, 27, 28 y 29, muestran los gráficos de dispersión generados para el presente análisis.

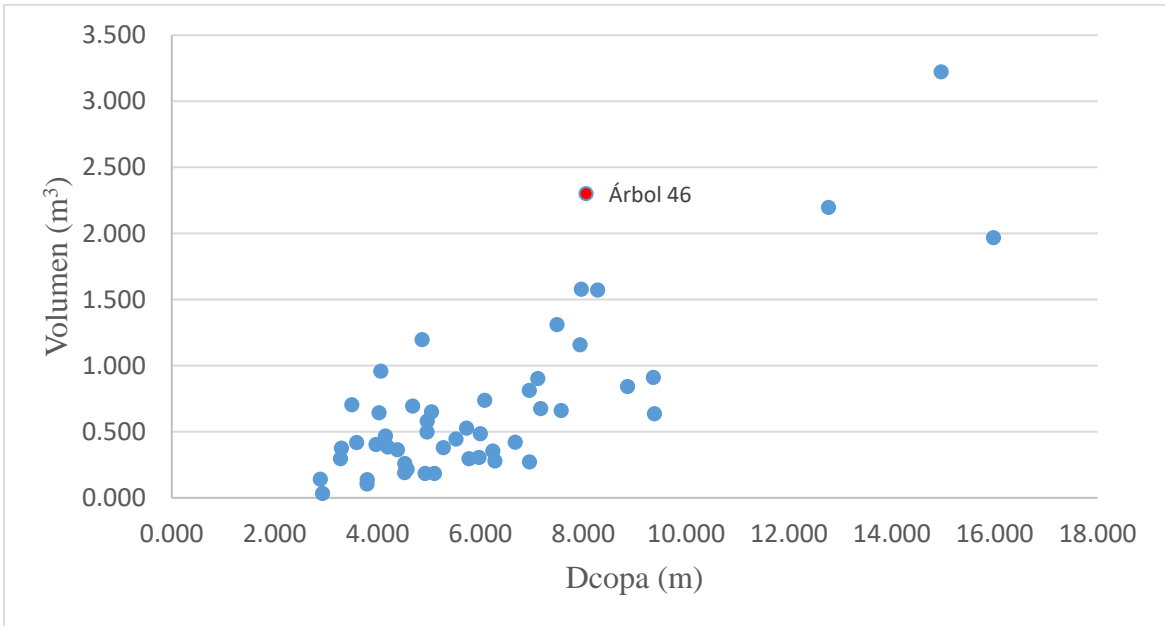


Figura 26: Relación del volumen (m³) con el diámetro de copa (m)

FUENTE: Elaboración Propia.

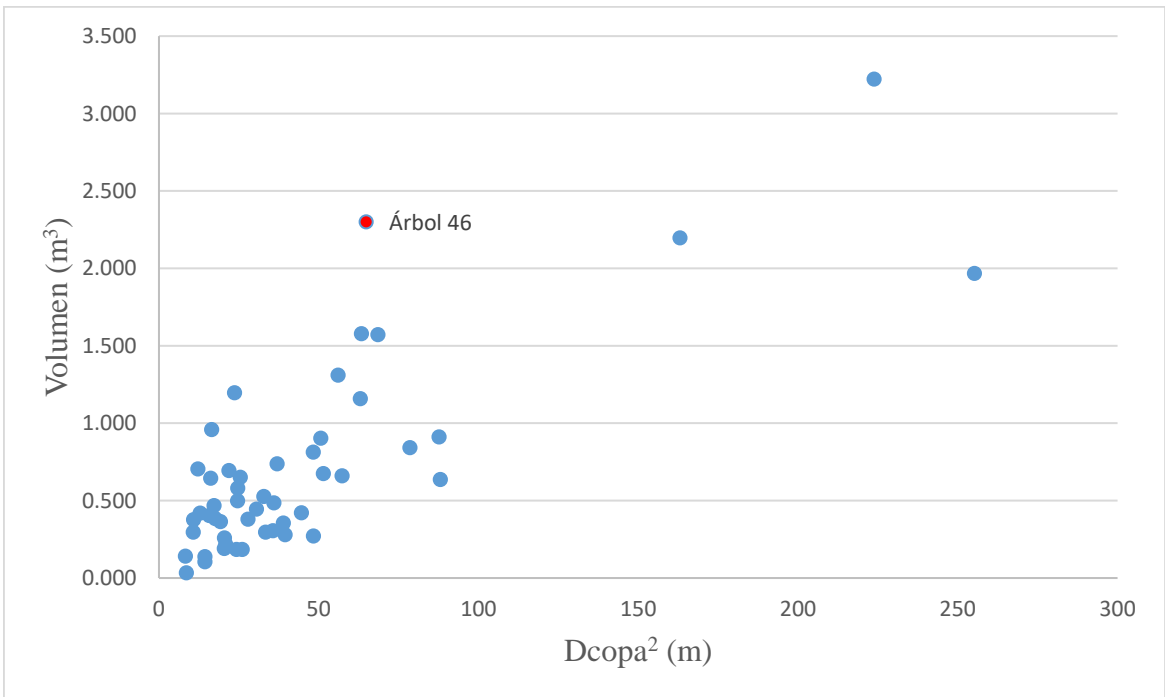


Figura 27: Relación del volumen (m³) con el diámetro de copa al cuadrado (m).

FUENTE: Elaboración Propia.

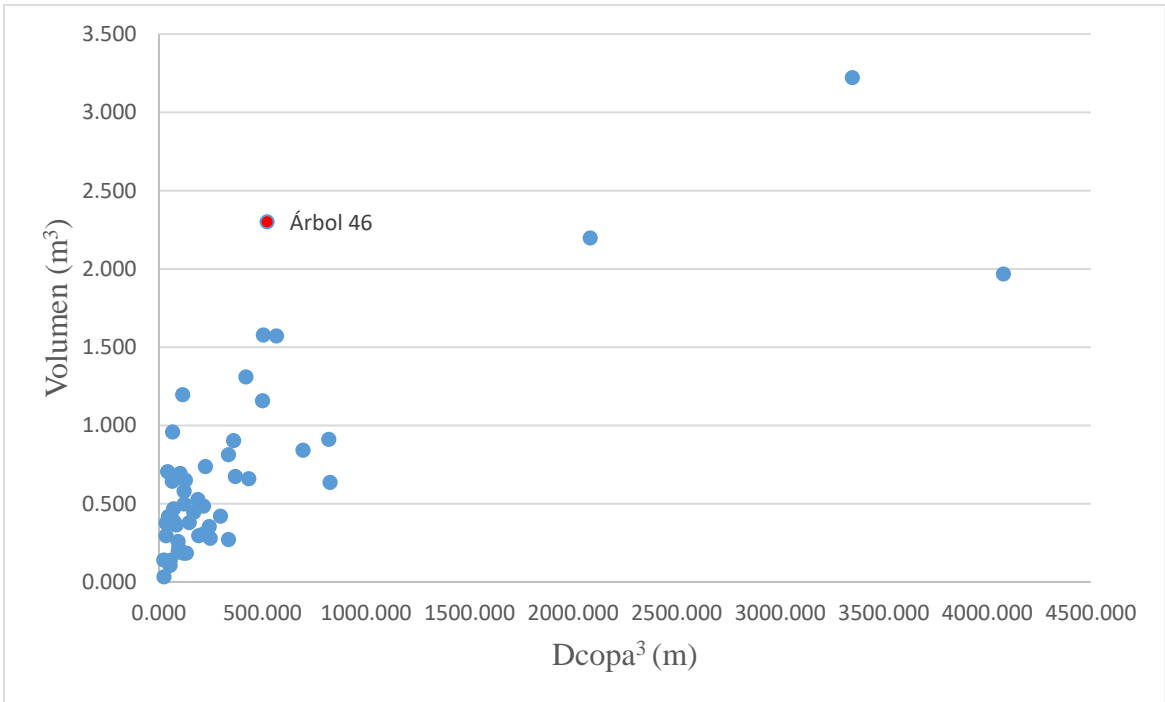


Figura 28: Relación del volumen (m³) con el diámetro de copa al cubo (m).

FUENTE: Elaboración Propia.

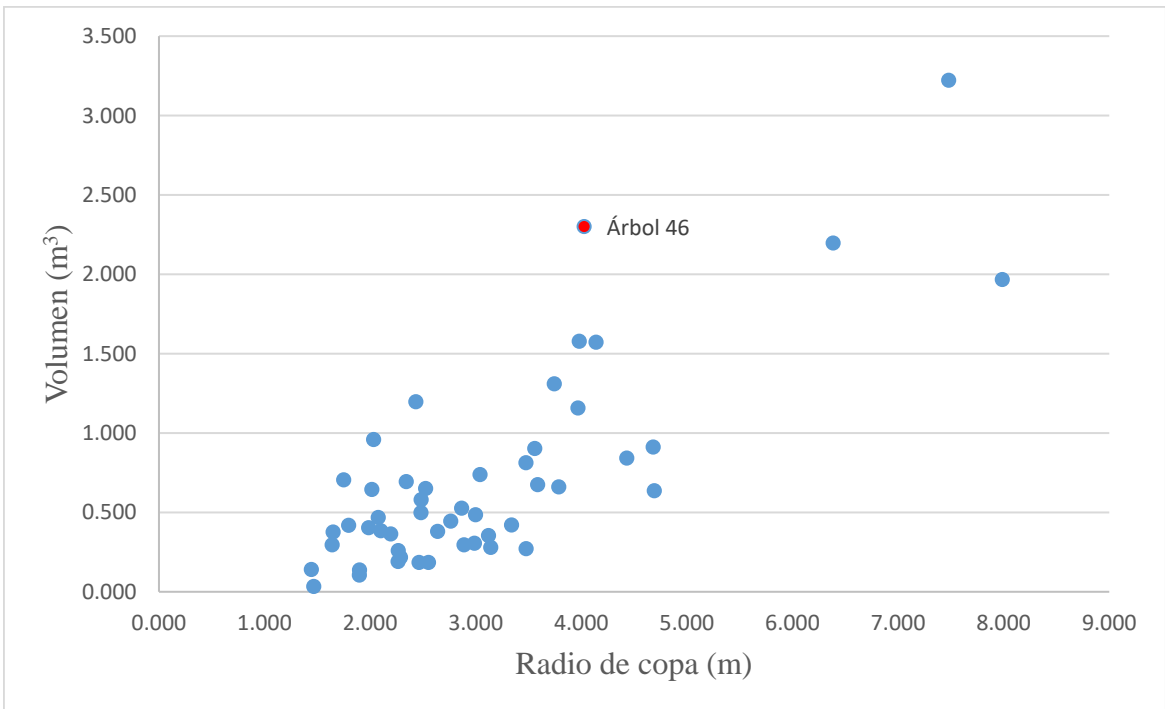


Figura 29: Relación del volumen (m³) con el radio de copa (m).

FUENTE: Elaboración Propia.

En las figuras mostradas, se ha resaltado de color rojo el árbol 46 debido a que fue eliminado para la formulación de las ecuaciones de volumen al ser considerado un outlier. Este árbol presentó un volumen de fuste $2,3 \text{ m}^3$, un diámetro a la altura de pecho promedio de 42,5 cm y una altura de fuste de 21,5 m. Este individuo se encontró en la clase diamétrica de <40 a 45> cm, en donde el volumen promedio es de $1,295 \text{ m}^3$, diámetro a la altura de pecho promedio de 1,295 cm. Se infiere entonces, que la altura de este individuo generó un volumen por encima del promedio, ocasionando su ubicación fuera de la tendencia de los datos.

3. ECUACIONES DE VOLUMEN

3.1. ANÁLISIS DE REGRESIÓN BASADO EN EL MÉTODO DE LOS MÍNIMOS CUADRADOS

Para este análisis se utilizaron 40 datos de los 50 datos obtenidos en la fase de campo, debido a que 9 árboles fueron aislados de la data de análisis para ser utilizados en una posterior validación de la ecuación seleccionada y 1 árbol fue eliminado por considerarse “outlier”.

Los resultados de este análisis se presentan en 3 tablas por ecuación, las cuales pueden observarse en los Anexos 13 al 19, A modo de ejemplo, se muestra a continuación en las Tablas 22, 23 y 24, el resultado para el modelo 1: $V = b_0 + b_1 d_{copa}$.

Tabla 22: Ejemplo del análisis de regresión para el Modelo 1.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>	0,84386065
<i>Coefficiente de determinación R^2</i>	0,7121008
<i>R^2 ajustado</i>	0,70452451
<i>Error típico</i>	0,31215718
<i>Observaciones</i>	40

Tabla 23: Ejemplo del análisis de regresión para el Modelo 1.

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<i>Regresión</i>	1	9,15864589	9,15864589	93,990643	8,0205E-12
<i>Residuos</i>	38	3,7027999	0,0974421		
<i>Total</i>	39	12,8614458			

Tabla 24: Ejemplo del análisis de regresión para el Modelo 1.

	Valores	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	-0,398627626	0,12812332	-3,111280774	0,00352682	-0,65799973	-0,13925552
Variable X 1	0,167475707	0,01922265	8,712416754	1,36E-10	0,12856149	0,20638992

El valor del intercepto y el coeficiente obtenidos en la tabla 24, se utilizaron para obtener la siguiente ecuación: $V = -0,398627626 + 0,167475707dcopa$.

Luego de realizar este análisis, se procedió a analizar los criterios estadísticos de selección de cada ecuación mencionados en la metodología, obteniendo el siguiente resultado:

a) Coeficiente de determinación (R^2)

En la Tabla 25 se muestran los resultados para las 7 ecuaciones:

Tabla 25: Ecuaciones y su coeficiente de determinación.

Modelo	Ecuación	R^2	Clasificación
1	$V = -0,398627626 + 0,167475707dcopa$	0,666	Aceptado
2	$V = 0,18808074 + 0,00965791dcopa^2$	0,712	Aceptado
3	$V = 0,37899804 + 0,00059226dcopa^3$	0,683649515	Aceptado
4	$V = -0,39862763 + 0,33495141dcopa/2$	0,666392189	Aceptado
5	$V = 0,20041214 - 0,00336491dcopa + 0,00983973dcopa^2$	0,712117445	Aceptado
6	$V = 1,09939442 - 0,41283139dcopa + 0,06388562dcopa^2 - 0,00203071dcopa^3$	0,723708382	Aceptado
7	$V = -1,49456182 + 0,8759332dcopa^{1/2}$	0,604179269	Rechazado

De las 7 ecuaciones que se han analizado, la ecuación N°7 es la única que fue rechazada para este criterio, debido a que cuenta con un valor de R^2 inferior (0,604) al establecido como valor aceptado. Este coeficiente fue probablemente menor debido a que presenta como única variable independiente a la raíz cuadrada del diámetro de copa. Los 6 modelos restantes, presentan un buen ajuste, con valores de R^2 , mayores a 0,65, observando que a medida que se incrementan las variables independientes, el valor de R^2 aumenta, tal como lo menciona Barrena, *et al*, (1986), sin embargo; el hecho de que se aumente este valor no da por conclusión que sea la mejor ecuación que estime correctamente el volumen de los fustes.

b) Prueba estadística Fisher (F)

En la Tabla 26, se muestran los resultados para las 6 ecuaciones:

Tabla 26: Ecuaciones y su valor Fisher.

<i>Modelo</i>	<i>Ecuación</i>	<i>Prueba F</i>		<i>Clasificación</i>
		<i>F</i>	<i>P - valor</i>	
1	$V = -0,398627626 + 0,167475707dcopa$	75,9062057	1,35998E-10	Aceptado
2	$V = 0,18808074 + 0,00965791dcopa^2$	93,99064296	8,02047E-12	Aceptado
3	$V = 0,37899804 + 0,00059226dcopa^3$	82,11993598	4,89872E-11	Aceptado
4	$V = -0,39862763 + 0,33495141dcopa/2$	75,9062057	1,35998E-10	Aceptado
5	$V = 0,20041214 - 0,00336491dcopa + 0,00983973dcopa^2$	45,76231702	9,89655E-11	Aceptado
6	$V = 1,09939442 - 0,41283139dcopa + 0,06388562dcopa^2 - 0,00203071copa^3$	31,43237075	3,69553E-10	Aceptado

Al analizar este criterio, no se rechazó ninguna ecuación, debido a que las 6 ecuaciones presentan un p – valor menor a 0,05 en todos los casos, lo cual demuestra suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula planteada (H₀) y aceptar la hipótesis alterna (H₁), que tiene como premisa la existencia de una relación lineal entre la variable dependiente y la variable independiente.

c) Prueba estadísticas t – student (t)

En la Tabla 27, se muestran los resultados para las 6 ecuaciones:

Tabla 27: Ecuaciones y su valor t – student.

<i>Modelo</i>	<i>Ecuación</i>	<i>P – valor (t – student)</i>		<i>Clasificación</i>
		<i>b₀</i>	<i>b₁</i>	
1	$V = -0,398627626 + 0,167475707dcopa$	1,35998E-10		Aceptado
2	$V = 0,18808074 + 0,00965791dcopa^2$	8,02047E-12		Aceptado
3	$V = 0,37899804 + 0,00059226dcopa^3$	4,89872E-11		Aceptado
4	$V = -0,39862763 + 0,33495141dcopa/2$	1,35998E-10		Aceptado
5	$V = 0,20041214 - 0,00336491dcopa + 0,00983973dcopa^2$	0,963361836	0,020345523	Rechazado
6	$V = 1,09939442 - 0,41283139dcopa + 0,06388562dcopa^2 - 0,00203071copa^3$	0,233832243	0,156658949	Rechazado

En esta prueba estadística, los coeficientes del modelo de cada ecuación han sido analizados con respecto al nivel de significancia de 0,05. De las 6 ecuaciones anteriormente aceptadas, se han rechazado los modelos N° 5 y N° 6 debido a que uno de los coeficientes o ambos son mayores al valor de 0,05, lo que se traduce en que uno de los coeficientes encontrados al azar es estadísticamente igual a cero; quedando solo 4 ecuaciones para realizar su respectivo análisis de residuales.

d) Análisis de residuales

Este análisis se realizó para comprobar la existencia de homocedasticidad de los datos estimados. En las Figuras 35, 36, 37 y 38, se observa que no existe una homogeneidad de los residuales o variancias de los errores en función de su respectivo volumen estimado para ninguno de los 4 modelos de ecuaciones. En estos casos de heterogeneidad, Barrena (1988), recomienda realizar una ponderación de ecuaciones para obtener una mejor estimación de los coeficientes.

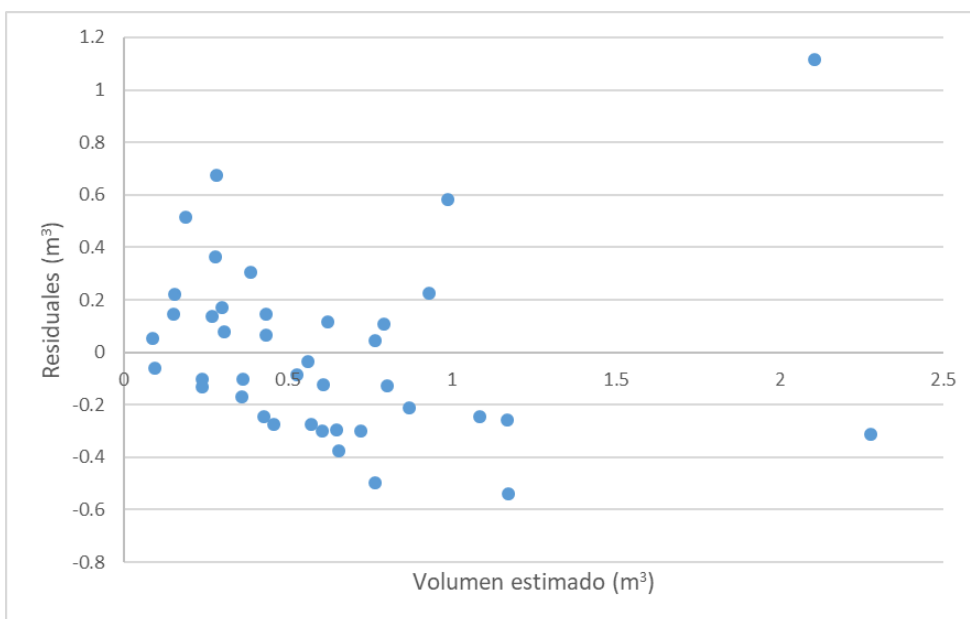


Figura 30: Análisis de residuales de la ecuación 1.

FUENTE: Elaboración Propia.

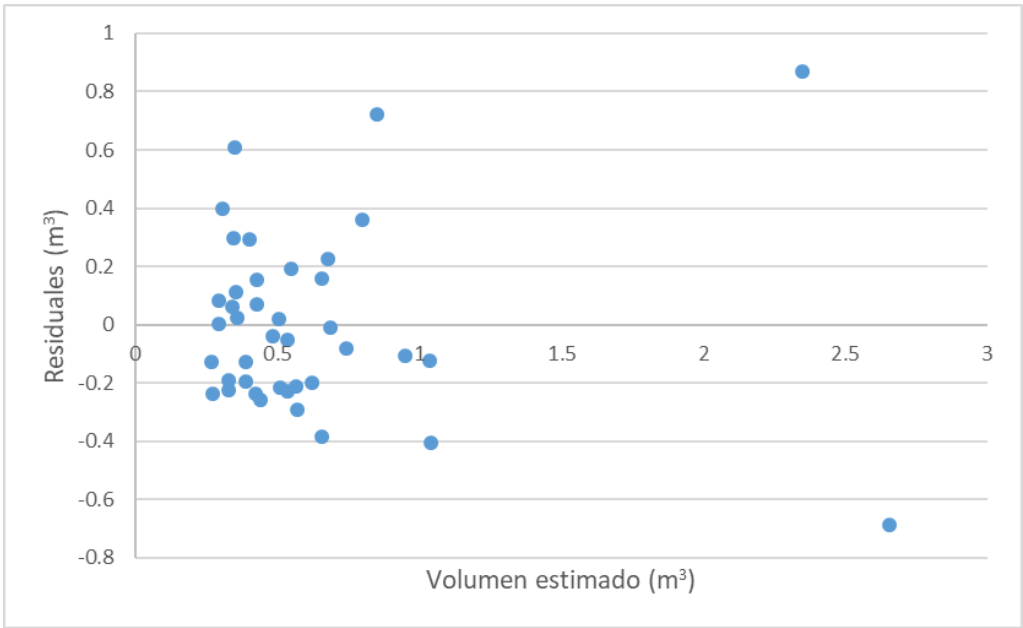


Figura 31: Análisis de residuales de la ecuación 2.

FUENTE: Elaboración Propia.

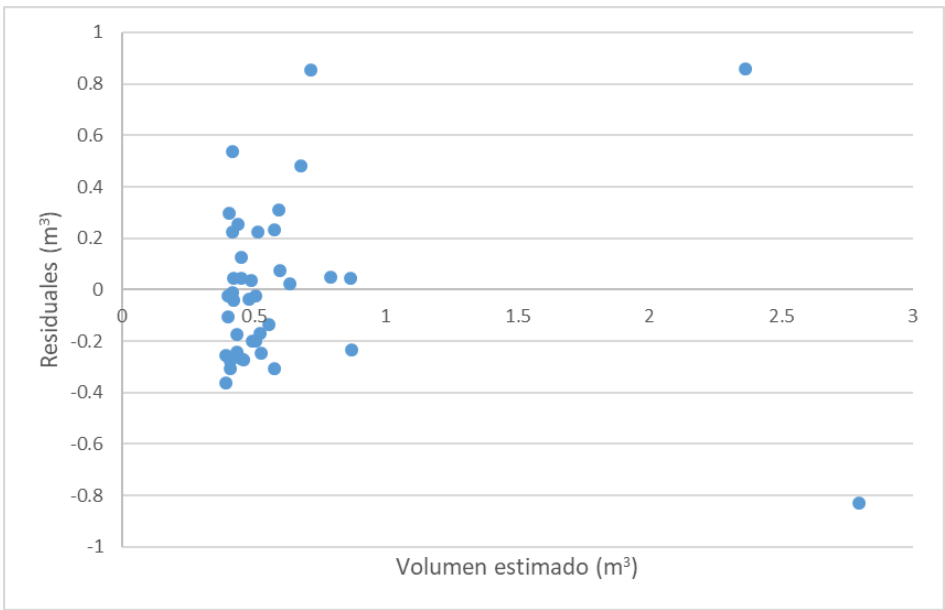


Figura 32: Análisis de residuales de la ecuación 3.

FUENTE: Elaboración Propia.

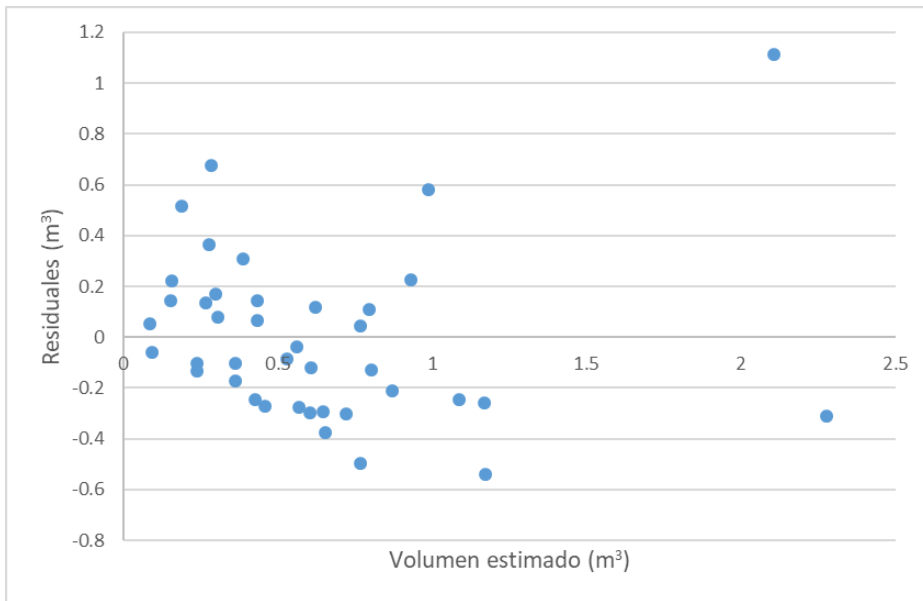


Figura 33: Análisis de residuales de la ecuación 4.

FUENTE: Elaboración Propia.

Tal como lo mencionó Orellana (2008), se debe presentar una distribución aproximadamente normal, debido a que las observaciones provienen de distribuciones normales todas con la misma varianza. Sin embargo, en los resultados presentados no se presenta esta tendencia, lo cual Montgomery, *et al*, (2006), indica que existen con frecuencia tipos de inadecuaciones del modelo. La relación de heterocedasticidad o “forma de embudo” se presenta para los modelos 1 y 4, que son los modelos sin exponenciales, ya que el modelo 1 sólo utiliza el diámetro de copa y el modelo 4 solo utiliza al radio de copa. Los modelos 2 y 3, presentan una relación no lineal, lo cual según Romero (2017) menciona que esto puede indicar que se necesiten más variables independientes en los modelos.

3.2. ANÁLISIS DE REGRESIÓN PONDERADA

Se utilizaron 8 factores de ponderación para los 4 modelos de ecuaciones seleccionados anteriormente, Los factores de ponderación utilizados fueron:

$$\frac{1}{dcopa}; \frac{1}{dcopa^{1,1}}; \frac{1}{dcopa^{1,2}}; \frac{1}{dcopa^{1,3}}; \frac{1}{dcopa^{1,4}}; \frac{1}{dcopa^{1,5}}; \frac{1}{dcopa^{1,6}}; \frac{1}{dcopa^2}$$

Estos factores de ponderación generaron 28 ecuaciones nuevas ponderadas que se pueden observar en la Tabla 28. Con las nuevas ecuaciones, se procedió a realizar un análisis de regresión basado en el método de los mínimos cuadrados para seleccionar aquellas que cumplieran con las premisas del análisis.

Tabla 28: Ecuaciones ponderadas.

<i>Modelo</i>	<i>Ecuación</i>	<i>Modelo</i>	<i>Ecuación</i>
1	$\frac{V}{dcopa} = \frac{bo}{dcopa} + b1$	15	$\frac{V}{dcopa} = \frac{bo}{dcopa} + b1dcopa^2$
2	$\frac{V}{dcopa^{1,3}} = \frac{bo}{dcopa^{1,3}} + b1dcopa^{-0,3}$	16	$\frac{V}{dcopa^{1,1}} = \frac{bo}{dcopa^{1,1}} + b1dcopa^{1,9}$
3	$\frac{V}{dcopa^{1,4}} = \frac{bo}{dcopa^{1,4}} + b1dcopa^{-0,4}$	17	$\frac{V}{dcopa^{1,2}} = \frac{bo}{dcopa^{1,2}} + b1dcopa^{1,8}$
4	$\frac{V}{dcopa^{1,5}} = \frac{bo}{dcopa^{1,5}} + b1dcopa^{-0,5}$	18	$\frac{V}{dcopa^{1,3}} = \frac{bo}{dcopa^{1,3}} + b1dcopa^{1,7}$
5	$\frac{V}{dcopa^{1,6}} = \frac{bo}{dcopa^{1,6}} + b1dcopa^{-0,6}$	19	$\frac{V}{dcopa^{1,4}} = \frac{bo}{dcopa^{1,4}} + b1dcopa^{1,6}$
6	$\frac{V}{dcopa^2} = \frac{bo}{dcopa^2} + b1dcopa^{-1}$	20	$\frac{V}{dcopa^{1,5}} = \frac{bo}{dcopa^{1,5}} + b1dcopa^{1,5}$
7	$\frac{V}{dcopa} = \frac{bo}{dcopa} + b1dcopa$	21	$\frac{V}{dcopa^{1,6}} = \frac{bo}{dcopa^{1,6}} + b1dcopa^{1,4}$
8	$\frac{V}{dcopa^{1,1}} = \frac{bo}{dcopa^{1,1}} + b1dcopa^{0,9}$	22	$\frac{V}{dcopa^2} = \frac{bo}{dcopa^2} + b1dcopa$
9	$\frac{V}{dcopa^{1,2}} = \frac{bo}{dcopa^{1,2}} + b1dcopa^{0,8}$	23	$\frac{V}{dcopa} = \frac{bo}{dcopa} + b1/2$
10	$\frac{V}{dcopa^{1,3}} = \frac{bo}{dcopa^{1,3}} + b1dcopa^{0,7}$	24	$\frac{V}{dcopa^{1,3}} = \frac{bo}{dcopa^{1,3}} + b1dcopa^{-0,3}/2$
11	$\frac{V}{dcopa^{1,4}} = \frac{bo}{dcopa^{1,4}} + b1dcopa^{0,6}$	25	$\frac{V}{dcopa^{1,4}} = \frac{bo}{dcopa^{1,4}} + b1dcopa^{-0,4}/2$
12	$\frac{V}{dcopa^{1,5}} = \frac{bo}{dcopa^{1,5}} + b1dcopa^{0,5}$	26	$\frac{V}{dcopa^{1,5}} = \frac{bo}{dcopa^{1,5}} + b1dcopa^{-0,5}/2$
13	$\frac{V}{dcopa^{1,6}} = \frac{bo}{dcopa^{1,6}} + b1dcopa^{0,4}$	27	$\frac{V}{dcopa^{1,6}} = \frac{bo}{dcopa^{1,6}} + b1dcopa^{-0,6}/2$
14	$\frac{V}{dcopa^2} = \frac{bo}{dcopa^2} + b1$	28	$\frac{V}{dcopa^2} = \frac{bo}{dcopa^2} + b1dcopa^{-1}/2$

En la Tabla 29, se presentan los resultados del análisis de regresión aplicado a las ecuaciones y su clasificación. Los resultados completos pueden observarse en los Anexos 20-35.

Tabla 29: Resumen del análisis de regresión.

	R^2	<i>Prueba F</i>		<i>P – valor (t - Student)</i>		<i>Clasificación</i>
		<i>F</i>	<i>p – valor</i>	<i>b0</i>	<i>b1</i>	
1	0,035669817	1,405590182	0,243150802	0,243150802		RECHAZADA
2	0,757915104	59,48486349	2,75731E-12	0,369310941	0,000116872	RECHAZADA
3	0,752482686	57,76230675	4,16815E-12	0,395340333	0,000193026	RECHAZADA
4	0,747176298	56,15118183	6,18726E-12	0,411158249	0,000295009	RECHAZADA
5	0,74200208	54,64400466	9,0234E-12	0,416754806	0,000419958	RECHAZADA
6	0,722974341	49,58570466	3,39736E-11	0,355402843	0,000963303	RECHAZADA
7	0,788686237	70,91368901	2,19636E-13	0,002240786	4,51583E-06	APROBADA
8	0,780002898	67,3647741	4,64621E-13	0,002452921	1,28715E-05	APROBADA
9	0,771484507	64,14534706	9,42186E-13	0,002783792	3,29165E-05	APROBADA
10	0,763176305	61,22845841	1,8316E-12	0,003266905	7,55195E-05	APROBADA
11	0,75511344	58,58694482	3,41611E-12	0,003952775	0,00015596	APROBADA
12	0,747322829	56,19476307	6,12081E-12	0,00491512	0,000291603	APROBADA
13	0,739825096	54,02779683	1,05522E-11	0,006259612	0,000497269	APROBADA
14	0,135438182	5,952901004	0,019469631	0,019469631		APROBADA
15	0,775406767	65,59738416	6,82655E-13	2,32737E-08	1,49492E-05	APROBADA
16	0,766494614	62,36857275	1,40848E-12	2,98497E-08	4,17031E-05	APROBADA
17	0,757692118	59,41263695	2,80499E-12	4,0461E-08	0,000105171	APROBADA
18	0,749048105	56,71172155	5,38759E-12	5,76293E-08	0,000239549	APROBADA
19	0,740602243	54,24658545	9,9803E-12	8,5763E-08	0,000493996	APROBADA
20	0,732386055	51,99779503	1,78414E-11	1,32625E-07	0,000926926	APROBADA
21	0,724424231	49,94655531	3,08086E-11	2,11999E-07	0,001593094	APROBADA
22	0,695448819	43,3868867	1,98656E-10	1,75081E-06	0,006735302	APROBADA
23	0,775064993	65,46884385	7,02248E-13	0,243150802	1,54036E-05	RECHAZADA
24	0,757915104	59,48486349	2,75731E-12	0,369310941	0,000116872	RECHAZADA
25	0,752482686	57,76230675	4,16815E-12	0,395340333	0,000193026	RECHAZADA
26	0,747176298	56,15118183	6,18726E-12	0,411158249	0,000295009	RECHAZADA
27	0,74200208	54,64400466	9,0234E-12	0,416754806	0,000419958	RECHAZADA
28	0,722974341	49,58570466	3,39736E-11	0,355402843	0,000963303	RECHAZADA

El modelo 1, fue rechazado por un valor R^2 bajo de 0,036. Los modelos 2, 3, 4, 5, 6, 23, 24, 25, 26, 27 y 28 fueron rechazados por el valor de uno de los coeficientes para la prueba t – student, mayor a 0,05. Los modelos seleccionados fueron: 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 y 22.

Las ecuaciones aprobadas, cuentan con un R^2 mayor a 0,69, siendo los mayores valores para los modelos 7 (, 8, 15, 9, 16 y 10, teniendo la ecuación 7 el valor de 0,788686237. Todos los valores de R^2 , son mayor a los encontrados en las ecuaciones sin ponderar, por lo que estas ecuaciones ponderadas tienen un mayor ajuste. Para las pruebas Fisher (F) y t – student (t), los valores encontrados de p – valor y coeficientes de la ecuación respectivamente, son menores al nivel de significancia de 0,05, por lo que se rechazan las hipótesis nulas de cada prueba.

3.2.1. ANÁLISIS DE RESIDUALES

Para seleccionar la mejor ecuación de los 16 modelos aprobados, se procedió a realizar el análisis de residuales para comprobar la homocedasticidad. En las siguientes figuras, se observan las gráficas residuales para cada modelo.

7	$\frac{V}{dcopa} = \frac{bo}{dcopa} + b1dcopa$
----------	--

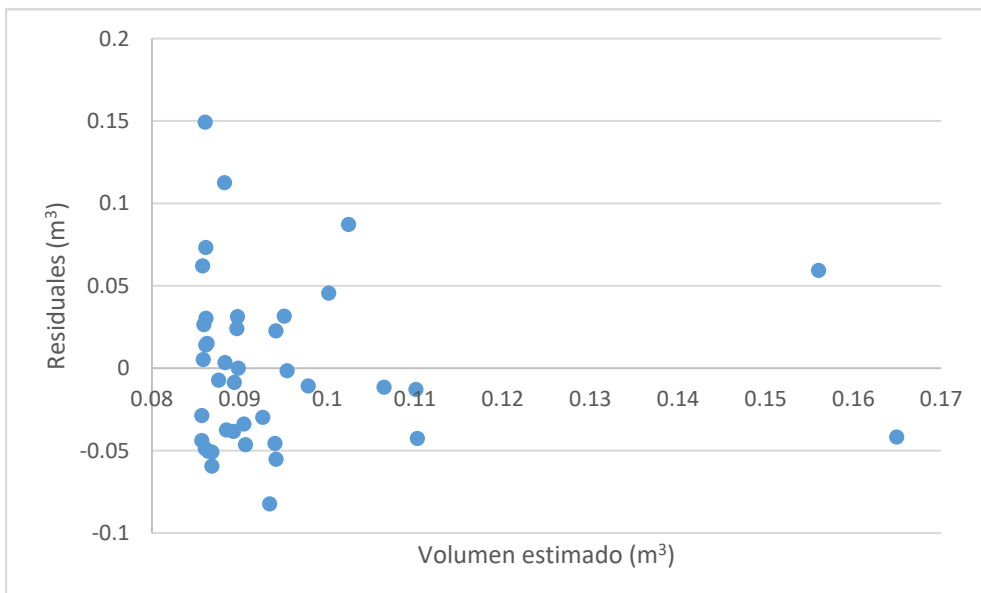


Figura 34: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 7.

Fuente: Elaboración Propia.

8	$\frac{V}{dcopa^{1,1}} = \frac{bo}{dcopa^{1,1}} + b1dcopa^{0,9}$
----------	--

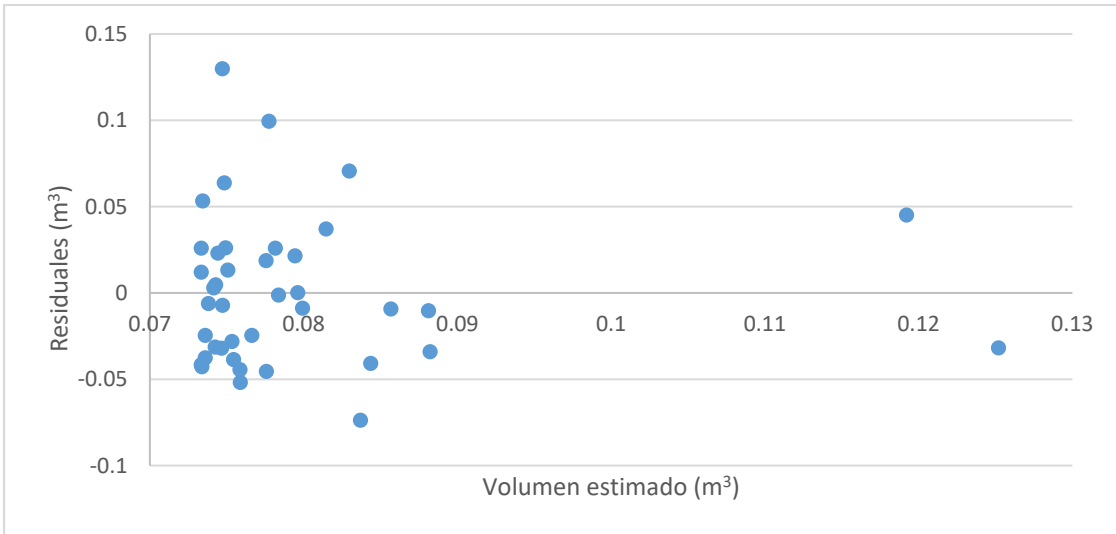


Figura 35: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 8.

Fuente: Elaboración Propia.

9	$\frac{V}{dcopa^{1,2}} = \frac{bo}{dcopa^{1,2}} + b1dcopa^{0,8}$
----------	--

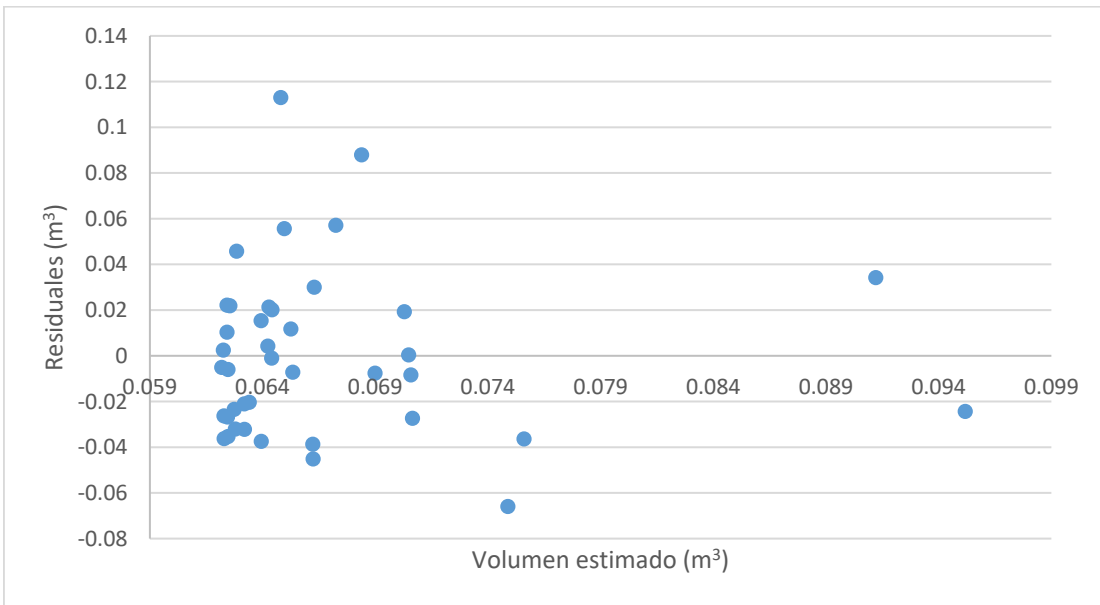


Figura 36: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 9.

Fuente: Elaboración Propia.

10	$\frac{V}{dcopa^{1,3}} = \frac{bo}{dcopa^{1,3}} + b1dcopa^{0,7}$
-----------	--

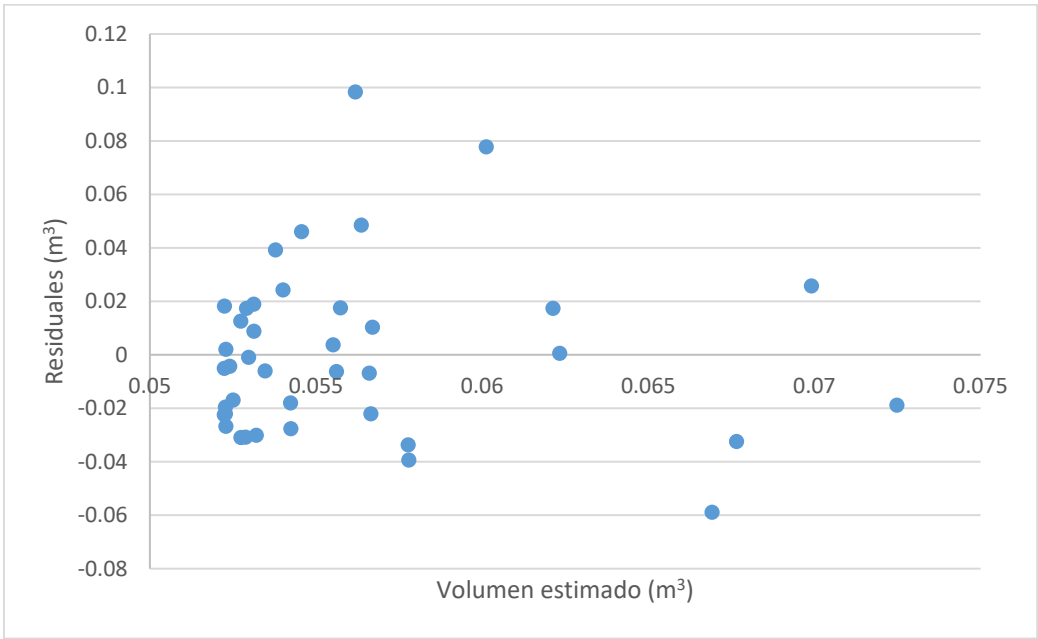


Figura 37: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 10.

Fuente: Elaboración Propia.

11	$\frac{V}{dcopa^{1,4}} = \frac{bo}{dcopa^{1,4}} + b1dcopa^{0,6}$
-----------	--

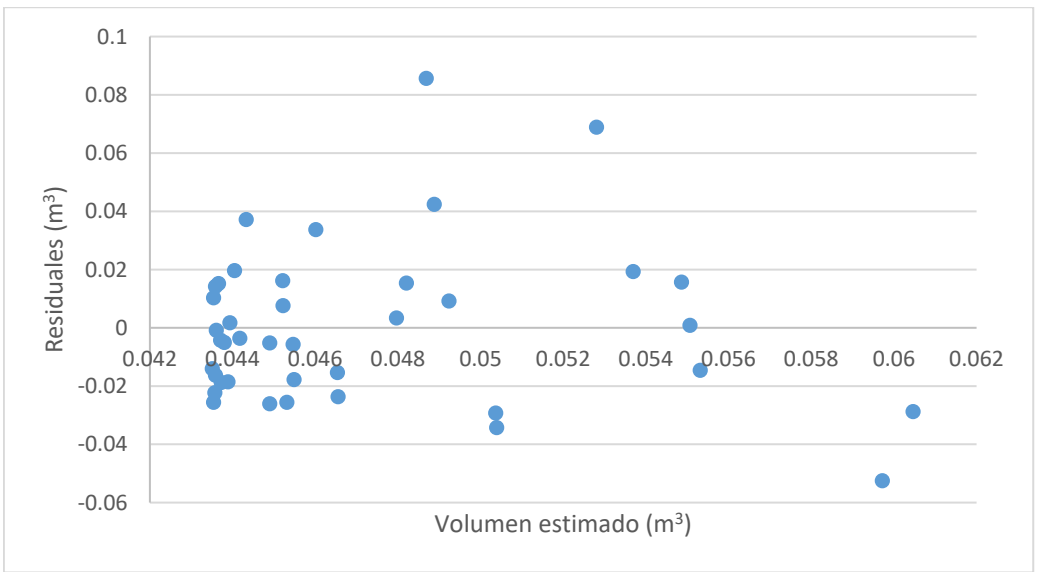


Figura 38: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 11.

Fuente: Elaboración Propia.

12	$\frac{V}{dcopa^{1,5}} = \frac{bo}{dcopa^{1,5}} + b1dcopa^{0,5}$
-----------	--

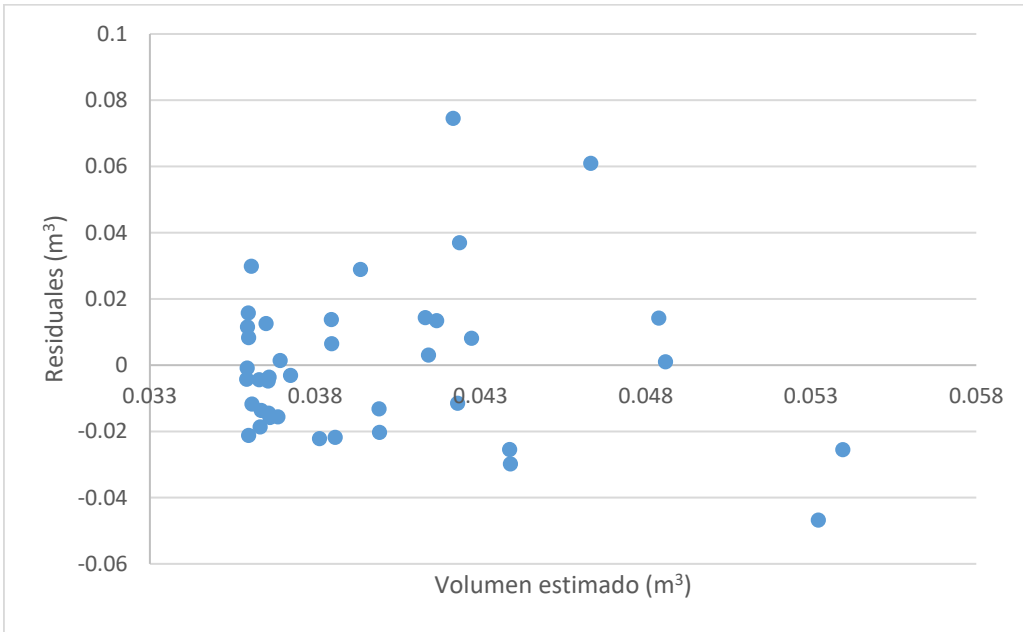


Figura 39: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 12.

Fuente: Elaboración Propia.

13	$\frac{V}{dcopa^{1,6}} = \frac{bo}{dcopa^{1,6}} + b1dcopa^{0,4}$
-----------	--

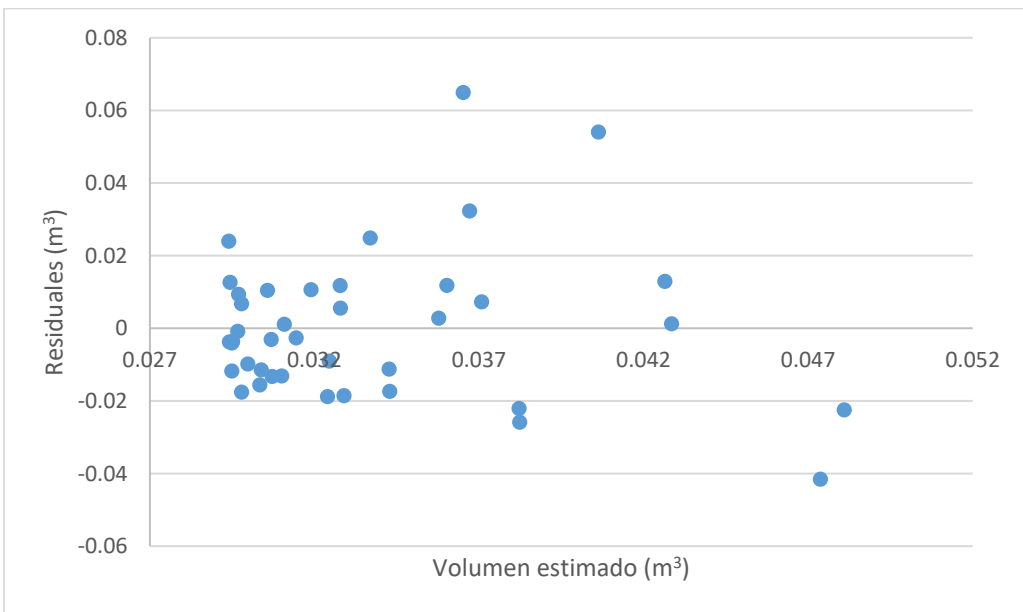


Figura 40: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 13.

Fuente: Elaboración Propia.

14	$\frac{V}{dcopa^2} = \frac{bo}{dcopa^2} + b1$
-----------	---

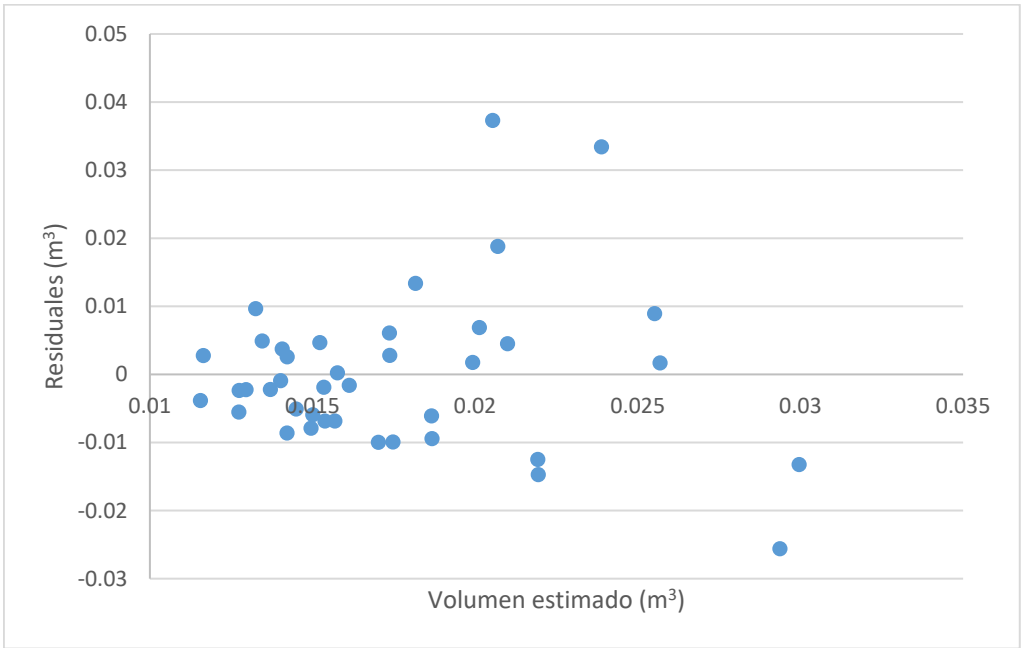


Figura 41: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 14.

Fuente: Elaboración Propia.

15	$\frac{V}{dcopa} = \frac{bo}{dcopa} + b1dcopa^2$
-----------	--

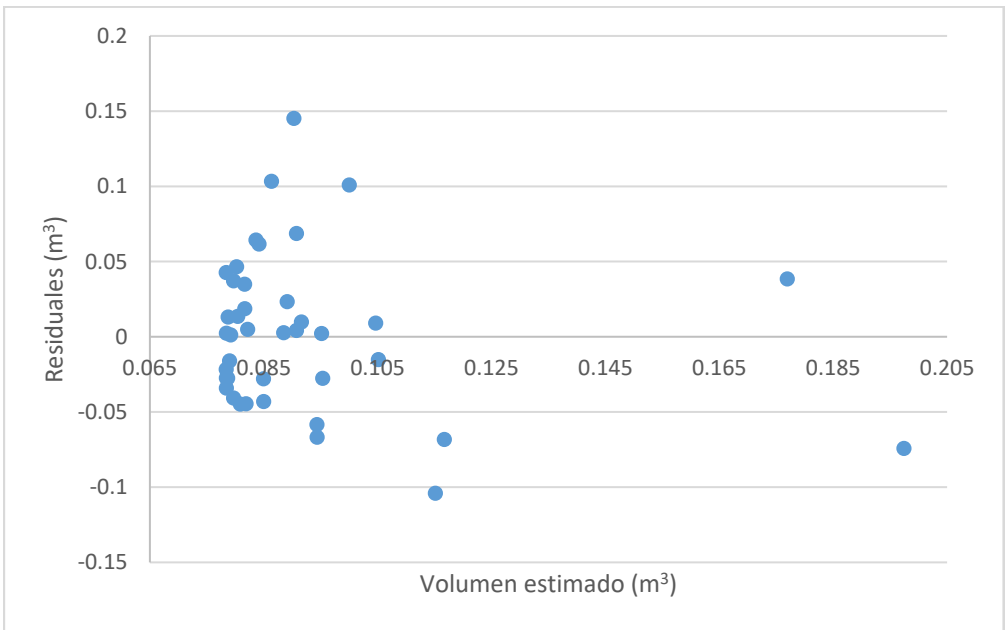


Figura 42: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 15.

Fuente: Elaboración Propia.

16	$\frac{V}{dcopa^{1,1}} = \frac{bo}{dcopa^{1,1}} + b1dcopa^{1,9}$
-----------	--

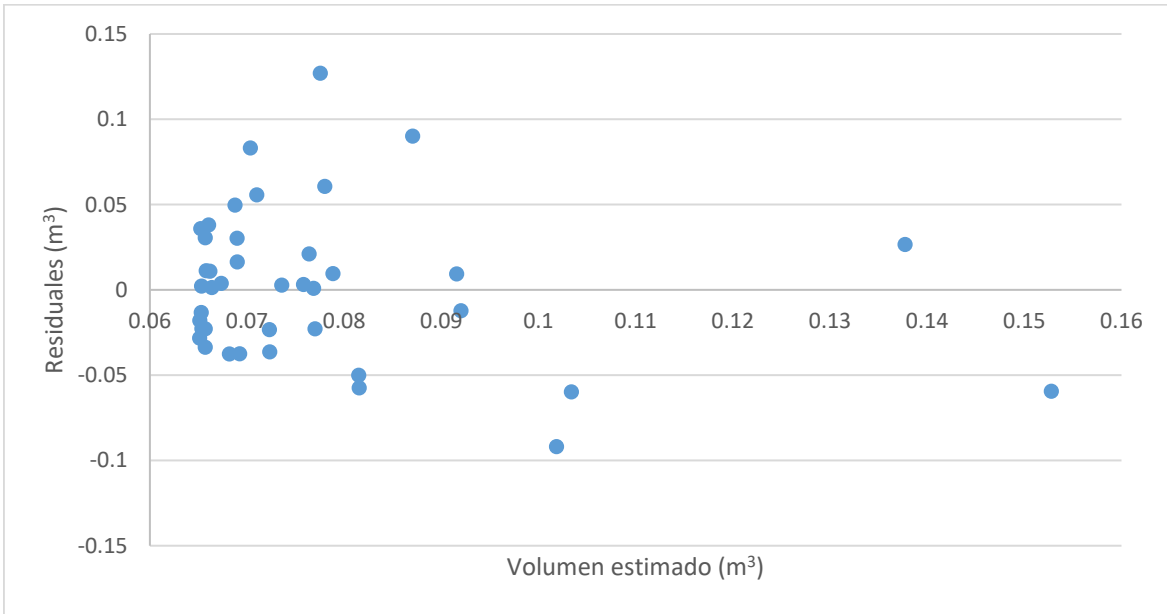


Figura 43: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 16.

Fuente: Elaboración Propia.

17	$\frac{V}{dcopa^{1,2}} = \frac{bo}{dcopa^{1,2}} + b1dcopa^{1,8}$
-----------	--

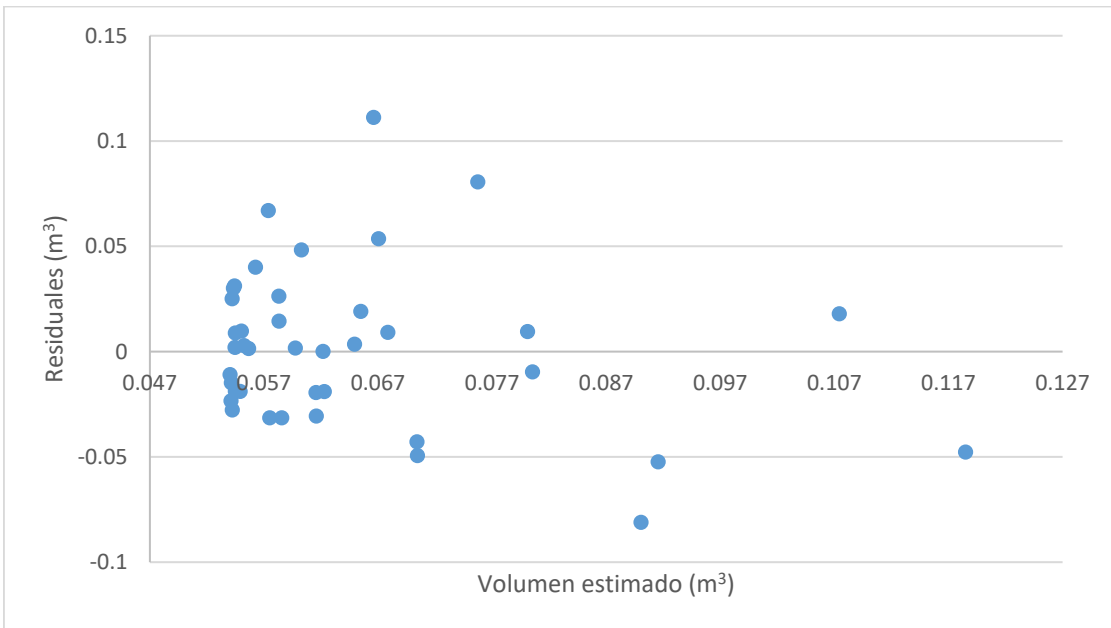


Figura 44: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 17.

Fuente: Elaboración Propia.

18

$$\frac{V}{dcopa^{1,3}} = \frac{bo}{dcopa^{1,3}} + b1dcopa^{1,7}$$

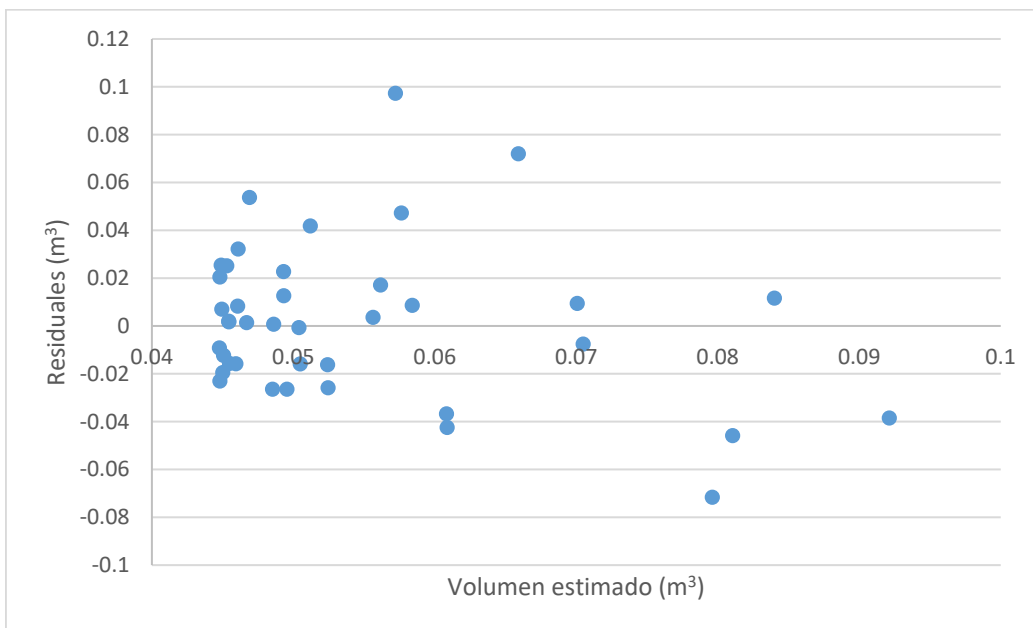


Figura 45: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 18.

Fuente: Elaboración Propia.

19

$$\frac{V}{dcopa^{1,4}} = \frac{bo}{dcopa^{1,4}} + b1dcopa^{1,6}$$

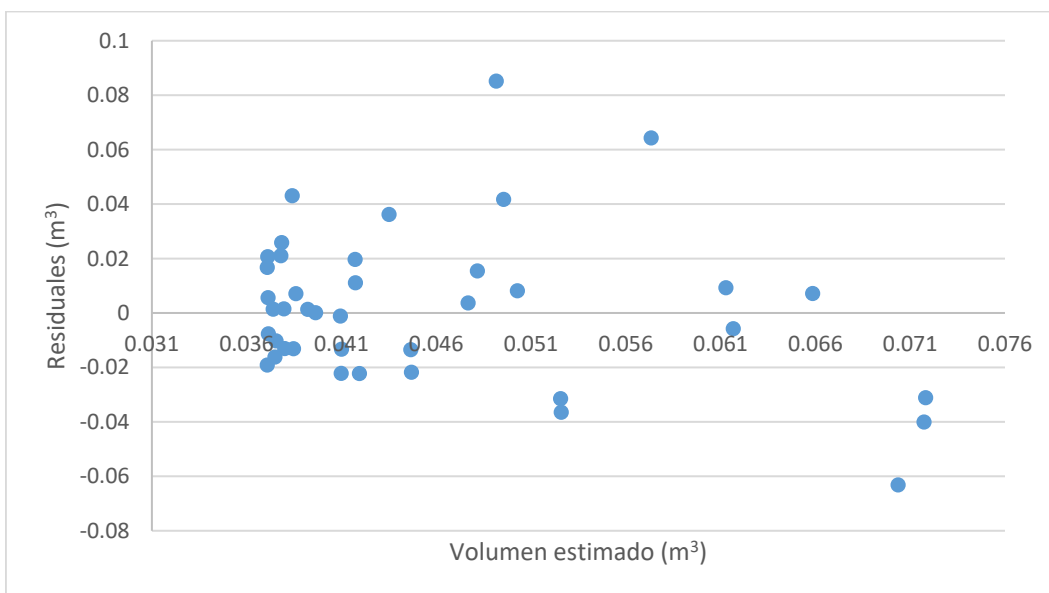


Figura 46: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 19.

Fuente: Elaboración Propia.

20	$\frac{V}{dcopa^{1,5}} = \frac{bo}{dcopa^{1,5}} + b1dcopa^{1,5}$
-----------	--

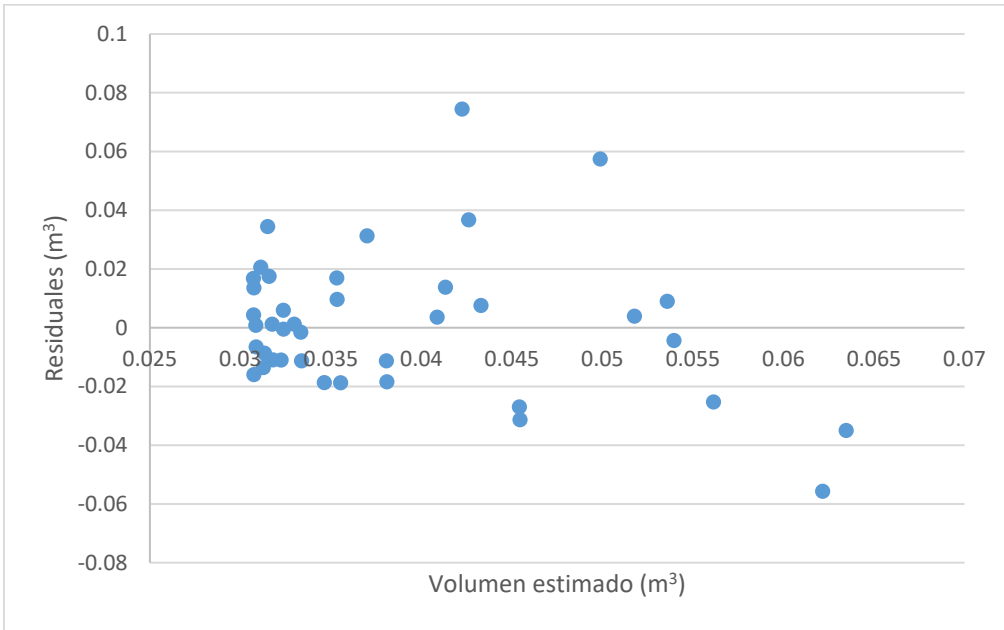


Figura 47: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 20.

Fuente: Elaboración Propia.

21	$\frac{V}{dcopa^{1,6}} = \frac{bo}{dcopa^{1,6}} + b1dcopa^{1,4}$
-----------	--

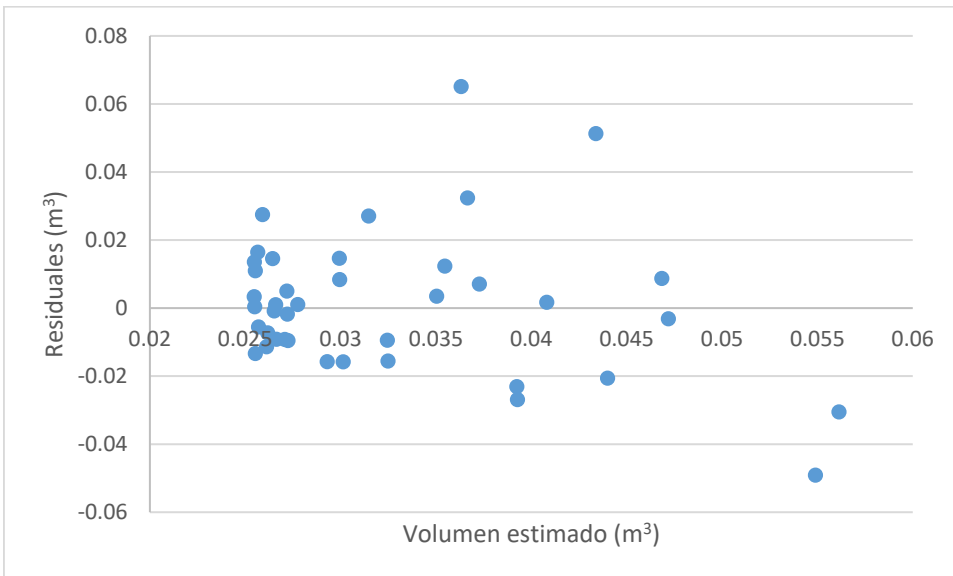


Figura 48: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 21.

Fuente: Elaboración Propia.

$$\frac{V}{dcopa^2} = \frac{bo}{dcopa^2} + b1dcopa$$

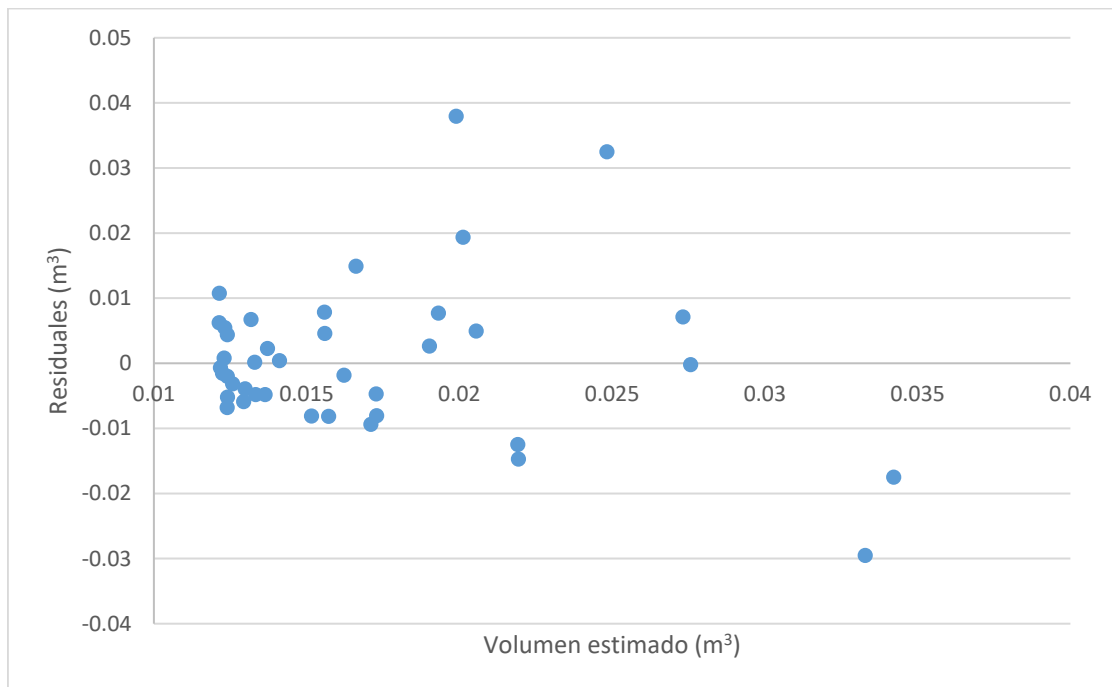


Figura 49: Análisis de residuos de la ecuación ponderada 22.

Fuente: Elaboración Propia.

Este análisis, permitió seleccionar las ecuaciones que presentaban una tendencia a la homocedasticidad en las gráficas. Los modelos 10, 11 y 12, se seleccionaron como las mejores dentro del grupo de las ecuaciones ponderadas, debido a que el resto de modelos presentan una tendencia no lineal en sus gráficas respectivas.

4. SELECCIÓN DE LA MEJOR ECUACIÓN

4.1. ÍNDICE DE FURNIVAL

Para seleccionar la mejor ecuación luego del análisis de residuales, se procedió a calcular el Índice de Furnival (IF), seleccionando aquella que tenga el menor valor de este índice. Los resultados se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30: Índice de Furnival.

<i>Modelo</i>	<i>Modelo</i>	<i>Índice de Furnival</i>
10	$\frac{V}{dcopa^{1,3}} = \frac{bo}{dcopa^{1,3}} + b1dcopa^{0,7}$	0,301586747
11	$\frac{V}{dcopa^{1,4}} = \frac{bo}{dcopa^{1,4}} + b1dcopa^{0,6}$	0,308670084
12	$\frac{V}{dcopa^{1,5}} = \frac{bo}{dcopa^{1,5}} + b1dcopa^{0,5}$	0,316604753

Entre los 03 modelos seleccionados como los mejores, el modelo que muestra el menor IF (0,302) es el modelo 10, por lo que se seleccionó esta ecuación como la mejor ecuación para la estimación del volumen de fustes de árboles dominantes.

Una vez seleccionada la ecuación de volumen, se procedió a multiplicar a cada variable por la inversa de su factor de ponderación, como se muestra a continuación:

$$dcopa^{1,3} x \frac{V}{dcopa^{1,3}} = dcopa^{1,3} x \frac{0,188803451}{dcopa^{1,3}} + 0,00968219dcopa^{0,7} x dcopa^{1,3}$$

De este modo se obtuvo la ecuación que estima mejor el volumen de los individuos dominantes de la Parcela Génova Ladera - 2, la cual se presenta a continuación:

$$V = 0,18803451 + 0,00968219dcopa^2$$

4.2. ECUACIÓN DE VOLUMEN SELECCIONADA

Para comprobar la precisión en la estimación del volumen de la ecuación seleccionada, se utilizó la ecuación para determinar el volumen estimado de 9 árboles medidos en campo y en el ortomosaico. Los resultados se observan en la Figura 50. Se observa que en los árboles que poseen diámetros pequeños de copa, se obtiene un buen ajuste de la ecuación.

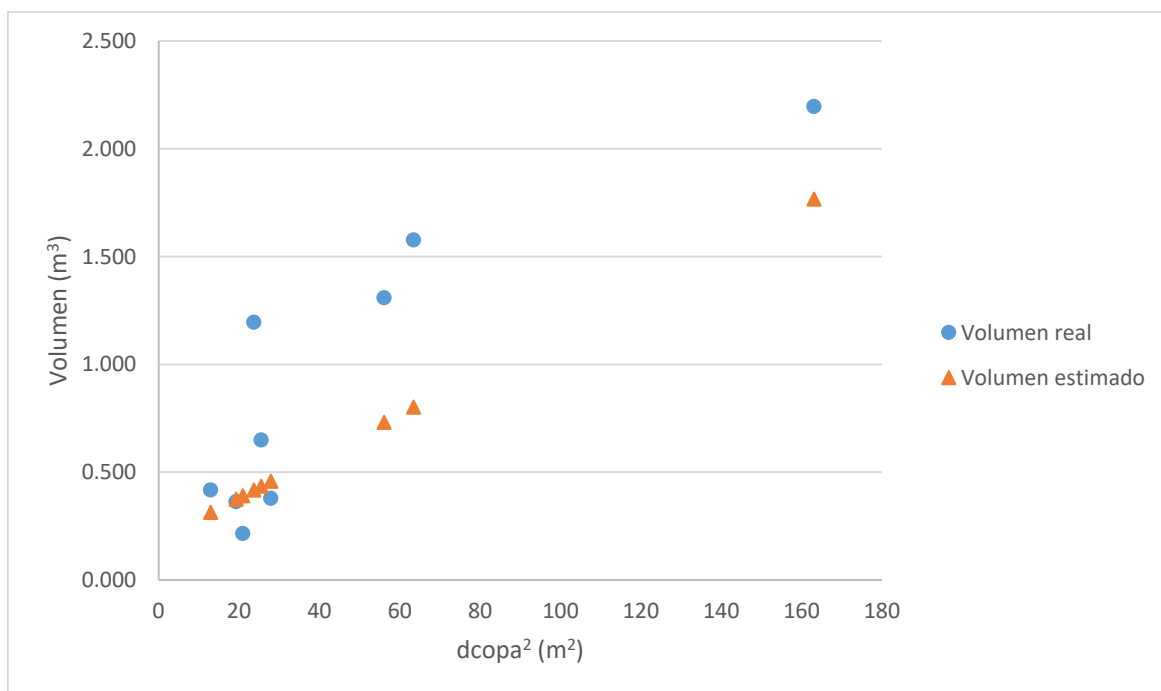


Figura 50: Volumen real versus volumen estimado de 9 árboles de la Parcela Génova Ladera - 2.

FUENTE: Elaboración Propia.

Para estos 9 árboles evaluados, se realizó una prueba de hipótesis para corroborar la confiabilidad estadística de los resultados. En la Tabla 31, se muestran los resultados.

Tabla 31: Prueba de hipótesis para dos muestras independientes y pequeñas.

	<i>Volumen real</i>	<i>Volumen estimado</i>
Media	0,922523504	0,632427247
Varianza	0,463929488	0,208558562
Observaciones	9	9
Estadístico t	1,061258288	
Valor crítico de t (dos colas)	2,119905299	

Se obtuvo un valor t de 1,061, valor que se encuentra dentro de la “Zona de Aceptación” tal como se observa en la Figura 51, por lo que la hipótesis nula se acepta. Esto nos permite corroborar la pertinencia estadística de la estimación mediante la ecuación de volumen seleccionada.

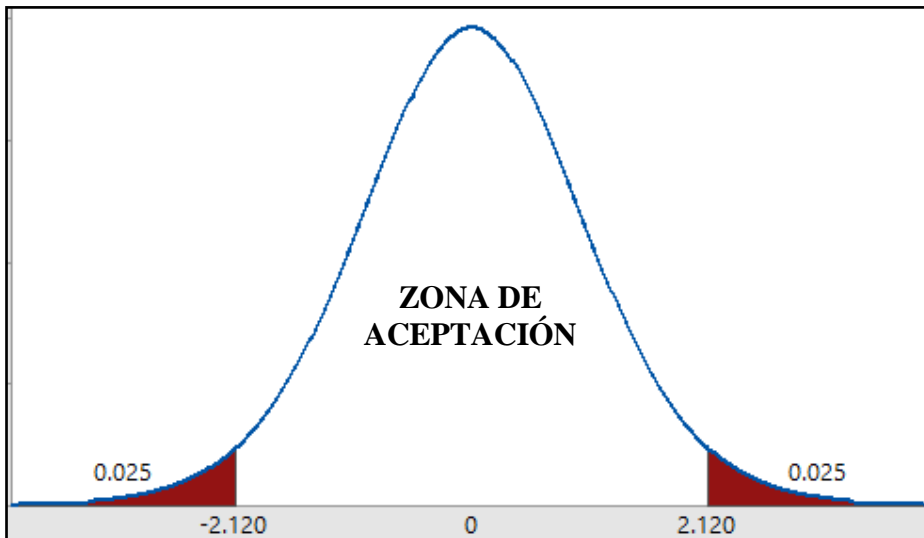


Figura 51: Distribución t student

Fuente: Elaboración Propia.

Así mismo, se realizó una comparación a modo de gráfico de los volúmenes estimados con los volúmenes reales de fuste de los 40 individuos de la muestral, tal como se observa en la Figura 52. Se observa que ambos poseen la tendencia lineal y que a medida que incrementa el valor de la variable independiente, la diferencia entre los volúmenes es mucho mayor por lo que se infiere que esta ecuación presenta un mejor ajuste en árboles con diámetros pequeños.

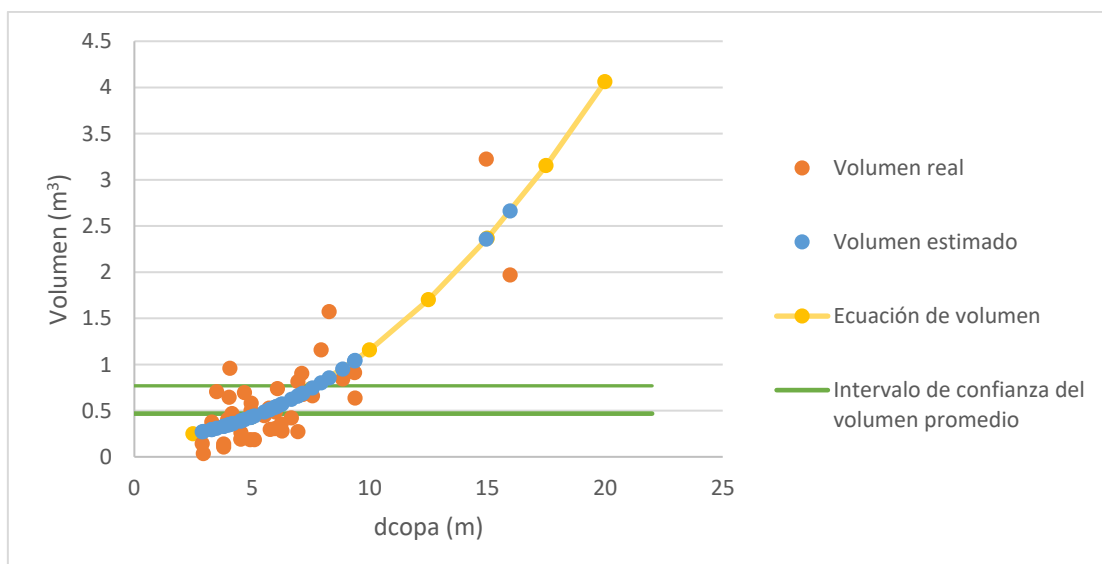


Figura 52: Volumen real versus volumen estimado de árboles de la Parcela Génova Ladera – 2.

Fuente: Elaboración Propia.

Con los resultados se determinó que el volumen promedio estimado es de $0,618 \text{ m}^3$ sobrestimando en $0,001 \text{ m}^3$ al volumen promedio real ($0,617 \text{ m}^3$). Y se determinó el intervalo de confianza para el volumen promedio estimado, que se encontró dentro del rango de: $[0,468 - 0,769]$.

Finalmente, con los resultados obtenidos se puede inferir que la ecuación ponderada seleccionada presenta un buen ajuste en la estimación de volúmenes de fustes para árboles dominantes en pie de la Parcela Génova Ladera - 2 en el distrito de Chanchamayo, departamento de Junín, teniendo como única variable al diámetro de copa obtenido en el ortomosaico de fotografías aéreas de un VANT.

V. CONCLUSIONES

- 1) La metodología propuesta y desarrollada en la presente investigación contribuye al desarrollo de metodologías en inventarios forestales mediante el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados para la estimación de volumen de fustes.
- 2) Los parámetros de vuelo para obtener ortomosaicos en bosques naturales con un VANT de la marca DJI modelo Phantom 4, son los siguientes: Vuelo manual con alturas mayores a los 100 metros sobre el nivel del suelo, una velocidad horizontal de 1 m/s, tiempo de obturación de 2 segundos y un traslape de 90% para facilitar el procesamiento de las fotografías aéreas en los softwares de fotogrametría.
- 3) La ecuación de volumen en función del diámetro de copa obtenido en un ortomosaico, que estima con mayor precisión el volumen de fustes de los árboles dominantes de un bosque secundario joven en el distrito de Chanchamayo, departamento de Junín es:

$$V = 0,18803451 + 0,00968219dcopa^2$$

- 4) Los Vehículos Aéreos No Tripulados o VANTs, son herramientas con múltiples funcionalidades, comprobando que en la estimación de volumen en ortomosaicos, son herramientas eficientes que permiten ahorrar en tiempo y costos del trabajo de campo.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso de los Vehículos Aéreos No Tripulados para la evaluación de los bosques naturales y plantaciones en términos de inventarios forestales, utilizando diferentes modelos de VANTs con diversos tipos de cámaras incorporados. Estos estudios, podrían relacionar el uso de LIDAR para el cálculo de biomasa en diferentes tipos de vegetación.
- Se recomienda el desarrollo de investigaciones sobre la relación de los individuos dominantes, codominantes y dominados con las copas de árboles, para obtener parámetros que nos permitan estimar el volumen total de un área de estudio.
- Para generar un buen ajuste en las ecuaciones de volumen, se recomienda utilizar la regresión ponderada.
- Para la generación de ortomosaicos con una georreferenciación precisa, se recomienda trabajar con puntos de control en campo que puedan ser georeferenciados con un dispositivo GPS diferencial.
- Se recomienda realizar más estudios de estimación de volumen en función del diámetro de copa obtenido de ortomosaicos de fotografías aéreas en diferentes tipos de bosques y departamentos del Perú, para contar con resultados diferentes y realizar comparaciones pertinentes.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña, E, 2010. Análisis estadísticos de datos usando MINITAB (en línea). Puerto Rico, PR, Consultado 13 mar, 2018. Disponible en: may, 2016, <http://academic.uprm.edu/eacuna/covertex.pdf>
- Alvarado, J; Obagi, J. 2008. Inferencia Estadística. Bogotá, CO. Editorial Pontificia Universidad Javeriana. 358p.
- Arriaza, M. 2006. Guía Práctica de Análisis de Datos (en línea). Murcia, ES. JUNTA DE ANDALUCÍA. Consejería de Innovación, Ciencias y Empresa. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. Consultado 18 mar, 2017. Disponible en: http://www.um.es/jmpaz/AGP1213/guia_practica_de_analisis_de_datos.pdf
- Barrena, V; Dancé, J; Sáenz, D, 1986. Metodología para la selección de Ecuaciones de volumen. Lima, PE. Revista Forestal del Perú 13 (2): 3 – 12.
- _____ ; Garnica, C; Ocaña, J; Rosero, J. 2007. Instructivo de campo: Brigada de Forma y Volumen. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 13 p.
- _____. 1988. La regresión ponderada en la elaboración de las Ecuaciones de volumen. Lima, PE. Revista Forestal del Perú 15(2): 21- 28
- Barrera, R. 1995. Uso de fotografías aéreas en el muestreo doble de bosques tropicales (Dantas – Perú). Tesis (Ing. Forestal). Universidad Nacional Agraria La Molina. 99p.
- Bautista, C. 2000. Estimación del volumen de un rodal cultivado usando índices de forma. Tesis (Ing. Forestal). Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 63p.
- Berrio, V; Mosquera, J; Alzate, D. 2015. Uso de drones para el análisis de imágenes multiespectrales en agricultura de precisión. Bogotá, CO. Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona. @LIMENTECH CIENCIA Y TECNOLOGÍA ALIMENTARIA. ISSN 1692 – 7125. Volumen 13. No. 1. p 28 – 40.

- Binkley, D; Camargo, O; Gspaltl, M; Forrester, D. 2011. Light absorption and use efficiency in forests: Why patterns differ for trees and stands. New York, US. Forest Ecology and Management. ELSEVIER. V. 288. 5 – 13.
- Botella, P; Alacreu, M; Beneito, M. Sin fecha. Inferencia estadística (intervalos de confianza y p-valor) – Comparación de dos poblaciones (test t de comparación de medias, comparación de dos proporciones, comparación de dos varianzas) (en línea). Valencia, ES. Universidad Cardenal Herrera. Consultado 28 mar, 2018. Disponible en: <http://www.uv.es/~mamtnez/IECRC.pdf>
- Cáceres, P; Reynel, C. 2010. Los árboles de Ficus (Ojé) del valle de Chanchamayo. Dpto de Junín, Perú (800 – 2500 msnm). Lima, PE. Asociación Peruana para la Promoción del Desarrollo Sostenible. 79 p.
- Cailliez, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos. Vol. 2. Roma, IT. Estudios FAO Montes. 22/1, 92p.
- Cancino, J. 2006. Dendrometría básica. Concepción, CL. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Concepción. 171 p.
- Cardona, D; González, J; Rivera, M; Cárdenas, E. 2013. Inferencia estadística. Módulo de regresión lineal simple. Bogotá, CO. Documento de investigación No. 147. Universidad del Rosario. Editorial Universidad del Rosario. 46p.
- Chatterjee, S; Price, B. 1977. Regression Analysis by Example. Wiley, J & Sons. INC, publication. 230 p.
- Chave, J. 2005. Medición de la altura del Árbol, para árboles tropicales – Manual de Campo (en línea). Toulouse, FR. Lab. Evolution et Diversité Biologique. Université Paul Sabatier. Proyecto de Avance de las Redes Científicas en el Amazonas PAN – AMAZONIA. Sith Framework Programme (2002 – 2006). Consultado 14 mar, 2018. Disponible en: [http://www.rainfor.org/upload/ManualsSpanish/TreeHeight_spanish\[1\].pdf](http://www.rainfor.org/upload/ManualsSpanish/TreeHeight_spanish[1].pdf)
- Cluter, J. 1980. Development of taper functions from variable-top merchantable volumen equations. Washington D.C., US. Forest Sciencie. Vol. 26. 117 – 120.

- Contreras, F; Leño, C; Licona, J; Dauber, E; Gunnar, L; Hager, N; Caba, C. 1999. Guía para la Instalación y Evaluación de Parcelas Permanentes de Muestreo (PPMs) (en línea). Santa Cruz de la Sierra, BO. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOT). Programa de Desarrollo Forestal Industrial (PROMABOSQUE). Consultado 13 mar, 2018. Disponible en: https://rmportal.net/library/content/Professional_or_Trade_Education_and_Training_Workforce_Development/guia-para-la-instalacion-y-evaluacion-de-parcelas-permanente.pdf/at_download/file
- Corvalán, P; Hernández, J. 2006. Medición de copas y raíces – Apuntes de Dasometría (en línea). Santiago de Chile, CH. Universidad de Chile. Consultado 14 mar, 2018. Disponible en: https://www.u-cursos.cl/forestal/2009/2/EF024/1/material_docente/bajar?id_material=481438.
- Da Cunha, T; Guimarães, C. 2009. Modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza de árboles de *Pinus taeda* L. en el sur de Brasil. Cartago, CR. Kurú: Revista Forestal 6 (16).
- Díaz, J. 2005. Estadística con Programación (en línea). Puerto Rico, PR. Universidad de Puerto Rico en Aguadilla. Consultado 15 mar, 2018. Disponible en: <http://math.uprag.edu/residuales1.pdf>
- Doruska, F; Burkhart, H. 1994. Modeling the diameter and locational distribution of branches within the crowns of loblolly pine trees in unthinned plantations. Ottawa, CA. Canadian Journal of Forest Research. 24: 2362 – 2376.
- Duffy, P. 1963. Estimation of Stand Volumen From Airphotos (en línea). Ottawa, CA. Department of Forestry. Consultado 14 mar, 2018. Disponible en: http://www.cfs.nrcan.gc.ca/bookstore_pdfs/30585.pdf
- Dustin, M. 2015. Monitoring Parks with Inexpensive UAVs: Cost Benefits analysis for Monitoring and Maintaining Parks Facilities. Tesis (Master en Ciencias). California, EU. Universidad del Sureste del California. 100p.
- Escobar, M. 2015. Estudio de la volumetría de árboles en pie de caoba (*Swietenia macrophylla* King) en el departamento de Madre de Dios, Perú. Tesis (Mg. Sc. en Bosques y Gestión de Recursos Forestales). Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 77 p.

- ESI (ESCUELA SUPERIOR DE INFORMÁTICA). Sin fecha. Supuestos del modelo de regresión lineal (en línea). Toledo, ES. Consultado 14 mar, 2018. Disponible en: https://previa.uclm.es/profesorado/raulmmartin/Estadistica/Practicasspss/Supuestos_del_modelo_de_regresion_lineal.pdf
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, PE) y SERFOR (Servicio Forestal Nacional y de Fauna Silvestre, PE). 2016. Memoria descriptiva del mapa de ecozonas – Inventario Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (INFFS) (en línea). Lima, PE. Consultado 13 mar, 2018. Disponible en: <https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2017/02/MEMORIA%20DESCRIPTIVA%20DEL%20MAPA%20DE%20ECOZONAS%20DEL%20INFFS.pdf>
- Furnival, G. 1961. An Index for comparing equations used in constructing volume tables. *Forest Science* no. 7(4): 337 – 341.
- García, D. 2010. Estimación de variables de interés forestales basada en datos LIDAR en el monte número 117 del C.U.P (en línea). Madrid, ES. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Consultado 17 mar, 2018. Disponible en: http://oa.upm.es/6171/2/PFC_DAVID_GARCIA_GARCIA_TEXTO.pdf
- García, I. 2017. Estudio sobre vehículos aéreos no tripulados y sus aplicaciones. Tesis (Ing. Eléctrico). Valladolid, ES. Universidad de Valladolid. 197p.
- Giacomotti, J. 2016. Evaluación de la dinámica forestal en un área de bosque secundario tardío en el fundo La Génova. Chanchamayo. Tesis (Ing. Forestal). Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 107p.
- Gómez, C; Salazar, M. 2010. Instalación de Parcelas Permanentes de Muestreo, PPM, en los bosques tropicales del Darién en Panamá (Comarca Embera – Wounaan) (en línea). Panamá, PA. The International Tropical Timber Organization (ITTO). Consultado 13 mar, 2018. Disponible en: http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2890/Technical/GU%3%8DA%20PARA%20LA%20INSTALACI%3%93N%20DE%20LAS%20PPM.pdf

- GORE Junín. 2015. Memoria descriptiva del estudio de suelos y capacidad de uso mayor del departamento de Junín a escala 1:100000 (en línea). Chanchamayo, PE. Consultado 18 mar, 2018. Disponible en: http://siar.regionjunin.gob.pe/sites/default/files/archivos/public/docs/medio_fisico_-_memoria_descriptiva_suelos_y_capacidad_de_uso_mayor.pdf
- Guillén, R. 2014. Estimación del volumen de la caoba (*Swietenia macrophylla* King) usando Ecuaciones de ahusamiento en el departamento de Madre de Dios. Tesis (Ing. Forestal). Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 99p.
- Hanke, J; Wichern, D. 2006. Pronósticos en los negocios. 8 ed. Naucalpan de Juárez, MX. Prentice Hall. 552p.
- Herrera, B. 1987. Elementos de fotogrametría. México D.F., MX. Editorial LIMUSA. Universidad Autónoma Chapingo. 173 p.
- Izquierdo, J. 1962. Las fotografías aéreas en la estimación del volumen de bosques secundarios en el trópico. Tesis (Mg. Sc. en Agricultura). Turrialba, CR. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. 42p.
- José, A. 2012. Modelo de Regresión Lineal. Supuestos del modelo (en línea). Calí, CO. Universidad del Valle. Consultado 15 mar, 2018. Disponible en: https://campusvirtual.univalle.edu.co/moodle/pluginfile.php/380225/mod_resource/content/0/Clases/Supuestos_del_modelo.pdf
- Kapos, V; Rhind, J; Edwards, M; Price, M; Ravilious, C. 2000. Developing a map of the world's mountain forests. Forests in sustainable mountain development: A state – of knowledge reporte for 2000 (en línea). Wallingford, US. CAB International. Consultado 12 mar, 2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/306151877_Developing_a_map_of_the_world's_mountain_forests_Forests_in_sustainable_mountain_development_a_state_of_knowledge_report_for_2000
- Lamprecht, H. 1990. Silvicultura de los trópicos: los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas; posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). Berlín, AL. 335p.

- Loayza, M. 1982. Algunos aspectos sobre la complejidad del bosque húmedo tropical. Nota Técnica. Lima, PE. Revista Forestal del Perú 11(1-2):1-6.
- Loetsch, F; Zohrer, F; Haller, K,E. 1973. Forest Inventory. Vol. 2. B.L.V. Verlagsgesellschaft. Munich, DE. 469p.
- Lojan, L. 1966. Una fórmula para estimar volúmenes en un bosque tropical húmedo. Turrialba, CR. Revista interamericana de ciencias agrícolas no. 16(1): 67-72.
- López, A. 2014. Planificación de vuelos fotogramétricos para U.A.V. sobre cliente QGIS. Tesis (Mg. Sc. en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica). Oviedo, ES. Universidad de Oviedo. 32 p.
- López, J. 2012. Diseño, implementación y pruebas de técnicas de control robusto aplicadas a la operación de un UAV (Unmanned Air Vehicle). Tesis (Doctor en Filosofía). Madrid, ES. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática. Departamento de Informática y Automática. Universidad Nacional de Educación a Distancia. 281p.
- Louman, B; Quirós, D; Nilsson, M. 2001. Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central. Turrialba, CR. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 265p.
- Malleux, J. 1970. Estudio de la Relación D.A.P. con el Diámetro de Copa en un Bosque Húmedo Sub Tropical. Lima, PE. Revista Forestal del Perú 4 (1-2): 1-5.
- Malleux, J. 1982. Inventarios Forestales en Bosques Tropicales. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 414p.
- Martínez, E. 2005. Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal (en línea). Madrid, ES. Anuario Jurídico y Económico Escorialense no. 38: 315 – 332. Consultado 15 mar, 2018. Disponible en: https://www.rcumariacristina.com/wp-content/uploads/2010/12/11-Elena-Martinez_1.pdf
- Menéndez, F. 2002. Residuos, Residuos studentizados y valores DFFIT: Su uso en Regresión Lineal Simple y Múltiple (en línea). Montevideo, UR. Cátedra de Mitología de la Investigación III. Universidad de la República. Consultado 15 mar, 2018. Disponible en: <http://tabarefernandez.tripod.com/coco2.pdf>

- MINAM (Ministerio del Ambiente del Perú, PE). 2016. La conservación de bosques en el Perú (2011 – 2016) – Conservando los bosques en un contexto de cambio climático como aporte al crecimiento verde (en línea). Lima, PE. Primera Edición. Consultado 14 mar, 2018. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/informessectoriales/wp-content/uploads/sites/112/2016/02/11-La-conservaci%C3%B3n-de-bosques-en-el-Per%C3%BA.pdf>
- Montgomery, D; Peck, A; Vining, G. 2006. Introducción al análisis de regresión lineal. 3 ed. México D.F., MX. CECSA. 588 p.
- MPC (Municipalidad Provincial de Chanchamayo). 2013. Plan de desarrollo concertado de la provincial de Chanchamayo (en línea). Chanchamayo, PE. Consultado 15 mar, 2018. Disponible en: <http://www.munichanchamayo.gob.pe/documentos/pdc-2013.pdf>
- Ojeda, W; Terrazas, J. 1987. Estimación de volúmenes maderables en bosques mixtos tropicales mediante la utilización de fotografías aéreas. Lima, PE. Revista Forestal del Perú. 14 (1): 1 – 15.
- ONERN (Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales). 1976. Mapa ecológico del Perú. Guía explicativa. Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales del Perú. Lima, PE. 146 pp.
- Oñate, M. 2015. Tipología de Aeronaves Pilotadas por Control Remoto, Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil (en línea), Madrid, ES, FENERCOM (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid). Consultado 14 mar, 2018. Disponible en: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Los-Drones-y-sus-aplicaciones-a-la-ingenieria-civil-fenercom-2015.pdf>
- Orellana, L. 2008. Regresión Lineal Simple. Análisis de Regresión (en línea). Buenos Aires, AR. Universidad de Buenos Aires. Consultado 18 mar, 2018. Disponible en: http://www.dm.uba.ar/materias/estadistica_Q/2011/1/clase%20regresion%20simple.pdf

- Otero, I; Ezquerro, A; Rodríguez, R; Martín, L; Bachiller, I. Sin fecha. 2. Fotogrametría (en línea). Madrid, ES. Universidad Politécnica de Madrid. Consultado 18 mar, 2018. Disponible en: http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-cartografia-y-geodesia/contenidos/TEMA_11_FOTOGAMETRIA_Y_TELEDETECCION/Fotogrametria/fotogrametria_cap_libro.pdf.
- Paneque – Gálvez, J; McCall, M; Napoletano, B; Wich, S; Pin, L. 2014. Small Drones for Community – Based Forest Monitoring: An Assessment of Their Feasibility and Potential in Tropical Areas (en línea). Basel, SW. Forests. 5 (6): 1481 – 1507. Consultado 12 mar, 2018. Disponible en: https://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/bitstream/2440/90708/2/hdl_90708.pdf
- Paredes, D; Beltrán, A. 2015. Aplicaciones cartográficas. Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil. Madrid, ES. FENERCOM (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid). Consultado 15 mar 2018. Disponible en: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Los-Drones-y-sus-aplicaciones-a-la-ingenieria-civil-fenercom-2015.pdf>
- Pastor, R. 1992. Evaluación de la Erosión Hídrica en la Zona de Chanchamayo – Junín, utilizando como Cobertura Vegetal el Cultivo de Camote (*Ipomea batatas* L.) Tesis (Ing. Agrícola). Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 104 p.
- Philip, M. 1994. Measuring trees and forests. A textbook written for students in Africa. Tanzania, AF. The Division of Forestry. University of Dar-es-Salaam. 338 p.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 1998. Conservación y aprovechamiento sustentable de los bosques tropicales húmedos de América Latina y el Caribe (en línea). Lima, PE. XI Reunión del Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe. Consultado 14 mar, 2018. Disponible en: <http://www.pnuma.org/forodeministros/12-barbados/bbdt03e-BosquesTropicalesHumedoss.pdf>
- Pounds, P. 2007. Design, Construction and Control of a Large Quadrotor Micro Air Vehicle. Tesis (Doctor of Philosophy). Sidney, AU. Australian National University. 159p.

- Prodan, M; Peters, R; Cox, F; Real, P. 1997. Mensura Forestal. San José, CR. IICA. 586p.
- Quirós, E. 2014. Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil. Cáceres, ES. Universidad de Extremadura. 137 p.
- Rodríguez, C; Gutiérrez, J; Pozo, T. 2007. Fundamentos conceptuales y desarrollo práctico con SPSS de las principales pruebas de significación estadística en el ámbito educativo. Granada, ES. Editorial GEU. 1era Edición. 124p.
- Royo, J. 2007. Regresión Lineal Múltiple (en línea). Madrid, ES. Consultado 15 mar 2018. Disponible en: http://humanidades.cchs.csic.es/cchs/web_UAE/tutoriales/PDF/Regresion_lineal_multiple_3.pdf
- Romahn, C; Ramírez, H. 2010. Dendrometría (en línea). Estado de México, MX. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Consultado 14 mar, 2018. Disponible en: <http://dicifo.chapingo.mx/licenciatura/publicaciones/dendrometria.pdf>
- Romero, C. 2016. Estimación del volumen de árboles en pie de Caoba (*Swietenia macrophylla* KING) en el departamento de Ucayali, Perú. Tesis (Ing. Forestal). Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 73p.
- Romero, N. 2012. La revolución en la toma de decisiones estadísticas: el p-valor (en línea). Maracaibo, VE. Universidad Privada Dr. Rafael Bellosó Chacín. Revista Telos. Vol. 14, número 3. Consultado 14 mar, 2018. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/993/99324907004.pdf>
- Rybakov, G. 2015. Mean Forest volumen estimation by high-resolution aerial RGB imagery and digital Surface model with Trestima as validation technique. Tesis (Ing, en Recursos Naturales). Raseborg, FI. University of Applied Sciences. 34p.
- Sánchez, J. 2006. Introducción a la fotogrametría (en línea). Coruña, ES. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Consultado 15 mar, 2018. Disponible en: ftp://ftp.unsj.edu.ar/agrimensura/Fotogrametria/Unidad6/Introduccion_a_la_Fotogrametria.pdf
- Schomaker, M; Zanoich, S; Stolte, K. 1999. Tree crown condition indicator. Asheville, US. USDA. Forest Service. Foresta Health Monitoring Fact Sheet. 4p.

- SERFOR (Servicio Forestal Nacional y de Fauna Silvestre, PE). 2016. Nuestros bosques en números. Primer reporte del Inventario Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (en línea). Lima, PE. Consultado 14 mar, 2018. Disponible en: <https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/Nuestros%20Bosques%20en%20Numeros.pdf>
- Setzer, T; Mead, B. 1988. Verification of Aerial Photo Stand Volume Tables for Southeast Alaska (en línea). Alaska, US. USDA. Forest Service. Consultado 14 mar, 2018. Disponible en: https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_rp396.pdf
- Tabuchi, R. 2015. Diseño de un Vehículo Aéreo no Tripulado de cuatro rotores para una carga útil de 1 kg. Tesis (Ing. Mecánica). Lima, PE. Pontificia Universidad Católica del Perú. 82p.
- Tapia, J. 1998. Ajusta de ecuaciones de volumen y funciones de ahusamiento para *Pinus teocote Schl. Et. Cham* y *Pinus pseudostrobus Lindl.* en el estado de Nuevo León. Tesis (Mg. Sc. en Ciencias Forestales). Nuevo León, MX. Universidad Autónoma de Nuevo León. 110p.
- Torres, I. 2015. Cartografía y ciudad. Barcelona, ES. Universidad de Barcelona. Revista de Estudios Urbanos y Ciencias Sociales. Vol. 5. número 2. 265-272.
- Ugalde, L. 1981. Conceptos básicos de Dasometría. Turrialba, CR. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 22p.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2013. A new eye in the sky: Eco-drones (en línea). Dakota del Sur, US. Consultado 15 mar, 2018. Disponible en: http://na.unep.net/geas/getunepagewitharticleidsript.php?article_id=100.
- Uriel, E. 2013. Contraste de hipótesis en el modelo de regresión lineal múltiple (en línea). Valencia, ES. Consultado 15 mar, 2018. Disponible en: may, 2016. <http://www.uv.es/uriel/4%20Contraste%20de%20hipotesis%20en%20el%20modelo%20de%20regresion%20multiple.pdf>

Vickery, M. 1987. Ecología de plantas tropicales. Primera Edición. México DF, MX. 232 p.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1

VERIFICACIÓN DE CONDICIONES DE VUELO PARA EL VANT



ANEXO 2

IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS DE CLAROS



ANEXO 3

COSTOS DE ADQUISICIÓN DEL VANT Y VUELO

<i>Adquisición del equipo</i>		
<i>Materiales</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo total (Incluyendo IGV) (S./.)</i>
1 Phantom 4	1	6921
Baterías extras	4	3871
Hélices extras	2	154
Mochila de transporte	1	939
Software Agisoft Licencia	1	14160
iPad Mini 4	1	2124
1 Laptop Asus Gamer	1	5546
SUMA DE ADQUISICIÓN		33715 soles

<i>Adquisición de instrumentos de medición</i>		
<i>Instrumentos</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Costo total (Incluyendo IGV) (S./.)</i>
1 Brújula Suunto	1	747
1 Relascopeo de Bitterlich	1	1024
1 Cinta métrica	2	60
1 GPS MAP 64s	1	1652
1 Cámara fotográfica	1	944
Walkie talkie	2	307
Machete	2	60
Botiquín de primeros auxilios	1	150
Botas de jebe	2	50
Materiales de escritorio	1	55
SUMA DE ADQUISICIÓN		5049 soles

<i>Honorarios de los profesionales</i>			
<i>Profesional</i>	<i>Costo/Día (S./.)</i>	<i>Número de días en campo</i>	<i>Costo total</i>
Piloto de dron (Ing. Forestal)	260	5	1300
Asistente de piloto	140	5	700
SUMA			2000

<i>Pasaje a Chanchamayo (2 personas) (S./.)</i>	
Ida	130
Vuelta	130
SUMA	260

<i>Resultados obtenidos</i>	
Ortomosaico de 2 hectáreas	
Estimación de volumen de árboles dominantes	
Costo total (Con la primera compra)	41024
Costo (Con la adquisición)	2260

ANEXO 4

MEDICIÓN DEL DIÁMETRO A LA ALTURA DEL PECHO



ANEXO 5

MEDICIÓN DE LOS DIÁMETROS A DIFERENTES ALTURAS



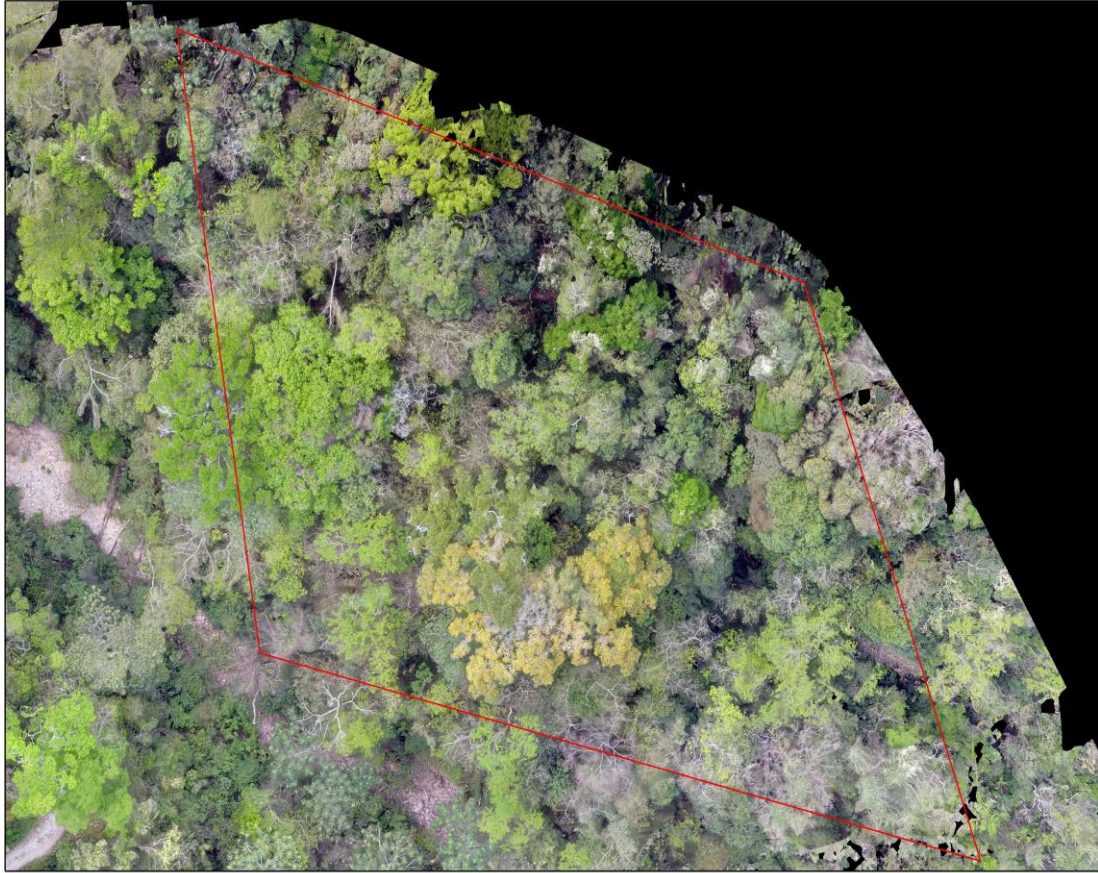
ANEXO 6

MEDICIÓN DE LOS RADIOS DE COPA



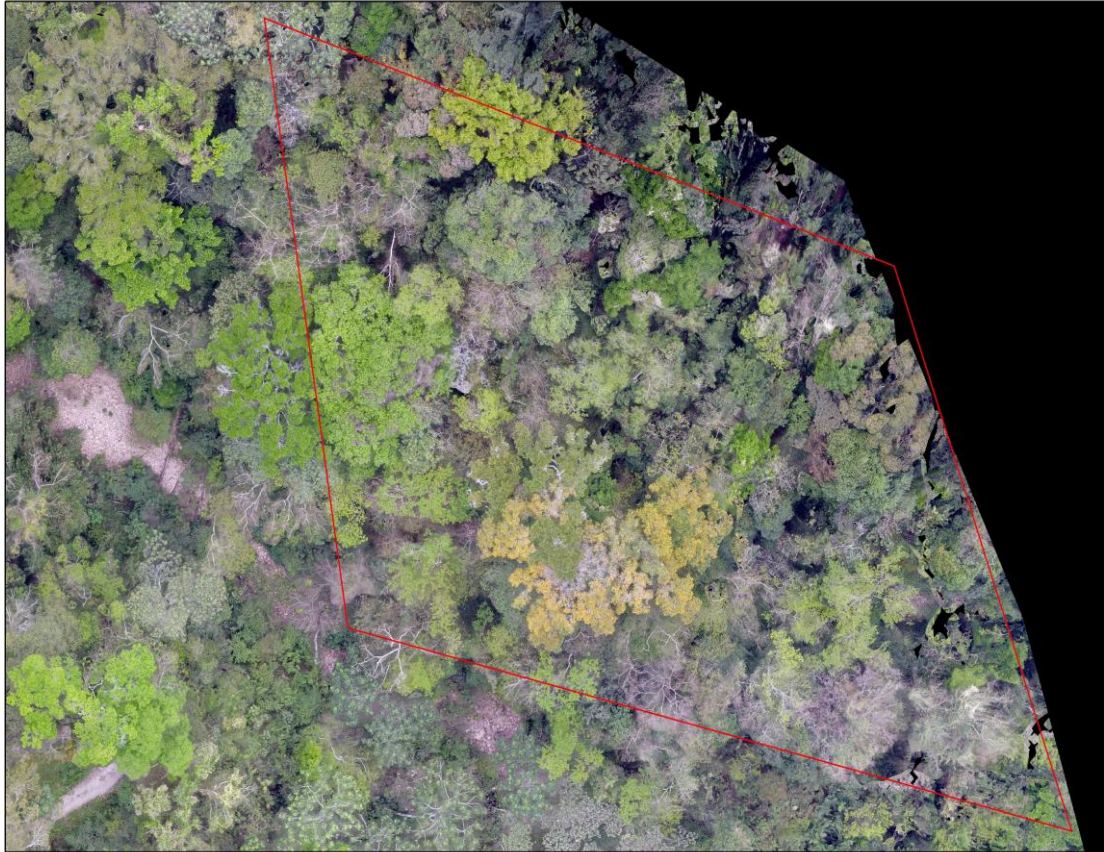
ANEXO 7

ORTOMOSAICO A 60 METROS DE ALTURA



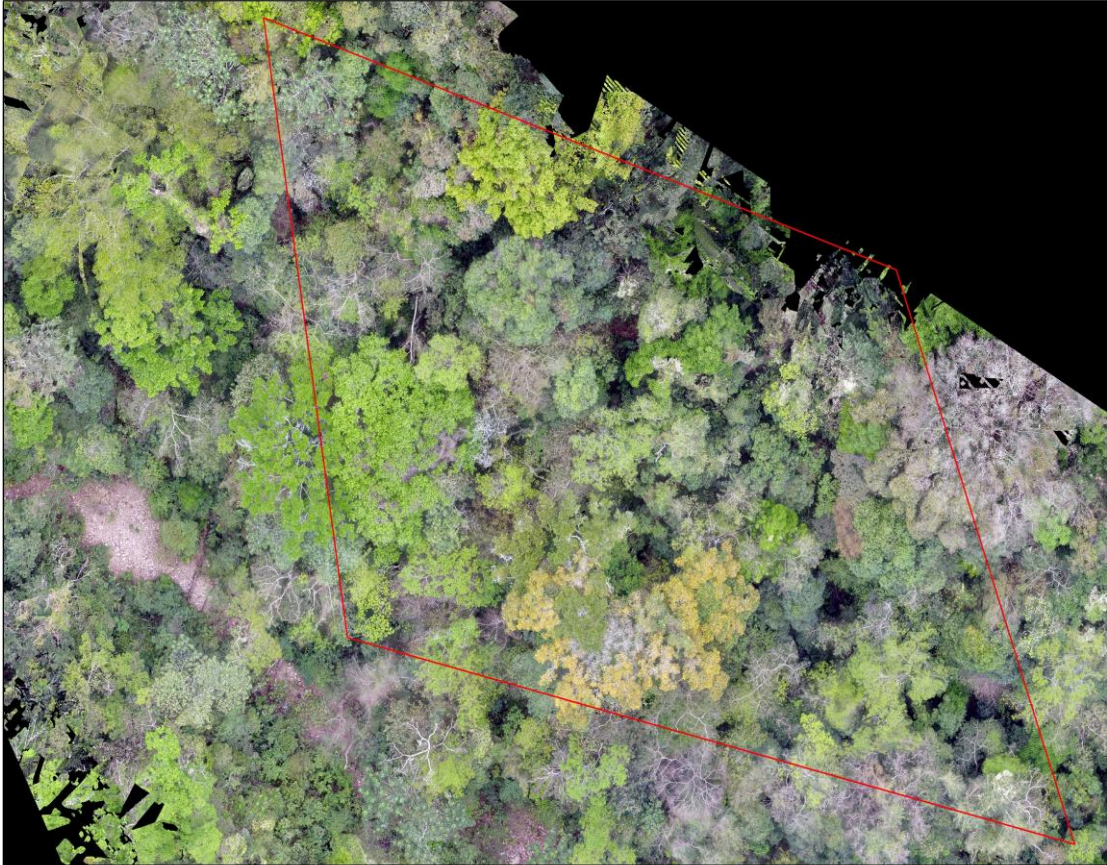
ANEXO 8

ORTOMOSAICO A 70 METROS DE ALTURA



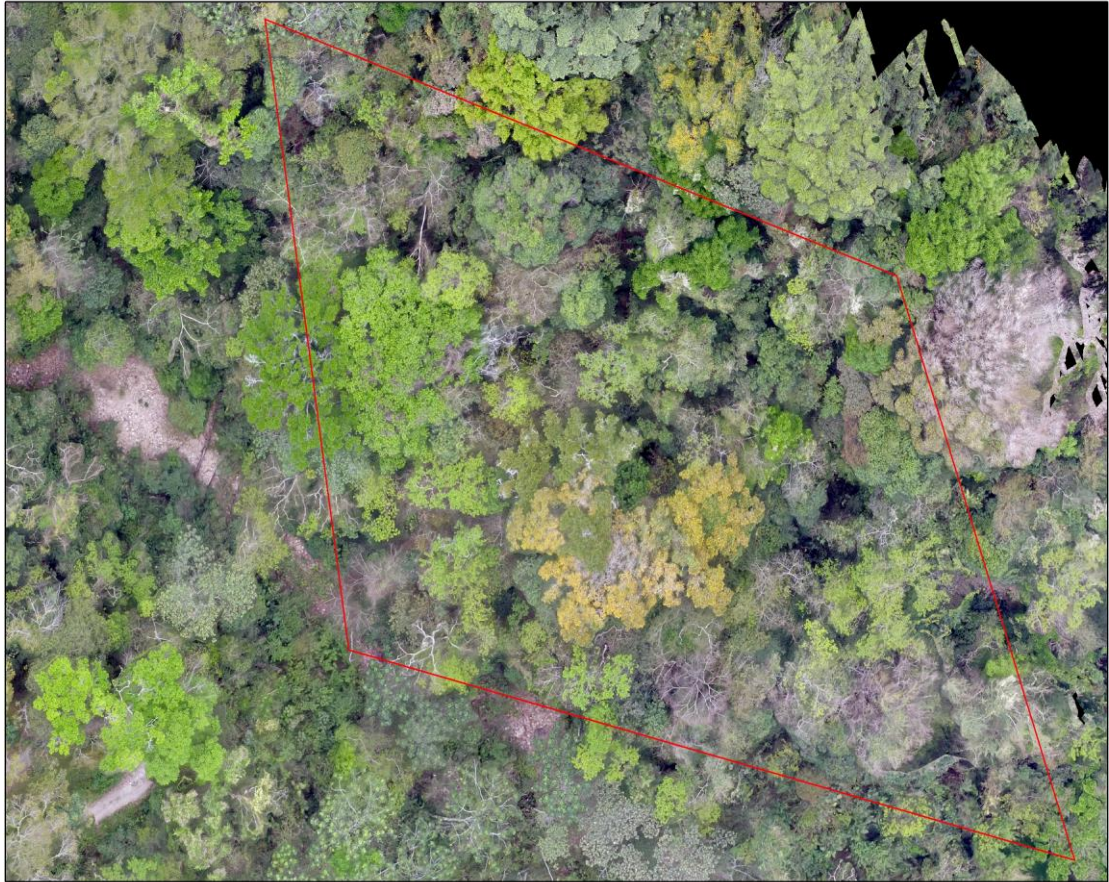
ANEXO 9

ORTOMOSAICO A 80 METROS DE ALTURA



ANEXO 10

ORTOMOSAICO A 90 METROS DE ALTURA



ANEXO 11

ORTOMOSAICO A 150 METROS DE ALTURA



ANEXO 12

SISTEMATIZACIÓN DE LOS DATOS

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
1	0	21,25	21,25	2	2,6	2	2,2
	1,3	20	17,5				
	2	17,5	17,5				
	4	15	15				
	6	12,5	12,5				
	8	12,5	10				
	10	10	10				
	12	7,5	7,5				
	13,8	6,875	5				
2	0	28	28	4,2	5,7	4	4,8
	1,3	21	22,75				
	2	21	22,75				
	4	21	22,75				
	6	21	21				
	8	19,25	19,25				
	10	21	19,25				
	12	21	19,25				
	14	19,25	19,25				
	16	19,25	17,5				
	18	21	17,5				
	19,5	17,5	14				
3	0	42	42	3	3,3	6	5,7
	1,3	31,5	28				
	2	28	28				
	4	28	28				
	6	24,5	28				
	8	24,5	28				
	10	22,75	28				
	12	24,5	24,5				
	14	40,25	24,5				
	14,7	28	28				

(Continuación)

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
4	0	42	35	1	1,5	2,3	3
	1,3	31,5	28				
	2	31,5	28				
	4	28	28				
	6	28	28				
	8	28	28				
	10	28	24,5				
	12	24,5	24,5				
	14	24,5	21				
	16	21	21				
	17	19,25	17,5				
5	0	35	35	3	3,4	4	3
	1,3	20	28				
	2	20	28				
	4	20	28				
	6	20	21				
	8	20	21				
	10	20	21				
	12	20	17,5				
	14	17,5	21				
	16	15	14				
	18	15	14				
	20	15	14				
	21,5	12,5	10,5				
6	0	45,5	45,5	2	4,7	4,6	3,5
	1,3	35	36,75				
	2	35	36,75				
	4	31,5	35				
	6	28	35				
	8	28	28				
	10	24,5	28				
	12	24,5	28				
	14	21	24,5				
	16	21	24,5				
	16,6	21	21				

(Continuación)

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
7	0	49,5	50	5,46	2,1	4,8	2
	1,3	36	40				
	2	36	40				
	4	36	35				
	6	31,5	30				
	8	31,5	26,25				
	10	31,5	26,25				
	12	27	25				
	14	27	20				
	16	18	20				
	18	18	17,5				
	19,35	18	17,5				
8	0	42	48	3,2	3,4	3,2	4
	1,3	36,75	30				
	2	35	30				
	4	31,5	27				
	6	31,5	24				
	8	28	24				
	10	28	24				
	12	28	18				
	14	21	15				
	15	17,5	14,25				
9	0	48	45,5	3,5	3,54	5,5	4,7
	1,3	30	31,5				
	2	30	28				
	4	27	28				
	6	27	24,5				
	8	34,5	22,75				
	10	24	21				
	12	18	17,5				
	14	18	17,5				
	16	15	14				
	17,3	12	14				

(Continuación)

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
10	0	15	20	1,2	3,3	2,9	1,6
	1,3	15	16				
	2	15	20				
	4	15	20				
	6	12,5	16				
	8	10	16				
	10	10	12				
	12	7,5	12				
	14	7,5	10				
	14,4	6,25	10				
11	0	24	27	0,7	4,6	7,8	0,45
	1,3	18	18				
	2	18	18				
	4	15	18				
	6	15	15,75				
	8	12	18				
	10	12	13,5				
	12	12	13,5				
	14	10,5	13,5				
	12	0	28				
1,3		24,5	24				
2		21	24				
4		24,5	18				
6		24,5	18				
8		21	18				
10		21	15				
12		17,5	0				
14		17,5	0				
15,2		15,75	0				

(Continuación)

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
13	0	30	32	2,7	2,8	2	2
	1,3	24	20				
	2	24	20				
	4	24	20				
	6	24	22				
	8	21	20				
	10	21	20				
	12	18	16				
	14	18	16				
14	0	33	33,25	1,5	3,4	1,3	1,5
	1,3	30	28				
	2	27	28				
	4	24	24,5				
	6	24	24,5				
	8	21	24,5				
	10	21	21				
	12	18	21				
	14	15	17,5				
	15,2	15	17,5				
	15	0	20				
1		17,5	15				
1,3		15	12,5				
2		15	12,5				
3		15	12,5				
4		15	12,5				
5		15	10				
6		13,75	10				
7		12,5	10				
8		12,5	10				
9		12,5	10				
10		10	10				
11		10	8,75				

(Continuación)

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
16	0	25	25	3,6	3,2	2,2	3,4
	1	25	20				
	1,3	25	20				
	2	25	20				
	3	22,5	20				
	4	22,5	20				
	5	22,5	17,5				
	6	20	17,5				
	7	20	17,5				
	8	20	17,5				
	8,1	20	17,5				
17	0	54	54	5	4,2	2,8	3,7
	1,3	42,75	40,5				
	2	40,5	40,5				
	4	36	36				
	6	36	36				
	8	31,5	31,5				
	10	31,5	31,5				
	12	31,5	27				
	14	27	27				
	16	27	22,5				
	18	27	22,5				
18	0	32,5	39	2	2,2	2,2	2,1
	1,3	20	18				
	2	20	18				
	4	20	18				
	6	20	18				
	8	17,5	18				
	10	17,5	15				
	12	15	15				
	13,65	15	15				

(Continuación)

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
19	0	40	40	2,6	2,8	3,2	2,8
	1	40	40				
	1,3	40	40				
	2	35	35				
	3	35	30				
	4	32,5	30				
	5	35	25				
	6	32,5	25				
	7	30	22,5				
	8	30	20				
	9	30	20				
9,5	30	20					
20	0	42	40	1,9	2,5	1	1,9
	1	30	32,5				
	1,3	24	30				
	2	24	30				
	3	24	30				
	4	24	25				
	5	24	25				
	6	24	20				
	7	22,5	20				
	7,5	21	20				
21	0	40	42,5	0	5,5	2,5	3,2
	1	40	40				
	1,3	32,5	37,5				
	2	32,5	37,5				
	3	30	37,5				
	4	30	30				
	5	30	30				
	5,8	27,5	27,5				

(Continuación)

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
22	0	33	24	0	4,5	1,5	2,5
	1	24	24				
	1,3	21	20				
	2	21	24				
	3	24	24				
	4	24	24				
	5	21	28				
	6	18	24				
	7	18	24				
	8	15	24				
9	15	24					
23	0	40	50	3,6	3,8	4	4
	1,3	40	40				
	2	40	45				
	4	40	45				
	6	40	35				
	8	35	35				
	10	30	30				
	12	30	30				
	14	30	30				
	15,5	30	30				
24	0	36	35	1	2,4	1,5	3
	1	27	35				
	1,3	24	32,5				
	2	24	31,25				
	3	24	31,25				
	4	22,5	30				
	5	22,5	30				
	6	21	30				
	7	21	27,5				
	8	21	25				

(Continuación)

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
25	0	72	72	7,8	7,6	5,6	10
	1,3	54	45				
	2	52	45				
	4	48	45				
	6	44	40,5				
	8	40	36				
	10	36	33,75				
	12	28	31,5				
	14	28	27				
	14,4	28	27				
26	0	28	28	1	5,6	3,2	4,7
	1,3	28	28				
	2	28	28				
	4	24,5	24,5				
	6	24,5	24,5				
	8	24,5	21				
	10	21	21				
	12	21	21				
	14	17,5	17,5				
	15,75	17,5	17,5				
27	0	38,5	31,5	2	1,8	0,5	2,5
	1,3	28	22,75				
	2	28	24,5				
	4	24,5	24,5				
	6	24,5	24,5				
	8	24,5	24,5				
	10	24,5	24,5				
	12	21	24,5				
	14	21	21				
	14,7	21	21				

(Continuación)

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
28	0	17,5	21	1	5	3	1
	1,3	14	15,75				
	2	14	14				
	4	17,5	14				
	6	14	12,25				
	8	10,5	10,5				
	10	10,5	10,5				
	12	10,5	10,5				
	14	10,5	10,5				
29	0	17,5	18	1	3,3	0,7	2
	1	15	18				
	1,3	13,75	15				
	2	13,75	12				
	3	13,75	12				
	4	12,5	12				
	5	12,5	12				
	6	12,5	10,5				
	7	10	10,5				
	8	10	9				
30	0	35	35	3	3,5	1,7	1,5
	1,3	28	28				
	2	28	28				
	4	24,5	28				
	6	24,5	21				
	8	24,5	21				
	10	24,5	21				
	12	21	21				
	13,6	21	21				

(Continuación)

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
31	0	20	23,75	2,9	3,6	2,8	2,3
	1	20	20				
	1,3	20	20				
	2	20	20				
	3	17,5	18,75				
	4	17,5	20				
	5	20	17,5				
	6	17,5	17,5				
	7	17,5	17,5				
	8	17,5	17,5				
	9	17,5	17,5				
	10	17,5	17,5				
32	0	30	27	3,5	1,6	3,2	1,8
	1,3	19,5	21				
	2	19,5	21				
	4	22,5	21				
	6	18	21				
	8	18	18				
	10	15	18				
	12	15	18				
	12,6	15	18				
33	0	35	35	3,1	3,6	0,45	3,3
	1	32,5	22,5				
	1,3	30	22,5				
	2	27,5	22,5				
	3	25	22,5				
	4	25	21,25				
	5	25	21,25				
	6	22,5	17,5				
	7	22,5	17,5				
	8	22,5	17,5				
	9	22,5	17,5				
	10	20	17,5				
	10,75	20	17,5				

(Continuación)

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
34	0	40	48	0,8	3,4	0,7	3,7
	1	32,5	30				
	1,3	30	27				
	2	30	21				
	3	20	15				
	4	20	12				
	5	17,5	12				
	5,25	17,5	12				
35	0	30	40	2,2	4,7	3,5	0,9
	1,3	25	30				
	2	25	30				
	4	25	20				
	6	15	15				
	8	15	15				
	10	15	15				
	12	15	15				
	14	15	10				
	16	15	10				
	18	15	10				
36	0	32	32	2	2,4	2,5	2,2
	1,3	26	28				
	2	26	28				
	4	24	28				
	6	24	24				
	8	24	24				
	10	24	24				
	12	24	24				
	14	24	20				

(Continuación)

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
37	0	26	24	1,5	1,4	2,6	0,65
	1,3	22	20				
	2	20	20				
	4	16	20				
	6	16	16				
	8	16	16				
	10	16	14				
	12	14	14				
	14	14	12				
	16	14	12				
	18	12	12				
	18,4	12	12				
38	0	32,5	32	0,7	2,8	1,5	2,4
	1	25	32				
	1,3	23,75	26				
	2	23,75	28				
	3	22,5	28				
	4	22,5	28				
	5	20	28				
	6	20	28				
	7	17,5	28				
	8	17,5	28				
39	0	30	25	1,5	1,7	1,2	1,7
	1	27,5	22,5				
	1,3	22,5	20				
	2	22,5	20				
	3	22,5	20				
	4	22,5	20				
	5	22,5	20				
	6	25	20				
	7	20	20				
	7,75	20	20				

(Continuación)

<i>N° Árbol</i>	<i>Altura de medición (m)</i>	<i>Díámetro de la medición 1 (cm)</i>	<i>Díámetro de la medición 2 (cm)</i>	<i>Radio de copa (m)</i>			
				<i>N</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>E</i>
40	0	15	12,5	0,6	1,8	1,8	1,5
	1	10	10				
	1,3	10	10				
	2	7,5	7,5				
	3	7,5	7,5				
	4	7,5	5				
	5	7,5	5				
	6	7,5	5				
41	0	22,5	20	1,3	4	2,5	1,2
	1	20	20				
	1,3	20	17,5				
	2	20	15				
	3	20	15				
	4	20	10				
	5	17,5	10				
	6	17,5	10				
42	0	20	20	1,6	4,7	4,5	1,4
	1,3	15	15				
	2	15	15				
	4	15	15				
	6	15	15				
	8	15	15				
	10	15	15				
	12	15	15				
	14	15	15				
	16	15	15				
	18	15	15				
	19,5	15	15				

(Continuación)

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
43	0	40	40	0	6	0,2	3,1
	1,3	30	30				
	2	32,5	30				
	4	30	30				
	6	30	30				
	8	30	30				
	10	20	30				
	12	20	30				
	14	20	30				
	16	20	30				
	18	20	30				
	19,5	20	30				
44	0	30	30	2,4	2	2	3,3
	1	20	20				
	1,3	20	20				
	2	17,5	20				
	3	17,5	17,5				
	4	15	15				
	5	12,5	15				
	6	10	15				
	7	10	10				
	8	10	10				
	9	10	10				
45	0	28	32	3,15	5	4,5	1,1
	1,3	28	28				
	2	24	28				
	4	24	28				
	6	24	24				
	8	24	24				
	10	24	24				
	12	24	24				
	14	24	20				
	16	24	20				
	17,6	20	16				

(Continuación)

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
46	0	70	70	4	3,8	3,4	4,1
	1,3	45	40				
	2	40	40				
	4	40	40				
	6	55	30				
	8	35	30				
	10	35	30				
	12	35	30				
	14	35	30				
	16	35	30				
	18	35	30				
	20	35	30				
	21,5	35	30				
47	0	65	65	6	6,5	7	5
	1,3	50	45				
	2	50	45				
	4	45	45				
	6	45	40				
	8	35	35				
	10	35	35				
	12	35	35				
	14	35	35				
	16	35	35				
	17	35	35				
48	0	40	36	2,4	2,5	2,2	2,2
	1,3	30	30				
	2	30	30				
	4	26	28				
	6	24	28				
	8	20	20				
	10	16	12				
	12	12	12				
	13,2	12	12				

(Continuación)

N° Árbol	Altura de medición (m)	Diámetro de la medición 1 (cm)	Diámetro de la medición 2 (cm)	Radio de copa (m)			
				N	S	O	E
49	0	110	100	9	8,4	5,7	5,8
	1,3	55	55				
	2	55	55				
	4	52,5	52,5				
	6	45	45				
	8	40	50				
	10	40	50				
	12	40	40				
	14	35	40				
	16	30	40				
	17,5	30	40				
50	0	21	21	2,6	3,5	3,3	2,3
	1,3	21	21				
	2	21	21				
	4	21	14				
	6	17,5	14				
	8	17,5	14				
	10	17,5	14				
	12	17,5	10,5				
	13,3	17,5	10,5				

ANEXO 13

REGRESIÓN DEL MODELO 1

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,816328481
Coefficiente de determinación R²	0,666392189
R² ajustado	0,657613036
Error típico	0,336024701
Observaciones	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	8,57076701	8,570767007	75,9062057	1,36E-10
Residuos	38	4,29067878	0,1129126		
Total	39	12,8614458			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-0,39862762	0,1281233	-3,11128077	0,0035268	-0,6579997	-0,1392555
Variable X 1	0,16747570	0,0192226	8,71241675	1,36E-10	0,1285614	0,2063899

ANEXO 14

REGRESIÓN DEL MODELO 2

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,84386065
Coeficiente de determinación R^2	0,7121008
R^2 ajustado	0,70452451
Error típico	0,31215718
Observaciones	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	9,15864589	9,15864589	93,990643	8,0205E-12
Residuos	38	3,7027999	0,0974421		
Total	39	12,8614458			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0,18808074	0,06629204	2,83715432	0,00726184	0,05387953	0,32228196
Variable X 1	0,00965791	0,00099619	9,69487715	8,0205E-12	0,00764123	0,01167458

ANEXO 15

REGRESIÓN DEL MODELO 3

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,82683101
Coefficiente de determinación R²	0,68364952
R² ajustado	0,6753245
Error típico	0,32721812
Observaciones	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	8,79272118	8,79272118	82,119936	4,8987E-11
Residuos	38	4,06872461	0,1070717		
Total	39	12,8614458			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0,37899804	0,05802899	6,53118459	1,0668E-07	0,2615245	0,49647159
Variable X 1	0,00059226	6,5357E-05	9,06200507	4,8987E-11	0,00045995	0,00072457

ANEXO 16

REGRESIÓN DEL MODELO 4

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>	0,81632848
<i>Coefficiente de determinación R²</i>	0,66639219
<i>R² ajustado</i>	0,65761304
<i>Error típico</i>	0,3360247
<i>Observaciones</i>	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<i>Regresión</i>	1	8,57076701	8,57076701	75,9062057	1,36E-10
<i>Residuos</i>	38	4,29067878	0,1129126		
<i>Total</i>	39	12,8614458			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	-0,39862763	0,12812332	-3,11128077	0,00352682	-0,65799973	-0,13925552
<i>Variable X 1</i>	0,33495141	0,03844529	8,71241675	1,36E-10	0,25712299	0,41277984

ANEXO 17

REGRESIÓN DEL MODELO 5

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>	0,84387051
<i>Coefficiente de determinación R²</i>	0,71211745
<i>R² ajustado</i>	0,69655623
<i>Error típico</i>	0,31633825
<i>Observaciones</i>	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<i>Regresión</i>	2	9,158859917	4,57942996	45,762317	9,8966E-11
<i>Residuos</i>	37	3,702585872	0,10006989		
<i>Total</i>	39	12,86144579			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	0,20041214	0,274973011	0,72884296	0,47068619	-0,3567361	0,75756038
<i>Variable X 1</i>	-0,00336491	0,072758912	-0,04624733	0,96336184	-0,15078846	0,14405865
<i>Variable X 2</i>	0,00983973	0,004058932	2,42421573	0,02034552	0,00161555	0,0180639

ANEXO 18

REGRESIÓN DEL MODELO 6

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>	0,85071052
<i>Coefficiente de determinación R²</i>	0,72370838
<i>R² ajustado</i>	0,70068408
<i>Error típico</i>	0,31417925
<i>Observaciones</i>	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<i>Regresión</i>	3	9,30793612	3,10264537	31,4323708	3,6955E-10
<i>Residuos</i>	36	3,55350967	0,0987086		
<i>Total</i>	39	12,8614458			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	1,09939442	0,78083215	1,40797792	0,16771494	-0,48420657	2,68299541
<i>Variable X 1</i>	-0,41283139	0,34093591	-1,21087685	0,23383224	-1,10428146	0,27861867
<i>Variable X 2</i>	0,06388562	0,04416243	1,44660556	0,15665895	-0,02567995	0,15345119
<i>Variable X 3</i>	-0,00203071	0,00165243	-1,22892862	0,22707138	-0,00538199	0,00132056

ANEXO 19

REGRESIÓN DEL MODELO 7

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,77728969
Coefficiente de determinación R^2	0,60417927
R^2 ajustado	0,59376293
Error típico	0,36601793
Observaciones	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	7,77061891	7,77061891	58,0030564	3,6663E-09
Residuos	38	5,09082688	0,13396913		
Total	39	12,8614458			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-1,49456182	0,28324741	-5,27652412	5,5806E-06	-2,06796623	-0,9211574
Variable X 1	0,8759332	0,11501263	7,61597376	3,6663E-09	0,6431023	1,10876411

ANEXO 20

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 7

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>	0,88808008
<i>Coefficiente de determinación R²</i>	0,78868624
<i>R² ajustado</i>	0,75680956
<i>Error típico</i>	0,05114729
<i>Observaciones</i>	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<i>Regresión</i>	2	0,37102682	0,18551341	70,913689	2,1964E-13
<i>Residuos</i>	38	0,09940972	0,00261605		
<i>Total</i>	40	0,47043654			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
<i>Variable X 1</i>	0,19188913	0,05854099	3,27785951	0,00224079	0,0733791	0,3103991
<i>Variable X 2</i>	0,00957218	0,00179126	5,34383616	4,5158E-06	0,00594597	0,0131983

ANEXO 21

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 8

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,88317773
Coefficiente de determinación R²	0,7800029
R² ajustado	0,74789771
Error típico	0,04371616
Observaciones	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	0,25748194	0,12874097	67,3647741	4,6462E-13
Residuos	38	0,07262188	0,0019111		
Total	40	0,33010382			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	0,19108697	0,05888764	3,24494179	0,00245292	0,07187517	0,3102987
Variable X 2	0,0095909	0,00191438	5,00991445	1,2872E-05	0,00571543	0,0134663

ANEXO 22

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 9

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,87834191
Coefficiente de determinación R²	0,77148451
R² ajustado	0,73915515
Error típico	0,03747766
Observaciones	40

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,18019386	0,09009693	64,1453471	9,4219E-13
Residuos	38	0,05337384	0,00140457		
Total	40	0,2335677			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	0,18981813	0,05934325	3,19864732	0,00278379	0,069684	0,30995226
Variable X 2	0,00962629	0,0020447	4,70793512	3,2916E-05	0,00548702	0,01376556

ANEXO 23

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 10

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>	0,873599625
<i>Coefficiente de determinación R²</i>	0,763176305
<i>R² ajustado</i>	0,730628313
<i>Error típico</i>	0,032216741
<i>Observaciones</i>	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<i>Regresión</i>	2	0,127100285	0,063550142	61,22845841	1,8316E-12
<i>Residuos</i>	38	0,039440898	0,001037918		
<i>Total</i>	40	0,166541183			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
<i>Variable X 1</i>	0,188034514	0,059889897	3,139669989	0,003266905	0,066793755	0,309275272
<i>Variable X 2</i>	0,009682189	0,002181769	4,437770828	7,55195E-05	0,005265429	0,014098949

ANEXO 24

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 11

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>	0,86897263
<i>Coefficiente de determinación R²</i>	0,75511344
<i>R² ajustado</i>	0,72235327
<i>Error típico</i>	0,0277617
<i>Observaciones</i>	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<i>Regresión</i>	2	0,09030729	0,04515365	58,5869448	3,4161E-12
<i>Residuos</i>	38	0,02928705	0,00077071		
<i>Total</i>	40	0,11959434			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
<i>Variable X 1</i>	0,1856968	0,06051168	3,0687759	0,0039527	0,0631973	0,3081962
<i>Variable X 2</i>	0,00976239	0,00232514	4,1986197	0,0001559	0,0050553	0,014469

ANEXO 25

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 12

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,86447836
Coefficiente de determinación R²	0,74732283
R² ajustado	0,71435764
Error típico	0,02397459
Observaciones	40

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,06459934	0,03229967	56,1947631	6,1208E-12
Residuos	38	0,02184167	0,00057478		
Total	40	0,08644101			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	0,1827752	0,06119473	2,98678012	0,00491512	0,05889295	0,30665745
Variable X 2	0,00987057	0,00247434	3,9891763	0,0002916	0,00486154	0,01487961

ANEXO 26

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 13

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,86013086
Coefficiente de determinación R^2	0,7398251
R^2 ajustado	0,7066626
Error típico	0,02074395
Observaciones	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	0,04649755	0,02324878	54,0277968	1,0552E-11
Residuos	38	0,01635183	0,00043031		
Total	40	0,06284939			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	0,17924961	0,06192711	2,89452557	0,00625961	0,05388473	0,3046145
Variable X 2	0,01001017	0,00262887	3,80778449	0,00049727	0,0046883	0,01533205

ANEXO 27

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 14

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>	0,36801927
<i>Coefficiente de determinación R²</i>	0,13543818
<i>R² ajustado</i>	0,11268656
<i>Error típico</i>	0,01180303
<i>Observaciones</i>	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<i>Regresión</i>	1	0,00082931	0,00082931	5,952901	0,01946963
<i>Residuos</i>	38	0,00529383	0,00013931		
<i>Total</i>	39	0,00612314			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	0,01093965	0,00329105	3,32405671	0,00197235	0,00427726	0,0176020
<i>Variable X 1</i>	0,15901224	0,06517278	2,43985676	0,01946963	0,02707685	0,2909476

ANEXO 28

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 15

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,88057184
Coefficiente de determinación R²	0,77540677
R² ajustado	0,74318063
Error típico	0,05272991
Observaciones	40

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,36477968	0,18238984	65,5973842	6,8265E-13
Residuos	38	0,10565686	0,00278044		
Total	40	0,47043654			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	0,32069149	0,04569749	7,01770434	2,3274E-08	0,22818175	0,4132012
Variable X 2	0,00069493	0,00014005	4,96198649	1,4949E-05	0,00041141	0,0009784

ANEXO 29

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 16

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,87549678
Coefficiente de determinación R^2	0,76649461
R^2 ajustado	0,73403395
Error típico	0,04503829
Observaciones	40

Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,2530228	0,1265114	62,3685728	1,4085E-12
Residuos	38	0,07708102	0,00202845		
Total	40	0,33010382			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	0,3151696	0,04542755	6,93785175	2,985E-08	0,22320634	0,40713287
Variable X 2	0,00071248	0,00015384	4,63130135	4,1703E-05	0,00040105	0,00102391

ANEXO 30

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 17

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,87045512
Coefficiente de determinación R²	0,75769212
R² ajustado	0,72499981
Error típico	0,0385921
Observaciones	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	0,1769724	0,0884862	59,4126369	2,805E-12
Residuos	38	0,05659529	0,00148935		
Total	40	0,2335677			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	0,30960616	0,04526114	6,8404406	4,05E-08	0,21797976	0,4012325
Variable X 2	0,00073221	0,00016914	4,32897509	0,00010517	0,0003898	0,0010746

ANEXO 31

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 18

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>	0,86547565
<i>Coefficiente de determinación R²</i>	0,7490481
<i>R² ajustado</i>	0,71612832
<i>Error típico</i>	0,0331638
<i>Observaciones</i>	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<i>Regresión</i>	2	0,12474736	0,06237368	56,7117216	5,3876E-12
<i>Residuos</i>	38	0,04179383	0,00109984		
<i>Total</i>	40	0,16654118			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
<i>Variable X 1</i>	0,30398158	0,04518552	6,72741097	5,76E-08	0,21250827	0,3954548
<i>Variable X 2</i>	0,0007544	0,00018603	4,05533458	0,00023955	0,00037781	0,0011309

ANEXO 32

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 19

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>	0,8605825
<i>Coefficiente de determinación R²</i>	0,74060224
<i>R² ajustado</i>	0,7074602
<i>Error típico</i>	0,02857239
<i>Observaciones</i>	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<i>Regresión</i>	2	0,08857184	0,04428592	54,2465855	9,9803E-12
<i>Residuos</i>	38	0,0310225	0,00081638		
<i>Total</i>	40	0,11959434			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
<i>Variable X 1</i>	0,29827805	0,04518922	6,60064607	8,5763E-08	0,20679726	0,38975884
<i>Variable X 2</i>	0,00077937	0,00020456	3,81004594	0,000494	0,00036527	0,00119347

ANEXO 33

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 20

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>	0,85579557
<i>Coefficiente de determinación R²</i>	0,73238606
<i>R² ajustado</i>	0,69902779
<i>Error típico</i>	0,02467303
<i>Observaciones</i>	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<i>Regresión</i>	2	0,06330819	0,03165409	51,997795	1,7841E-11
<i>Residuos</i>	38	0,02313282	0,00060876		
<i>Total</i>	40	0,08644101			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
<i>Variable X 1</i>	0,29247966	0,04526188	6,46194296	1,3262E-07	0,20085179	0,38410754
<i>Variable X 2</i>	0,00080744	0,00022477	3,59226444	0,00092693	0,00035241	0,00126246

ANEXO 34

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 21

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>	0,85113115
<i>Coefficiente de determinación R²</i>	0,72442423
<i>R² ajustado</i>	0,69085645
<i>Error típico</i>	0,02134908
<i>Observaciones</i>	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<i>Regresión</i>	2	0,04552962	0,02276481	49,9465553	3,0809E-11
<i>Residuos</i>	38	0,01731977	0,00045578		
<i>Total</i>	40	0,06284939			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
<i>Variable X 1</i>	0,28657252	0,04539407	6,31299429	2,12E-07	0,19467703	0,3784680
<i>Variable X 2</i>	0,00083896	0,0002467	3,40077108	0,00159309	0,00033955	0,0013383

ANEXO 35

REGRESIÓN DEL MODELO PONDERADO 22

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,83393574
Coefficiente de determinación R^2	0,69544882
R^2 ajustado	0,66111853
Error típico	0,01215949
Observaciones	40

Análisis de varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	0,01282978	0,00641489	43,3868867	1,9866E-10
Residuos	38	0,00561842	0,00014785		
Total	40	0,0184482			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico</i>		<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
			<i>t</i>	<i>Probabilidad</i>		
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	0,26165153	0,04635632	5,64435483	1,7508E-06	0,16780806	0,355495
Variable X 2	0,00100666	0,00035121	2,8663012	0,0067353	0,00029568	0,0017176