

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DE
BIOMASA AÉREA DE *Eucalyptus*
globulus LABILL DE PLANTACIONES EN
CERCOS VIVOS, DISTRITO DE HUERTAS,
JUNÍN**

Presentado por:

Jean Carlos Valverde Quiroz

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL**

Lima - Perú
2017

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos para calificar la sustentación del Trabajo de Tesis, titulado “**Determinación de la ecuación de biomasa aérea de *Eucalyptus globulus* Labill de plantaciones en cercos vivos, distrito de Huertas, Junín**”, presentada por el Bach. **JEAN CARLOS VALVERDE QUIROZ**

Oídas las observaciones y las respuestas 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, 3 de Noviembre de 2016

.....
Dr. Carlos Reynel Rodriguez
Presidente

.....
Ing. Carlos Vargas Salas
Miembro

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

.....
M. Sc. Víctor Barrena Arroyo
Asesor

.....
Mg. Sc. Roxana Guillén Quispe
Coasesor

DEDICATORIA

A mis PADRES y HERMANOS por apoyarme y alentarme a alcanzar mis metas.

A mis AMIGOS por estar presentes en los momentos difíciles.

A Linda por su amor, comprensión y apoyo incondicional en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento

Al M. Sc. Víctor Barrena Arroyo mi asesor y a la Mg. Sc. Roxana Guillén mi coasesora, por sus guías en la mayor parte del trabajo de tesis.

Al Círculo de Investigación y Conservación en el Ámbito Forestal (CICAF), por su apoyo en la realización de las labores en la fase de campo del trabajo de tesis. Mi eterno agradecimiento a Efraín Suárez, Erick Suárez, Jorge Luis Cornejo, Pablo Chenchin, Melissa Huamantínco, Yury Llancari, Paola Monzon, José Carlos Quispe, Manuel Gerardo, Luis Enrique Ttito y Alex Machacuay.

A mi amigo, Rolando Montenegro por su apoyo en el análisis estadístico, excelente mentor y gran profesional.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar una ecuación para la estimación de la biomasa aérea de los árboles de *Eucalyptus globulus* Labill, plantados en forma de linderos en el distrito de Huertas provincia de Jauja del departamento de Junín, de una muestra de 40 árboles con diámetro a la altura del pecho superior a los 15 cm. Se utilizó la metodología del muestreo destructivo, separando cada componente del árbol y tomando muestras para su análisis en el laboratorio. La metodología utilizada para construir la ecuación de biomasa aérea a partir de los datos recogidos en campo se basó en la regresión lineal aplicando el método de mínimos cuadrados y mínimos cuadrados ponderados. Los modelos previamente seleccionados fueron sometidos a pruebas estadísticas con la finalidad de identificar el modelo que muestra mejores resultados. Estas pruebas fueron: prueba de bondad de ajuste, donde todos los modelos presentaron R^2 superior a 80 por ciento; pruebas de significancia Fisher y t-student, aquellos modelos que no cumplían con la significancia del modelo o uno de sus variables fueron descartados; análisis de residuos, se llevó de forma gráfica. Aquellos modelos que no cumplían con los supuestos de homocedasticidad de errores, linealidad y normalidad, fueron ponderados hasta lograr el ajuste adecuado, que cumpla con los supuestos mencionados. Finalmente, se realizó el análisis por el índice de Furnival para modelos ponderados, donde el modelo que presentó los menores valores fue seleccionado como el modelo con el mejor ajuste y precisión para el cálculo de la biomasa aérea para la especie de *Eucalyptus globulus* Labill.

Palabras clave: Ecuación, Eucalyptus, Estimación, Biomasa, cerca viva

ÍNDICE GENERAL

	Página
I. Introducción	1
II. Revisión de Literatura	3
1. Descripción de la especie	3
1.1. Taxonomía	4
1.2. Descripción dendrológica.....	4
1.3. Descripción anatómica	5
1.4. Densidad	5
1.5. Usos del eucalipto en el Perú	6
2. Biomasa Forestal	6
2.1. Estimación de biomasa aérea	7
2.2. Regresión lineal simple	8
2.3. Regresión lineal multiple.....	8
2.4. Análisis de regresión por el método de mínimos cuadrados	9
2.5. Bondad del ajuste	10
2.6. Análisis de varianzas (anova).....	11
2.7. Pruebas de significación (fisher y t-student)	11
2.8. Análisis de residuos.....	12
2.9. Regresión de modelos ponderados	15
2.10. Índice de furnival.....	15
2.11. Biomasa en el <i>Eucalyptus globulus</i> LABILL.	16
3. Cambio climático	16
3.1. Proyecciones y escenarios del efecto del cambio climático.....	17
3.2. Acuerdos internacionales suscritos por Perú	19
4. Otros estudios similares	20
III. Materiales y Métodos	23
1. Zona de estudio	23
1.1. Localización geográfica.....	23
1.2. Clima	23
2. Materiales, equipos y herramientas	25
2.1. Materiales.....	25
2.2. Equipos e instrumentos	25
2.3. Herramientas.....	26
3. Metodología	26
3.1. Fase de campo.....	28
3.1.1. Selección de la muestra de árboles.....	28
3.1.2. Planificación de trabajo de campo	28
3.1.3. Capacitación de los equipos de trabajo	29
3.1.4. Medición de biomasa	29
a. Medición del árbol en pie.....	29
b. Tumbado del árbol.....	29
c. Medición del árbol tumbado	30
d. Desrame y trozado	30
e. Medición del peso de los componentes.....	31
f. Obtención de rodajas	33
g. Acopio	33
3.1.5. Transporte.....	34

3.2.	Fase de laboratorio.....	34
3.2.1.	Preparación de las probetas.....	34
3.2.2.	Determinación y análisis del contenido de humedad y densidad	35
a.	Densidad básica	35
b.	Contenido de humedad.....	35
3.3.	Fase de procesamiento	35
3.3.1.	Calculo de biomasa.....	35
3.3.2.	Elaboración de la ecuación de biomasa aérea	36
a.	Evaluación previa de los datos.....	36
b.	Selección de los modelos.....	36
c.	Análisis de regresión.....	37
d.	Bondad del ajuste de las ecuaciones.....	37
e.	Prueba de significancia Fisher	38
f.	Prueba de significancia t-student.....	38
g.	Análisis de los residuos.....	39
h.	Regresión por mínimos cuadrados ponderados.	39
h.1.	Ponderación	39
h.2.	Análisis estadístico de los modelos ponderados.....	40
i.	Índice de Furnival para modelos ponderadas.	40
3.3.3.	Selección del mejor modelo.....	40
3.3.4.	Obtención de coeficientes para ecuaciones ponderadas.....	41
3.3.5.	Precisión de la ecuación y verificación de los supuestos de la regresión	41
IV.	Resultados y discusión	43
1.	Elección de árboles	43
2.	Planificación de trabajo de campo	43
3.	Capacitación de los equipos de trabajo	43
4.	Medición de biomasa	44
4.1.	Medidas del árbol en pie	44
4.2.	Tumbado del árbol.....	46
4.3.	Medición del árbol tumbado	48
4.4.	Desrame y trozado.....	48
4.5.	Medición de los pesos de cada componente y obtención de rodajas.	50
4.6.	Acopio	51
4.7.	Transporte.....	52
5.	Fase de laboratorio.....	52
5.1.	Preparación de las probetas y muestras	52
5.2.	Densidad.....	54
5.3.	Contenido de humedad.....	57
6.	Procesamiento de los datos	61
6.1.	Calculo de Biomasa.....	61
6.2.	Elaboración de la ecuación de biomasa	64
6.2.1.	Evaluación previa de los datos.....	64
6.2.2.	Análisis de regresión.....	65
6.2.3.	Bondad del ajuste.....	65
6.2.4.	Prueba de significación fisher	67
6.2.5.	Prueba de significación t-student.....	68
6.2.6.	Análisis de los residuos	69
6.2.7.	Análisis de regresión por mínimos cuadrados ponderados.....	70
a.	Ponderación.....	70
b.	Bondad de ajuste para modelos ponderados.	70
c.	Análisis de significancia Fisher para los modelos ponderados.....	71
d.	Análisis de significancia t-student para los modelos ponderados.	71
e.	Análisis de residuos para los modelos ponderados.....	72

f.	Índice de Furnival para ecuaciones ponderadas	72
6.2.8.	Selección del mejor modelo.....	73
6.2.9.	Obtención de coeficientes para la ecuación ponderada.....	73
6.2.10.	Precisión de la ecuación y verificación de los supuestos de la regresión.....	74
V.	Conclusiones.....	77
VI.	Recomendaciones.....	79
VII.	Referencias bibliográficas.....	81
VIII.	Anexos.....	87

Índice de tablas

	Página
Tabla 1:	Principales tratados ambientales suscritos por Perú..... 20
Tabla 2:	Modelos para la estimación de biomasa aérea. 36
Tabla 3:	Criterio de decisión para la prueba de significancia Fisher. 38
Tabla 4:	Criterio de decisión para la prueba de significancia t-student. 39
Tabla 5:	DAP y alturas de árboles en pie para 40 individuos de las plantaciones de E. globulus. 45
Tabla 6:	Alturas de corte para cada árbol..... 47
Tabla 7:	Medidas del árbol tumbado (largo del fuste)..... 48
Tabla 8:	Densidad Básica por cada componente de 40 árboles de E. globulus. 55
Tabla 9:	Contenido de humedad componente de 40 árboles de E. globulus. 59
Tabla 10:	Resultados de la biomasa aérea por componente de 40 árboles de E. globulus. 61
Tabla 11:	Resultado del análisis de regresión y selección de los modelos de mayor R2. 66
Tabla 12:	Resultados de la prueba de significancia Fisher..... 67
Tabla 13:	Resultados de la prueba de significancia t-student..... 68
Tabla 14:	Coficiente de determinación para los modelos ponderados..... 71
Tabla 15:	Resultados del análisis Fisher para los modelos ponderados..... 71
Tabla 16:	Resultados del análisis t-student para los modelos ponderados..... 72
Tabla 17:	Índice de Furnival para las ecuaciones ponderadas. 73
Tabla 18:	Ecuación antes y después de la ponderación..... 74

Índice de figuras

	Página
Figura 1: No se detecta ningún problema.....	12
Figura 2: El ajuste lineal no es adecuado.	13
Figura 3: Ajuste lineal mal calculado.	13
Figura 4: Existe heterocedasticidad.	13
Figura 5: Ajuste no lineal y heterocedasticidad.	14
Figura 6: Existencia de datos atípicos.	14
Figura 7: Histograma de los residuos.	15
Figura 8: Gama de predicciones para las emisiones de GEI y el calentamiento global	18
Figura 9: Distribución porcentual de las emisiones de GEI para el 2010.	19
Figura 10: Mapa de ubicación de los linderos plantados de <i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	24
Figura 11: Secuencia metodológica para la medición de biomasa y construcción de la ecuación.	27
Figura 12: Medición de alturas del árbol en pie.	30
Figura 13: Componentes del árbol para su análisis y obtención de rodajas.	32
Figura 14: Estructura para el pesado.	33
Figura 15: Obtención de probetas obtenidas de las rodajas y ramas gruesas.	34
Figura 16: Medición en campo de alturas y DAP de los árboles.....	44
Figura 17: Relación de las alturas totales (m) con los DAP (cm) de los 40 árboles.	46
Figura 18: Tumbado de los árboles.	47
Figura 19: Desrame con motosierra.....	49
Figura 20: Separación de las ramas gruesas y copa del árbol.....	49
Figura 21: Pesado de hojas (a) y ramas (b). Balanza romana digital (c).	50
Figura 22: Pesado de trozas (a) y obtención de rodajas (b).	51
Figura 23: Acopio de las trozas.	52
Figura 24: Preparación de las muestras de hojas.....	53
Figura 25: Preparación de las probetas del fuste y corteza.	53
Figura 26: Obtención del volumen saturado para la determinación de densidad básica.	54
Figura 27: Saturación de las probetas para el cálculo de volumen saturado.	55
Figura 28: Densidad básica promedio por sección del árbol.	56
Figura 29: Secado en estufa de las probetas de madera, corteza y hojas hasta su estado anhidro.	57

Figura 30:	Contenido de humedad por componentes del árbol	58
Figura 31:	Biomasa promedio por componente del árbol.....	63
Figura 32:	Biomasa total y aumento porcentual entre clase diamétrica.	64
Figura 33:	Relación entre la biomasa total y el dap de los 40 árboles de <i>E. globulus</i>	65
Figura 34:	Relación entre la biomasa total y la altura total de los 40 árboles de <i>E. globulus</i>	65
Figura 35:	Gráfica de residuos para los modelos sin ponderar.....	69
Figura 36:	Gráficos de residuos para los modelos ponderados.	72
Figura 37:	Distribución de la biomasa estimada con la ecuación final y la biomasa real de los 39 árboles de <i>E. globulus</i>	75
Figura 38:	Distribución de los residuos para la ecuación seleccionada.	75
Figura 39:	Intervalos de confianza para la ecuación de biomasa.	76

Índice de Anexos

	Página
Anexo 1 Ficha para levantamiento de información en campo	87
Anexo 2 Pesos húmedos registrados en la fase de campo.....	88
Anexo 3 Tablas resumen del análisis de regresión mediante la herramienta de Excel 2010 (modelos no ponderados)	89
Anexo 4 Tablas resumen del análisis de regresión mediante la herramienta de Excel 2010 (modelos ponderados)	117
Anexo 5 Análisis de residuos de los modelos a distintos coeficientes de ponderación	121

I. INTRODUCCIÓN

Existe una biomasa óptima naturalmente sustentable para cada sitio, que depende de la disponibilidad de nutrientes, precipitaciones, capacidad de retención de agua del suelo y de las prácticas de manejo del sitio (Noble y Herbert 1989).

Las “Ecuaciones de Biomasa” nos permiten estimar la cantidad de biomasa que contiene un árbol en función de algunas de sus características, como su diámetro a la altura de pecho y altura de fuste. Estas ecuaciones se obtienen por medio de un análisis de regresión.

En el Perú la especie de *Eucalyptus globulus* Labill fue introducida en la sierra a finales del siglo XIX, logrando una buena adaptación y aceptación por las poblaciones rurales debido a su rápido crecimiento y capacidad de rebrote.

Con respecto a la biomasa aérea de plantaciones de *E. globulus*, se ha observado que a medida que se desarrolla la especie, la distribución porcentual de los distintos componentes de biomasa aérea (copa, ramas, fuste y corteza) registran un cambio natural con la edad, aumentando la proporción de madera, disminuyendo la de las ramas y hojas, mientras que la corteza después de algunos años se mantiene relativamente constante (Bonomelli y Suárez 1999, Aparicio 2001, Saavedra 2005).

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo obtener la mejor ecuación para la estimación de biomasa aérea, de las plantaciones en linderos o cercos vivos de *E. globulus* mediante el método de análisis destructivo para 40 árboles del distrito de Huertas, (ubicados en la margen izquierda del río Yacus) provincia de Jauja, departamento de Junín, Perú. Así mismo, los objetivos específicos consisten en estimar la biomasa aérea para los 40 árboles de *E. globulus* y comprobar que la metodología planteada permite determinar la mejor ecuación para la estimación de biomasa aérea utilizando el análisis de regresión basado en el método de mínimos cuadrados y mínimos cuadrados ponderados.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

1. DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE

FAO (1981) y Brooker (2000) caracterizan a la especie de la siguiente manera:

Nombre Científico: *Eucalyptus globulus* Labill

Nombre Común:

Perú: eucalipto

Bolivia: eucalipto macho, eucalipto

Ecuador: eucalipto común

Colombia: eucalipto común, eucalipto plateado

Familia: Myrtaceae

Altitudes: 1500 a 3100 m.s.n.m. para Perú y Ecuador

Zonas de vida: Bosque Montano bajo (b-MB) y presenta un buen comportamiento en zonas tropicales.

Morales (1973) menciona: “Con base en los resultados encontrados para esta especie, se puede notar una condición ecológica muy acentuada. Sin embargo, posee una gran plasticidad, quizá más que ninguna otra especie forestal en el mundo, para acomodarse a condiciones ambientales distintas de las predominantes en su hábitat original”. Tortorelli, citado por Morales (1973), encontró en la sierra peruana crecimientos de *E. globulus* de 35m³/ha/año, que son superiores a los mejores de la especie en su hábitat original, en elevaciones de 2800 a 3300 m.

1.1. TAXONOMÍA

Clasificación taxonómica según los sistemas de: Julio Sachs, Carlos Prantl y Wettstein, citada por Huamán (1972):

Reino.....	Vegetal
Sub Reino.....	Cormofitos
División.....	Fanerógamas
Sub División.....	Angiospermas
Clase.....	Dicotiledóneas
Sub Clase.....	Dialipétalas
Orden.....	Mirtiflorales
Familia.....	Myrtáceae
Sub Familia.....	Leptospermoideae
Tribu.....	Leptospermeae
Sub tribu.....	Eucalyptinae
Género.....	Eucalyptus
Especie.....	Globulus

1.2. DESCRIPCIÓN DENDROLÓGICA

Orwa *et al.* (2009) describen al *E. globulus* como un árbol de hoja perenne grande a muy grande de 40-55 (máx. 60) m de altura. De hojas alternas, amarillentas de 1,5 - 4 cm, lanceoladas, 10-30 cm de largo, 2,5-5 cm de ancho, en su mayoría curva o en forma hoz, de punta larga en la punta y corta en la base, borde no dentado, glabras, grueso, coriácea, con fina venas rectas, brillante, de color verde oscuro en ambas superficies, aromático, con un olor parecido el de alcanfor. Lanzara y Pizzetti (1978) mencionan que alcanza más de 40 m de altura. Las hojas jóvenes son redondas, sésiles y opuestas, mientras que en la madurez se hacen lanceoladas, pecioladas, alternas y aromáticas. Así mismo Montes (1981) menciona que la forma de las hojas es lanceolada, su tamaño varía entre individuos y dentro del mismo árbol.

Orwa *et al.* (2009) añaden que es de tronco recto de 0,6 - 2 m de diámetro; de estrecha copa irregular de grandes ramas y follaje aromático; corteza lisa, gris moteado, marrón y verde o azulado, que se pela en tiras largas, convirtiéndose la base de color gris, áspera y pubescente; sistema radicular profundo. USAID *et al.* (2004) y Bueno (1972) coinciden en que la madera de eucalipto tiene albura de color marrón muy pálido con transición gradual a duramen de color amarillento claro a gris rosáceo. Añaden que presenta un vetado

acentuado definido por líneas vasculares y bolsas de resinas que pueden llegar a ser muy abundantes.

Orwa *et al.* (2009) señalan que posee una flor (raramente 2-3) en la base de la hoja, tallo aplanado, estambres blancos de unos 12-15 mm de largo. Frutas o cápsulas de semillas individual en la base de la hoja, en forma redondeadas, 1,5-5 x 2-2,5 cm, muchas semillas irregularmente elíptica, de 2-3 mm de largo, sin brillo. Lanzara y Pizzetti (1978), Las flores son solitarias, a veces reunidas en grupos de dos o tres, están provistas de peciolo corto y consisten en un cáliz piramidal invertido y un opérculo que se desprende al alcanzar la madurez, formado por cuatro pétalos soldados entre sí.

1.3. DESCRIPCIÓN ANATÓMICA

Villegas y Rivera (2002) observaron una gran variabilidad en la distribución de los vasos entre individuos y dentro de un mismo individuo. Leal *et al.* (2003) refiere para el *E. globulus* una frecuencia de 23,58 vasos/mm². Los vasos son en su mayoría solitarios y se encuentran en disposición radial. Villegas y Rivera (2002) observaron vasos con disposición tangencial en la misma especie, además de no encontrar diferencias significativas entre orígenes para el porcentaje de vasos solitarios. De acuerdo a Malan, citado por Villegas y Rivera (2002), la longitud de las fibras se incrementa rápidamente con la distancia hasta unos 8 a 16 años, además de encontrar diferencias significativas en la longitud de fibras entre distancias a la médula.

USAID *et al.* (2004) mencionan la presencia de anillos de crecimiento excéntrico de fácil reconocimiento a simple vista.

Aróstegui (1982) y USAID *et al.* (2004) Concuerdan en que el secado de la madera de *E. globulus* es difícil por sus características y estructura propia de su anatomía y alto índice de contracción.

1.4. DENSIDAD

Monteoliva *et al.* (2002) en su estudio sobre la variaciones en la densidad básica y longitud de fibras del *E. globulus* determinaron valores promedios de densidad básica de 0,549 kg/dm³ con rangos entre 0,490 kg/dm³ y 0,608 kg/dm³. Complementa sus resultados afirmando que la densidad básica aumenta a medida que la altura del fuste es mayor y aumentan desde la médula hacia la corteza, aunque tales incrementos tienden a ser menores en la región superior del tallo.

Así mismo Aróstegui, citado por Valdivieso (2001), dice que es de densidad media y variable dependiendo de la fracción del fuste (superior, media, inferior). Busnardo *et al.* (1983) para 7 árboles de 9 años encontraron una disminución de la densidad entre la base y el nivel de la Altura del Pecho (1,3 m), un aumento leve hasta el 50 por ciento y finalmente un descenso hacia el ápice.

1.5. USOS DEL EUCALIPTO EN EL PERÚ

El *E. globulus* es la especie forestal de mayor producción en la sierra central desde alrededor de 100 años (Samaniego 2009). Es una especie con buenas características para el uso estructural siempre que se realice un manejo adecuado. Así mismo, Campos *et al.* (1988) afirman la importancia del eucalipto, según Perú Forestal en Números, para el 2012 se tuvo una producción a nivel nacional de 68 089, 26 m³ de madera aserrada y 526 350 m³ de madera rolliza.

Rosales (1989) menciona que en la actualidad el mayor atractivo del *Eucalyptus globulus* radica en la generación de pulpa para papel, por las características de su fibra, la cual es adecuada para la producción de papel de alta calidad, en una demanda creciente en el mercado.

Barreda (1952) y Bohorquez (1972) señalan, que las plantaciones en cercos alrededor de los campos de cultivo tienen el fin de delimitar propiedades y son la principal forma de plantación en la sierra de Perú, muy por encima de los rodales.

2. BIOMASA FORESTAL

Najera (1999) define la biomasa como el conjunto de materiales orgánicos generados a partir de la fotosíntesis o bien producidos en la cadena biológica, pudiéndose distinguir así dos grandes tipos: biomasa vegetal y biomasa animal. Aproximadamente el 90 por ciento de la biomasa acumulada en la tierra se encuentra en los bosques en forma de fustes, ramas, hojas, raíces y materia orgánica (Leith y Whittaker 1975).

Schroeder *et al.* (1993) complementan que por lo menos el 40 por ciento del carbono de la biomasa del árbol completo se encuentra en las hojas y en las ramas que se queman o se descomponen rápidamente después de la corta del árbol. Del 60 por ciento restante, solo la mitad queda capturado en el producto final; esto significa que aproximadamente el 75 por ciento del carbono almacenado en el árbol regresa a la atmósfera.

Schlegel *et al.* (2000) afirman que la biomasa forestal se define como el peso (o estimación equivalente) de la materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo. Así también, Oliva y García-Oliva, citados por Zamora (2003), describen que la incorporación de carbono al suelo en los ecosistemas naturales se da por dos vías principales: por el mantillo (capa superficial de materia vegetal) y por la biomasa radicular. Strasburger, citado por Barragán (2008), manifiesta que es la producción de materia orgánica de un ecosistema por unidad de tiempo y de superficie es su productividad, la cual es expresada en gramos de peso seco por m^2 y año ($g/m^2/año$).

Según Couto *et al.*, citados por Soares *et al.* (2006), la biomasa forestal tiene características tales que permiten su uso como fuente de energía alternativa, ya sea por la quema de la madera, el carbón, la recuperación de los residuos de la exploración y explotación de los aceites esenciales, alquitrán y ácido piroleñoso. Soares *et al.* (2002) señalan que la biomasa forestal puede ser utilizada como una fuente de energía limpia, renovable y generadora de empleo.

2.1. ESTIMACIÓN DE BIOMASA AÉREA

Garzuglia y Saket, citados por Díaz (2007), mencionan que el procedimiento más empleado en los estudios de estimación de la biomasa aérea es el método del análisis destructivo a nivel de individuo y el análisis de regresión, el cual consiste en el muestreo destructivo de árboles con el fin de relacionar algunas de sus variables fáciles de medir con el contenido de biomasa. Loguercio y Defossé (2011) para su estudio utilizaron el análisis de regresión entre la biomasa aérea (fuste + copa) como variable dependiente y el DAP y la altura como variables independientes. La selección de los modelos se basó en el índice de Furnival, el cual permite comparar las ecuaciones de volumen, teniendo la ventaja de reflejar la dimensión de los residuales y homocedasticidad (Furnival 1961). Un modelo predictivo presenta homocedasticidad cuando la varianza del error de la variable endógena se mantiene a lo largo de las observaciones. En otras palabras, la varianza de los errores es constante.

Cuando la variable dependiente es alguna función del volumen, el índice de Furnival 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 ecuación que estimará con mayor precisión la variable dependiente (Barrena *et al.* 1986; Philip 1994). Así mismo, Adler (1980) y Chatterjee y Price (1977) indican que la mejor ecuación para la

estimación de un variable dependiente es aquella con el menor valor de cuadrado medio de error (CME) del ANVA de las regresiones.

En estudios de biomasa, dependiendo de la variabilidad de los bosques, de la precisión deseada, de las especies encontradas y de los recursos disponibles, se utilizan diferentes números de árboles muestra, los cuales normalmente varían entre 20 y 40 árboles. Para zonas amplias, se eligen cerca de 30 árboles, pero si se requiere determinar la biomasa en localidades específicas, 15 árboles es un número suficiente (Schlegel *et al.* 2000). No obstante Alegre *et al.* (2012) afirman que en la selección de árboles se debe sacrificar como mínimo 20 árboles (mejor 30 o más para mayor precisión) de un mismo SUT (Sistema de uso de tierra), los cuales deben tener un rango variable de diámetro y de altura, y deberían ser cortados con un hacha o motosierra.

2.2. REGRESIÓN LINEAL SIMPLE

Chatterjee y Price (1977) definen este procedimiento estadístico como el análisis de las relaciones entre las variables, señalando que se trata de una de las herramientas estadísticas más ampliamente utilizada, ya que proporciona un método sencillo para el establecimiento de una relación funcional entre las variables. La relación se expresa en forma de una ecuación que conecta la variable respuesta o dependiente a una o más variables independientes. Cailliez (1980) concuerda en que el análisis de regresión es el método más utilizado para el desarrollo de ecuaciones de volumen y biomasa, ya que los inconvenientes de los cálculos disminuyeron con el uso de la computadora. Uriel (2013) menciona que en principio no sabemos si las variables en cuestión están relacionadas o no o si en caso de haber dependencia es significativa o no. De haber entre ellas una dependencia lineal significativa, podríamos expresar la comprensión (Y) a partir de la presión (X) mediante una recta.

2.3. REGRESIÓN LINEAL MULTIPLE

Barón y Tellez (2004) afirman que la regresión múltiple es utilizada cuando estudiamos la posible relación entre varias variables independientes (predictoras o explicativas) y otra variable dependiente (criterio, explicada, respuesta). Montgomery *et al.* (2006); Chatterjee y Price (1977); Rojo (2007) y De la Fuente (2011) concuerdan que el uso de más de una variable explicativa nos va ofrecer la ventaja de utilizar más información en la construcción del modelo y, consecuentemente nos brindará estimaciones más precisas. Añaden que los requerimientos necesarios para poder utilizar la técnica de regresión múltiple son:

- **Linealidad:** Describe una supuesta dependencia lineal entre la variable respuesta y las variables explicativas.
- **Normalidad y equidistribución de los residuos:** Se define como residuos, las diferencias entre los valores calculados por el modelo y los valores reales. Los cuales deben distribuirse de modo normal y con una misma dispersión para cada combinación de los valores de las variables independientes.
- **Número de variables independientes:** Mencionan la importancia de no intentar incluir cuantas variables tengamos en una base de datos y el error de ajustar unas pocas observaciones usando muchas variables.
- **Colinearidad:** Expresa el hecho de que dos variables independientes están estrechamente relacionadas. Es decir, que la variable x_1 sea combinación lineal de la variable x_2 , lo que significa una relación estrecha entre dichas variables, por lo tanto el coeficiente de correlación entre ambas será 1.

2.4. ANÁLISIS DE REGRESIÓN POR EL MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS

Montgomery *et al.* (2006) define el análisis de regresión por el método de mínimos cuadrados como una técnica estadística para investigar y modelar la relación entre variables. Añade que son numerosas las aplicaciones, y las hay en casi cualquier campo, incluyendo en ingeniería, ciencias físicas y químicas, economía, administración, ciencias biológicas y ciencias sociales.

Barrena (1988) menciona que para un correcto uso del método de regresión por mínimos cuadrados, los datos deben cumplir con 3 supuestos:

- Que la muestra sea obtenida al azar.
- Que presente una distribución normal
- Que presente una homogeneidad de variancia.

Montgomery *et al.* (2006) mencionan algunas consideraciones sobre el uso de la regresión por mínimos cuadrados:

- Los modelos de regresión tienen por objetivo servir de ecuaciones de interpolación dentro de un intervalo de la o las variables regresoras usadas para el ajuste.

- La disposición de los valores de x juega un papel importante en el ajuste por mínimos cuadrados. La pendiente queda más influenciada por los valores remotos de x .
- Los valores atípicos o los valores erróneos pueden afectar el ajuste por mínimos cuadrados.
- Que el análisis de regresión indique que existe una fuerte relación entre dos variables, no implica que éstas tengan relación alguna en el sentido causal; la causalidad implica, necesariamente, la correlación.

Simbaña (2011) estableció una relación entre la biomasa total, el dap y altura total a través de dos modelos lineales generales. Ensayó un análisis de regresión de mínimos cuadrados para 24 ecuaciones obteniendo resultados satisfactorios y concluyendo que “la metodología utilizada permite elaborar estimaciones precisas y detalladas de biomasa y carbono”.

2.5. BONDAD DEL AJUSTE

Uriel (2013) señala que una medida que indique el grado de ajuste de la recta de regresión se denomina medida de bondad del ajuste. Entre las más conocidas está el coeficiente de determinación (R^2). Añade que R^2 es la proporción de la suma de cuadrados totales, que se explica por la regresión, es decir, el porcentaje de variación muestral de Y explicada por X . Dolado (1999) menciona que los criterios para determinar la bondad de las predicciones se basa en el examen de los valores del coeficiente de correlación y, principalmente, del coeficiente de determinación. También añade que el R^2 es un criterio de valoración de la capacidad de explicación de los modelos de regresión, y representa el porcentaje de la varianza justificado por la variable independiente. Rodríguez (2005) menciona que el R^2 mide el grado de ajuste cuando trabajamos con muestras significativas de lo contrario podría producir errores. Añade que el tamaño de la muestra no es la única magnitud que influye en el valor del R^2 . El número de variables explicativas consideradas en el modelo también condiciona el valor de este coeficiente ya que el R^2 es una función no decreciente del número de variables presentes, de forma que a medida que aumenta el número de variables regresoras el R^2 aumentará.

Alvarado y Obagi (2008) recomiendan que coeficiente de correlación (r) deba superar 0,8, en cualquier otro caso indicará asociaciones lineales débiles. Así mismo que el valor puede variar bastante según el tipo de disciplina (de mayor valor en ciencias exactas a menor valor en ciencias sociales). Agrega con respecto al coeficiente de determinación (R^2), que el

mínimo valor para considerar una asociación aceptable es de 0,64 y para ciencias exactas recomienda un valor mayor a 0,75.

2.6. ANÁLISIS DE VARIANZAS (ANOVA)

Montgomery (2004) menciona que el procedimiento correcto para probar la igualdad de varias medias es el análisis de varianza, además de ser probablemente la técnica más útil en el campo de la inferencia estadística. Cuadras (2014) afirma que “el análisis de la varianza comprende un conjunto de técnicas estadísticas que permiten analizar cómo operan diversos factores, estudiados simultáneamente en un diseño factorial, sobre una variable respuesta”. Boqué y Maroto (2005) recomiendan que para utilizar el ANOVA de forma satisfactoria deben cumplir tres tipos de hipótesis, aunque se aceptan ligeras desviaciones de las condiciones ideales:

- Cada conjunto de datos debe ser independiente del resto
- Los resultados obtenidos para cada conjunto deben seguir una distribución normal
- Las varianzas de cada conjunto de datos no deben diferir de forma significativa.

2.7. PRUEBAS DE SIGNIFICACIÓN (FISHER Y T-STUDENT)

Murillo y Gonzáles (2000) describen las pruebas de significación como instrumentos de validación del modelo en la realización de pruebas de hipótesis estadísticas. Añaden que la primera es la prueba Fisher (F), la cual señala la significación estadística del modelo en su conjunto, y la segunda es la t-student, la cual consiste en un conjunto pruebas de significación individual de cada uno de los parámetros del modelo de regresión. Del mismo modo, Montgomery (2004) menciona que la prueba de significación de la regresión es un procedimiento para determinar si existe una relación lineal entre la variable de respuesta Y y su subconjunto de los regresores x_1, x_2, \dots, x_k . También señala que muchas veces el interés se centra en probar la hipótesis sobre los coeficientes de regresión individual, donde la utilidad radica en determinar el valor de cada uno de los regresores del modelo, ya que si se incluye una variable adicional al modelo ocasionará siempre que la suma de cuadrados se incremente y que la suma de cuadrados del error disminuya. Es necesario decidir si el incremento de la suma de cuadrados es suficiente para garantizar el uso de la variable adicional en el modelo.

2.8. ANÁLISIS DE RESIDUOS

Montgomery (2004) describe el análisis de residuos como el proceso con mayor importancia en el diagnóstico del modelo de regresión para su validación, destacando su necesidad en: 1) examinar el modelo ajustado para asegurarse de que proporciona una aproximación adecuada del verdadero sistema y 2) verificar que no se infringe ninguno de los supuestos de la regresión de mínimos cuadrados. Vilar (2006) anuncia que para comprobar si se verifican las hipótesis estructurales en el ajuste de un modelo lineal, el análisis descriptivo analítico y gráfico de los residuos estandarizados da una buena idea acerca de si se verifican o no las hipótesis del modelo. Chatterjee y Price (1977) indican que “Un método simple y eficaz para la detección de deficiencias en el modelo es el análisis de regresión mediante el examen de los residuos”. Donde el residuo i -ésimo lo definen como:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i$$

Chatterjee y Price (1977) mencionan que con un gráfico apropiado de residuos a menudo se exponen los errores de cada modelo, además de ser la principal herramienta en el análisis para este tipo de estudios. Vilar (2006) presenta los siguientes gráficos, que evidencian el cumplimiento de las hipótesis del modelo y los ajustes no adecuados del mismo.

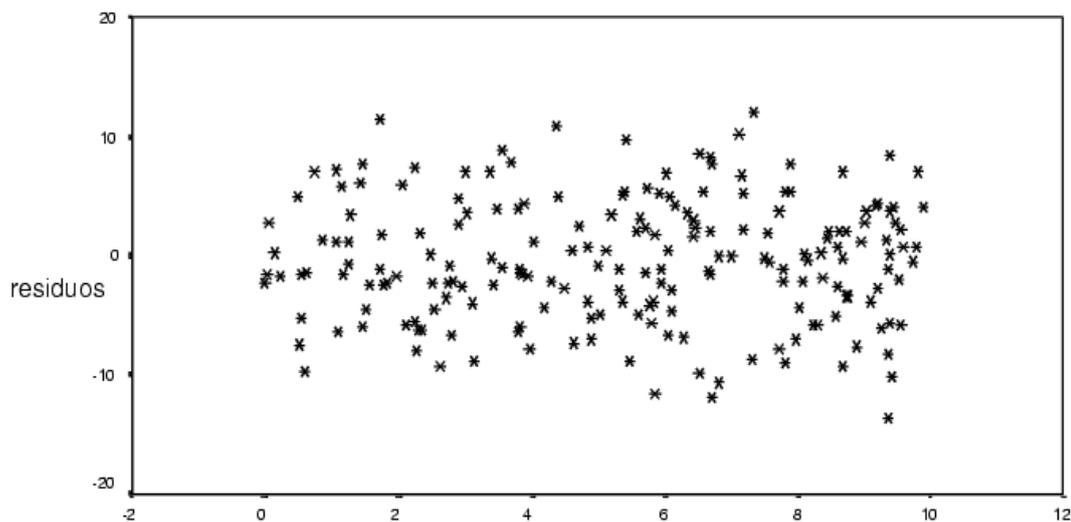


Figura 1: No se detecta ningún problema.

FUENTE: Vilar (2006)

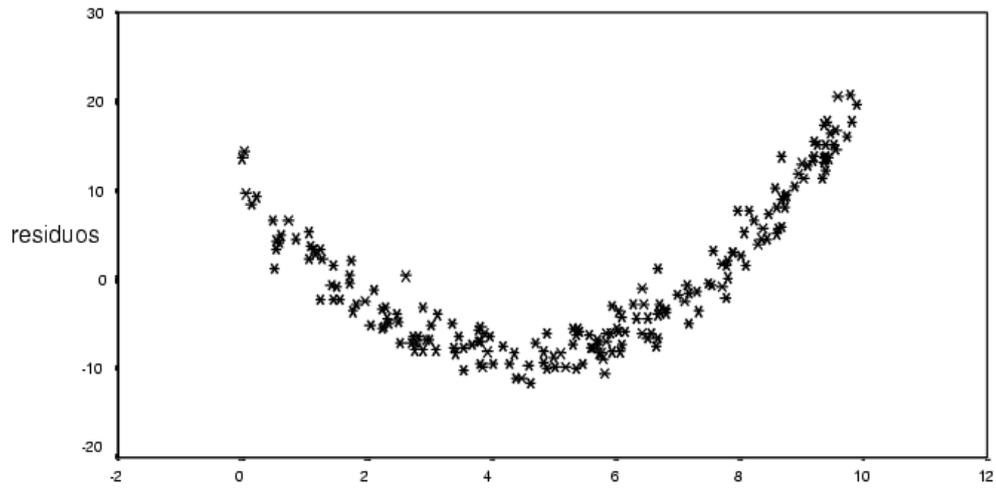


Figura 2: El ajuste lineal no es adecuado.

FUENTE: Vilar (2006)

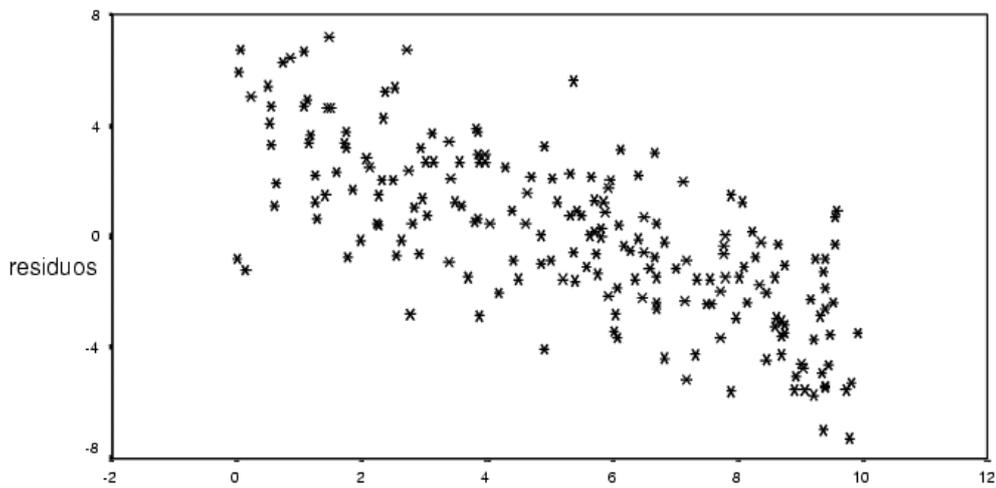


Figura 3: Ajuste lineal mal calculado.

FUENTE: Vilar (2006).

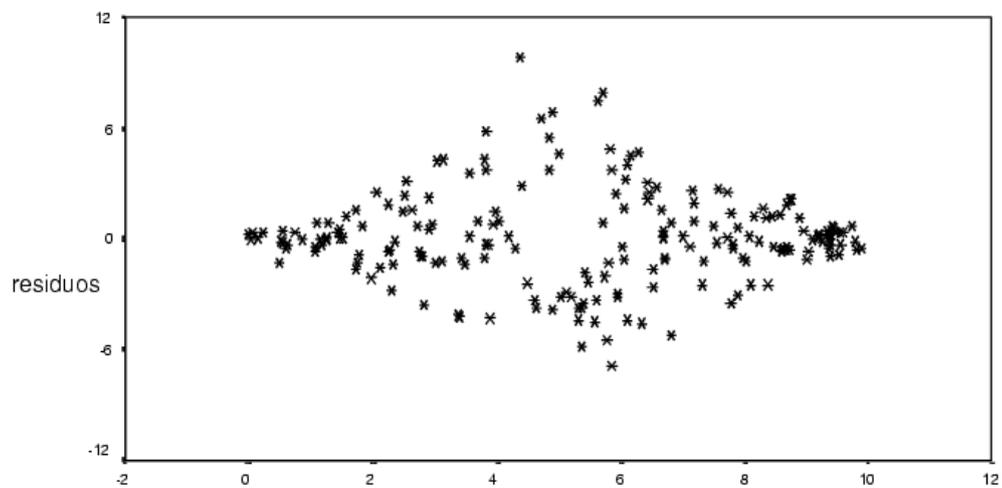


Figura 4: Existe heterocedasticidad.

FUENTE: Vilar (2006).

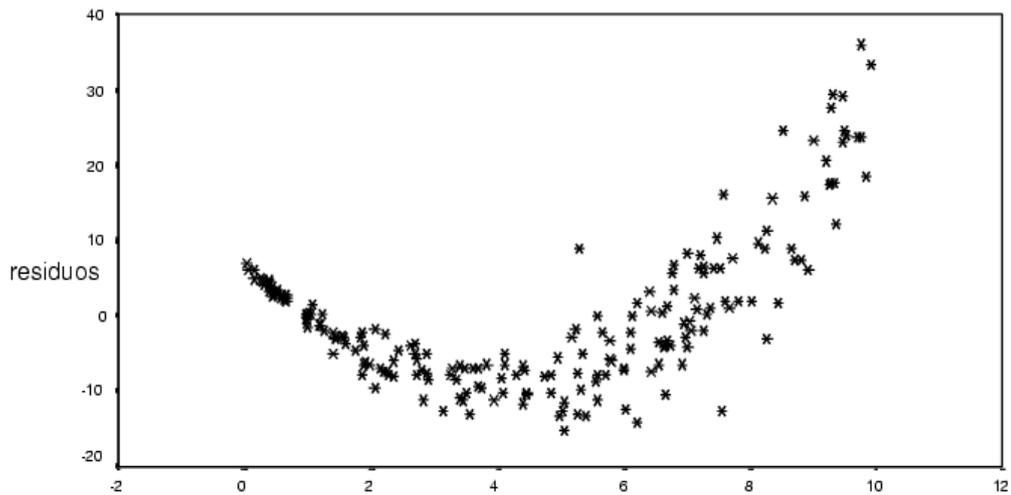


Figura 5: Ajuste no lineal y heterocedasticidad.

FUENTE: Vilar (2006).

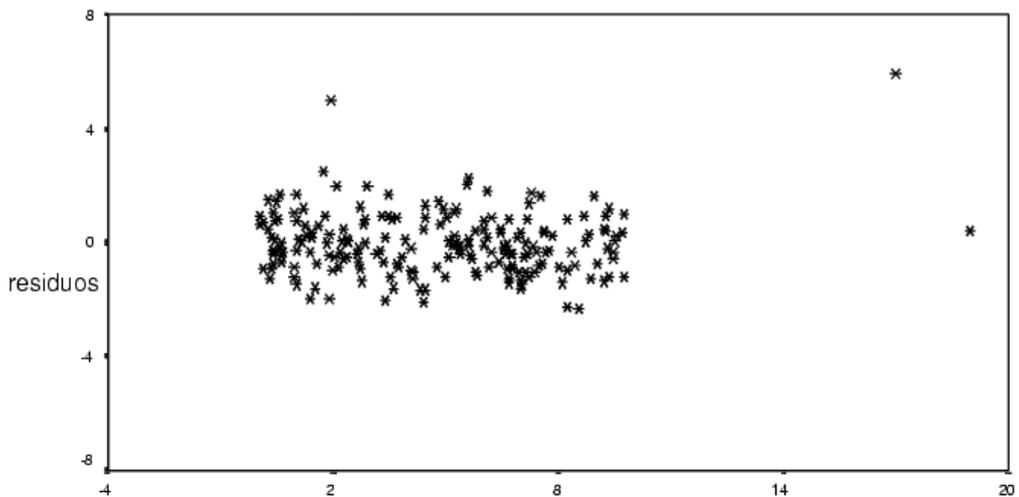


Figura 6: Existencia de datos atípicos.

FUENTE: Vilar (2006).

Murillo y Gonzáles (2000) mencionan que el mantenimiento de la hipótesis de homocedasticidad se da cuando la distribución de los residuos no varía sistemáticamente al hacerlo \hat{Y} , o la variable explicativa X , el caso contrario se muestra en las Figura 4 y 5. Sobre la normalidad mencionan que se utiliza el grafico de la distribución de frecuencias (histograma) de los valores de los residuos, buscando encontrar la forma aproximada a la que teóricamente presenta la distribución normal (unimodal, simétrica y acampanada), como se muestra en la Figura 7.

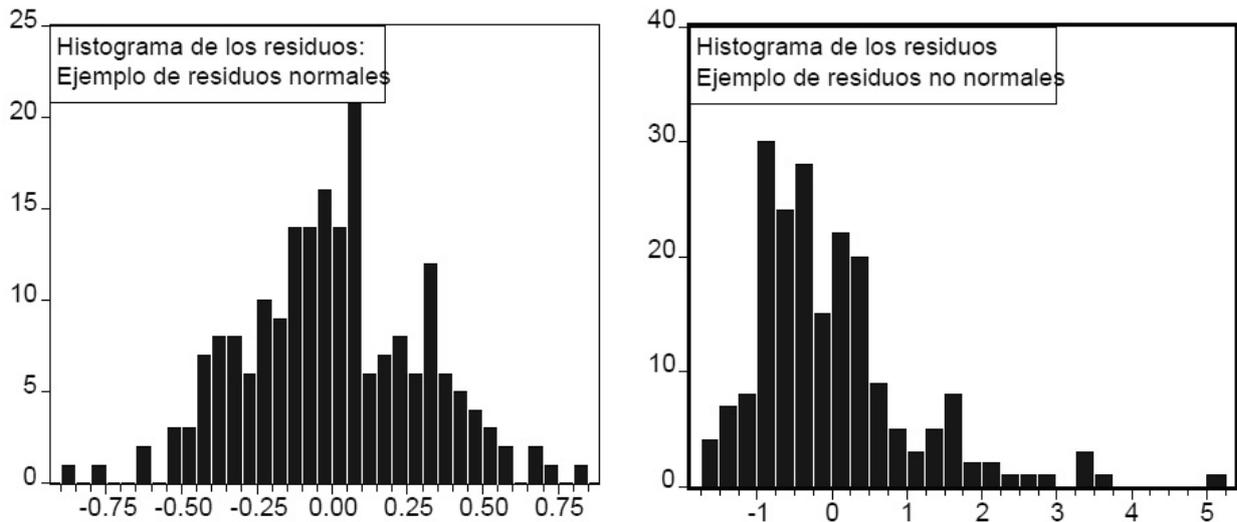


Figura 7: Histograma de los residuos.

FUENTE: Murillo y Gonzáles, (2000).

2.9. REGRESIÓN DE MODELOS PONDERADOS

Philip, citado por Barrena (1988), afirma que para lograr la homogeneidad de variancias es necesario transformar las variables o ponderarlas aplicando la regresión ponderada basada en los Mínimos Cuadrados Ponderados. Así mismo Furnival (1966) señala que la ponderación de las ecuaciones por el método de Mínimos Cuadrados Ponderados mejora la precisión de la estimación.

2.10. ÍNDICE DE FURNIVAL

Furnival (1961) el índice de Furnival fue desarrollado para comparar modelos forestales, siendo un método eficaz para comparar distintos modelos con diferentes transformaciones. Parresol (1999) afirma que es la mejor alternativa cuando la variable respuesta no se encuentra en la misma escala, por ello, puede ser recomendado como una de las estadísticas más útiles para evaluar y comparar los modelos de biomasa. Augusto *et al.*(2009) para los modelos logarítmicos, es decir, modelos con la variables dependientes transformadas, el desvío estándar de la estimación fue corregido en la escala original de la variable dependiente, para posibilitar la comparación con los modelos aritméticos por el índice de Furnival el cual es dado por la ecuación:

$$x = \left(\text{antilog} \frac{\sum \log^{10} \sqrt{v_i}}{n} \right) xS. (\log e)^{-1}$$

S = desviación estándar de los errores

V_i = volumen del árbol_i

2.11. BIOMASA EN EL *Eucaliptus globulus* LABILL.

Existe una biomasa óptima naturalmente sustentable para cada sitio que depende de la disponibilidad de nutrientes, precipitaciones, capacidad de retención de agua del suelo y de las prácticas de manejo del sitio (Noble y Herbert, citado por Geldres *et al.* (2006)).

Los trabajos que se centran en la cuantificación y en la modelización de la biomasa de las diferentes partes del árbol son relativamente abundantes en esta especie, especialmente en países como Chile, Brasil, Australia, Portugal y España. Generalmente, los objetivos de estos estudios se centran en determinar la cantidad de biomasa arbórea y su contenido en nutrientes para determinar posteriormente las cantidades de elementos que se pierden cuando se queman o retiran los restos de corta (Hopmans *et al.*, 1993; Spangenberg *et al.*, 1996; Reed y Tomé, 1998); citados por Balboa (2005).

La madera de esta especie supone entre el 71 y 76 por ciento del peso seco de la biomasa, seguida de la corteza con un 10-11 por ciento, 7-8 por ciento de las ramas y 8-10 por ciento de ramillos y hojas. Normalmente se cumple un orden de acumulación de biomasa que es: madera > corteza > hojas > ramas > ramillos (González *et al.* 1985; Spangenberg *et al.* 1996; Cortez y Madeira 1998; Brañas *et al.* 2000); citados por Balboa (2005). Simbaña (2011) obtuvo que la distribución de la biomasa en los árboles de *Eucaliptus globulus* Labill, en promedio era de 77,81 por ciento para madera, 14,50 para corteza y 7,70 para las hojas.

3. CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático en la actualidad ya es aceptado como una verdadera amenaza global. Los principales argumentos que causan preocupación son los impactos que este traerá y encontrar la mejor manera para adaptarse a ellos o mitigar sus causas. Aún quedan muchas objeciones tanto a la calidad de la ciencia que lo estudia, como a la naturaleza de la causa y el efecto, los políticos son cada vez más conscientes de los grandes riesgos que trae el cambio climático y que el ignorar o retrasar las medidas de mitigación es mucho más costoso que no hacerlo. La disputa sobre los costos de la adaptación y la mitigación en la cumbre de Copenhague en 2009 es una amplia evidencia de la aceptación del problema del cambio climático a través de una amplia comunidad a nivel mundial (Turrall 2011). Allison *et al.* (2009) menciona que la evidencia científica del calentamiento global es ahora considerada irrevocable y se debe empezar a tomar medidas para mitigarlo.

Canadell *et al.* (2007) “El clima de la tierra depende de la composición de la atmosfera y en particular de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales aumentan la cantidad de calor solar retenida en la tierra”. SEMARNAT (2009), Los principales GEI son el bióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozono (O₃) y el vapor de agua. Estos gases dejan pasar la luz solar, la cual alcanza la superficie terrestre y marina y se transforma en calor, es decir, en radiación infrarroja. Una parte de esa radiación se queda en los mares y los continentes y otra es reemitida nuevamente hacia la atmosfera. Sin este fenómeno la temperatura de la Tierra seria en promedio 33°C más fría. La teoría sobre el cambio climático nos dice que a mayor cantidad de GEI, mayor será la cantidad de calor que se absorba y la superficie terrestre aumentará su temperatura. Martínez y Fernández (2004), nos dicen que los aumentos en la concentración de los GEI reducen la eficiencia con la cual la Tierra reemite la energía recibida al espacio, de tal forma la temperatura en la superficie se eleva para emitir más energía y aunque parte de ella quede “atrapada”, suficiente energía saldrá al espacio para alcanzar el balance radiactivo y estabilizar el clima.

3.1. PROYECCIONES Y ESCENARIOS DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO.

Allison *et al.* (2009) “Las incertidumbres son las proyecciones climáticas que se alimentan a través de los impactos previstos, por lo que es más difícil de desarrollar estrategias de adaptación y mitigación apropiadas y eficaces. Los resultados más probables se obtienen a partir de una serie de escenarios a través de un conjunto de modelos que permiten obtener “promedios”. Por lo tanto, vemos las proyecciones de futuras temperaturas que van desde leves aumentos significativos de diferentes escenarios” como se muestra en la Figura 8. Turrall (2011) compara, que las predicciones de precipitación son mucho menos consistente, con algunos modelo que predice aumentos en las precipitaciones donde otros predicen una disminución en el mismo escenario.

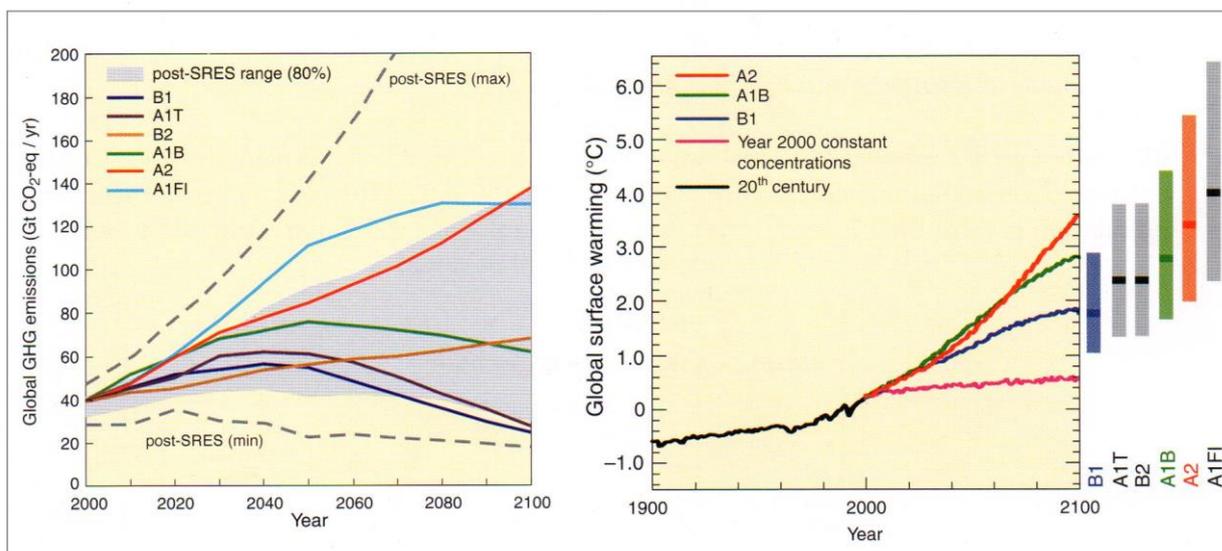


Figura 8: Gama de predicciones para las emisiones de GEI y el calentamiento global

FUENTE: IPCC 2007

IPCC (2007) Las proyecciones mostradas por el IPCC combinan dos series de tendencias divergentes: una serie desarrolla las variaciones entre valores económicos y ambientales; la otra serie explora las variaciones entre mayor globalización y regionalización. Estas líneas evolutivas pueden resumirse de la siguiente forma:

- Línea evolutiva A1: presenta un mundo futuro con crecimiento económico muy rápido; la población mundial llega su punto máximo y decrece desde entonces.
- Línea evolutiva A2: se supone un mundo muy heterogéneo, con la población global en constante aumento y el crecimiento económico orientado regionalmente, línea evolutiva lenta y fragmentada.
- Línea evolutiva B1: muestra un mundo convergente con los mismos patrones de población que la línea evolutiva A1, pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de servicios e información.
- Línea evolutiva B2: planea un mundo en donde el énfasis se concentra en soluciones locales para la sustentabilidad económica, social y ambiental.
- Línea evolutiva A1FI: caracterizado por el uso intensivo de recursos fósiles
- Línea evolutiva A1T: Uso predominante de recursos alternativos a los fósiles

- Línea evolutiva A1B: se asume un balance de las fuentes energéticas.

MINAM (2014) en el 2010 el Perú realizó el inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), como parte del compromiso ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático (CMNUCC). Según primer informe bienal de actualización del Perú, la mayor fuente de emisión de GEI a nivel nacional es el cambio de uso de suelo de bosques para ampliar los suelos agrícolas. La segunda fuente de emisión correspondería al sector energía con una mayor concentración en el transporte terrestre, seguidos de la agricultura, desechos y los procesos industriales. (Figura 9).

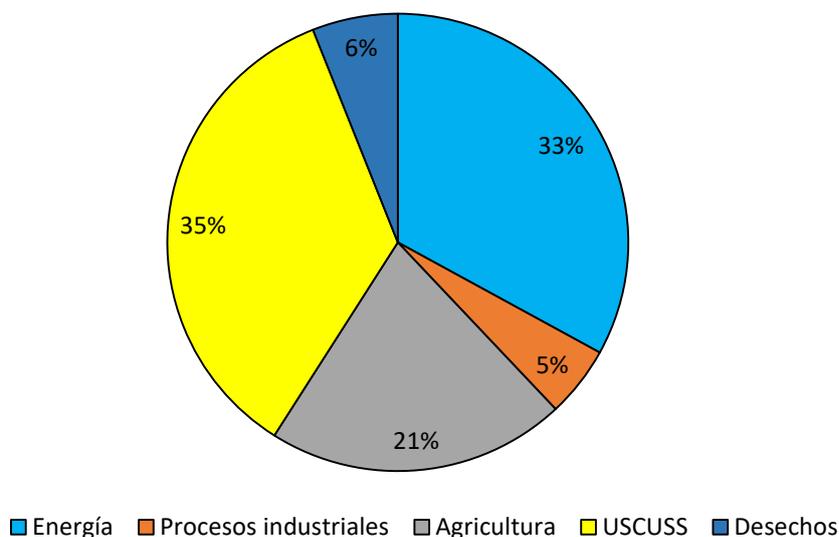


Figura 9: Distribución porcentual de las emisiones de GEI para el 2010.

FUENTE: MINAM 2014

3.2. ACUERDOS INTERNACIONALES SUSCRITOS POR PERÚ

En el Perú los convenios internacionales de temas ambientales son observados como un tema meramente ambiental y manejados por un grupo reducido de profesionales que en líneas generales trabajan temas ambientales. El grado de implementación de cada convención es escaso y los niveles de coordinación y compatibilización de los objetivos, estrategias y planes nacionales son muy débiles o inexistentes (MINAM 2010). La Tabla 1, muestra los principales tratados ambientales a los que el Perú se ha suscrito hasta la actualidad.

Tabla 1: Principales tratados ambientales suscritos por Perú.

<i>Tratado</i>	<i>Año del tratado</i>	<i>Año de vigencia</i>
Convención Relativa a los humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de aves Acuáticas, Ramsar	2 de febrero de 1971	Entró en vigencia en 1975
Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre. Washington, D.C	3 de marzo de 1973	Entró en vigencia el 25 de mayo de 1975
Convención Marco de las Naciones Unidas sobre la Diversidad Biológica. Río de Janeiro	5 de junio de 1992	Entró en vigencia el 7 de setiembre de 1993
Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Nueva York	9 de mayo de 1992	Entró en vigencia el 21 de marzo de 1994
Convenio Internacional de las Maderas Tropicales. Ginebra	26 de enero de 1994	Entró en vigencia el 1° de febrero de 1996
Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación en Países afectados por Sequía Grave o Desertificación. París	17 de junio de 1994	Entró en vigencia el 26 de diciembre de 1996
Comunidad andina, Decisión 391 Régimen Común sobre Acceso a los Recursos Genéticos. Caracas	2 de julio de 1996	Entró en vigencia el 17 de julio de 1996
Protocolo de Kioto de la convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Kioto	11 de diciembre de 1997	Entró en vigencia el 11 de setiembre de 2002

Fuente: MINAM 2010.

4. OTROS ESTUDIOS SIMILARES.

Entre los estudios más recientes podemos resaltar el realizado por Simbaña (2011), el autor del estudio determina el contenido de carbono y su fracción en parcelas de 250m² en 10 rodales de plantaciones de *E. globulus* de las provincias de Pomabamba y Mariscal Luzuriaga. El trabajo comprende el análisis destructivo con una muestra de 40 árboles. Mediante el análisis de regresión basado en el método de los mínimos cuadrados, se determinó los modelos de biomasa y carbono; para ello se seleccionaron combinaciones de las variables independientes *dap* y *altura*. Las ecuaciones elegidas para el estudio fueron aquellas con menor valor de cuadrado medio de error (CME), siendo la ecuación que mejor estima la Biomasa de la especie *E. globulus*:

$$Biomasa\ aérea = 39,8643 - 3,51885dap + 0,02138dap^2h$$

Fonseca *et al.* (2009) construyeron modelos para estimar la biomasa aérea de árboles de plantaciones de *Vochysia guatemalensis*; utilizaron un muestreo destructivo, separando cada componente del árbol y tomando muestras de campo para determinación de la materia seca.

Todos los modelos seleccionados tuvieron un R^2 superior al 0,826 y presentaron los menores CME de la regresión.

Loguercio y Defossé (2011) realizaron la determinación de las ecuaciones de biomasa aérea para la especie *Nothofagus pumilio*, mediante el muestreo destructivo de 59 árboles en dos estructuras típicas del bosque de lenga virgen (regular e irregular) en las cercanías del lago La Plata en la provincia de Chubut, Argentina. Para el ajuste de las ecuaciones utilizaron el 80 por ciento de los árboles, mientras que el 20 por ciento restante se utilizó para su validación. Realizaron el análisis estadístico mediante el índice de Furnival, el R^2 , la distribución de residuos, análisis del error y sesgo. Como resultado del estudio las ecuaciones que seleccionaron fueron del tipo: $\text{Biomasa} = b_0 + b_1\text{dap} + b_2\text{dap}^2$ y $\text{Biomasa} = b_0 + b_1\text{dap}^2h$.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. ZONA DE ESTUDIO

1.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El estudio se llevó a cabo en los linderos plantados de *Eucaliptus globulus* Labill en los terrenos de cultivos ubicados en el distrito de Huertas, (al margen izquierdo del río Yacus) provincia de Jauja, región Junín, Perú. Geográficamente el área distrital se localiza alrededor del punto de referencia: 11° 46' 07" latitud S y 75° 28' 37" longitud O, con una superficie de 11,82 km². El distrito de Huertas se encuentra ubicado a una altitud aproximada de 3365 msnm.

1.2. CLIMA

El distrito de Huertas posee un clima variado de acuerdo a las estaciones, variando entre templado, seco y lluvioso en los meses de diciembre a abril con una temperatura promedio de 14° a 18° C. De mayo a noviembre le corresponde los meses más fríos del año, con una temperatura que llega a descender a valores bajo cero en junio y julio. Tiene una temperatura media anual de 10,9°C y una precipitación de 700mm. Por el sistema Thornthwaite, el clima es clasificado como B(i)D'H3, clima semi frígido, lluvioso, con lluvia deficiente en invierno, con humedad relativa calificada como húmeda (Senamhi).

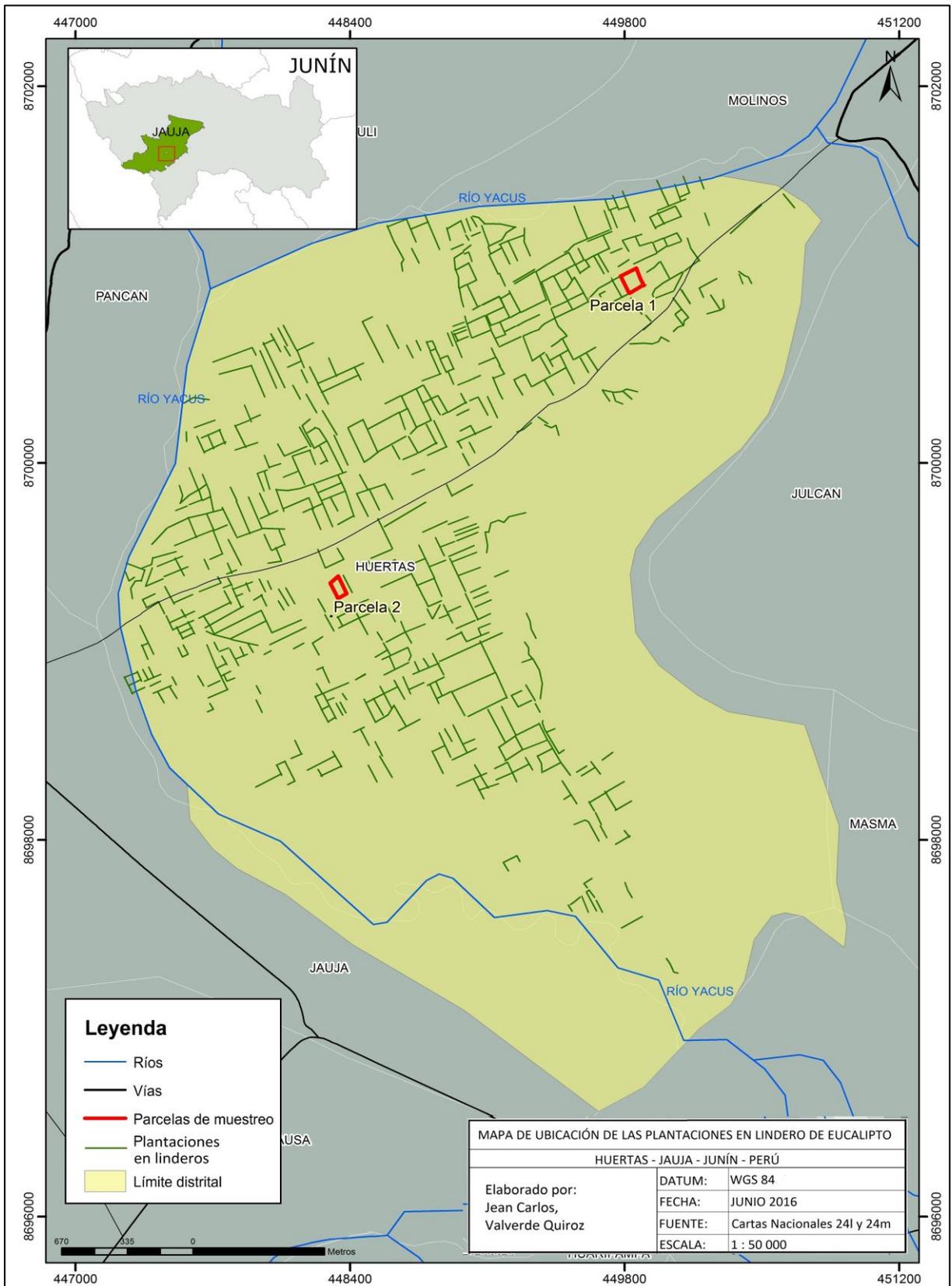


Figura 10: Mapa de ubicación de los linderos plantados de *Eucalyptus globulus* Labill.

FUENTE: Elaboración propia.

2. MATERIALES, EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

2.1. MATERIALES

- Etiquetas plásticas
- Bolsas plásticas
- Plumones indelebles
- Botiquín de primeros auxilios
- Papel platino

2.2. EQUIPOS E INSTRUMENTOS

- 01 hipsómetro SUUNTO
- 01 balanza tipo romana análoga de 150 kg.
- 01 balanza tipo romana análoga de 25 kg.
- 01 balanza tipo romana digital de 50 kg.
- 02 cintas diamétricas
- 01 balanza de precisión de 0,1 gramos.
- 02 sogas de 5m.
- 01 calculadora SONY
- 01 horno desecador
- 01 vaso volumétrico
- 01 punzón
- 01 cordel
- 01 cámara fotográfica

2.3. HERRAMIENTAS

- 02 sierras de arco
- 01 motosierra
- 02 machetes

3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el estudio se divide en las siguientes fases:

A. Fase de Campo

- a) Selección de la muestra de árboles.
- b) Planificación de trabajo de campo
- c) Capacitación de los equipos de trabajo
- d) Medición de biomasa
 - i. Medición de los árboles en pie
 - ii. Medición de los arboles tumbados
 - iii. Tumbado del árbol
 - iv. Desrame y trozado
 - v. Medición de los pesos de cada componente.
 - vi. Obtención de rodajas
 - vii. Acopio
- e) Transporte

B. Fase de Laboratorio

- a) Preparación de las probetas
- b) Determinación del contenido de humedad y densidad básica

C. Fase de Procesamiento

- i. Calculo de biomasa
- ii. Elaboración de la ecuación de biomasa
- iii. Análisis estadístico
- iv. Selección de la ecuación de biomasa

La Figura 11 muestra el diagrama de flujo correspondiente a la metodología para la medición de biomasa y ecuación de biomasa.

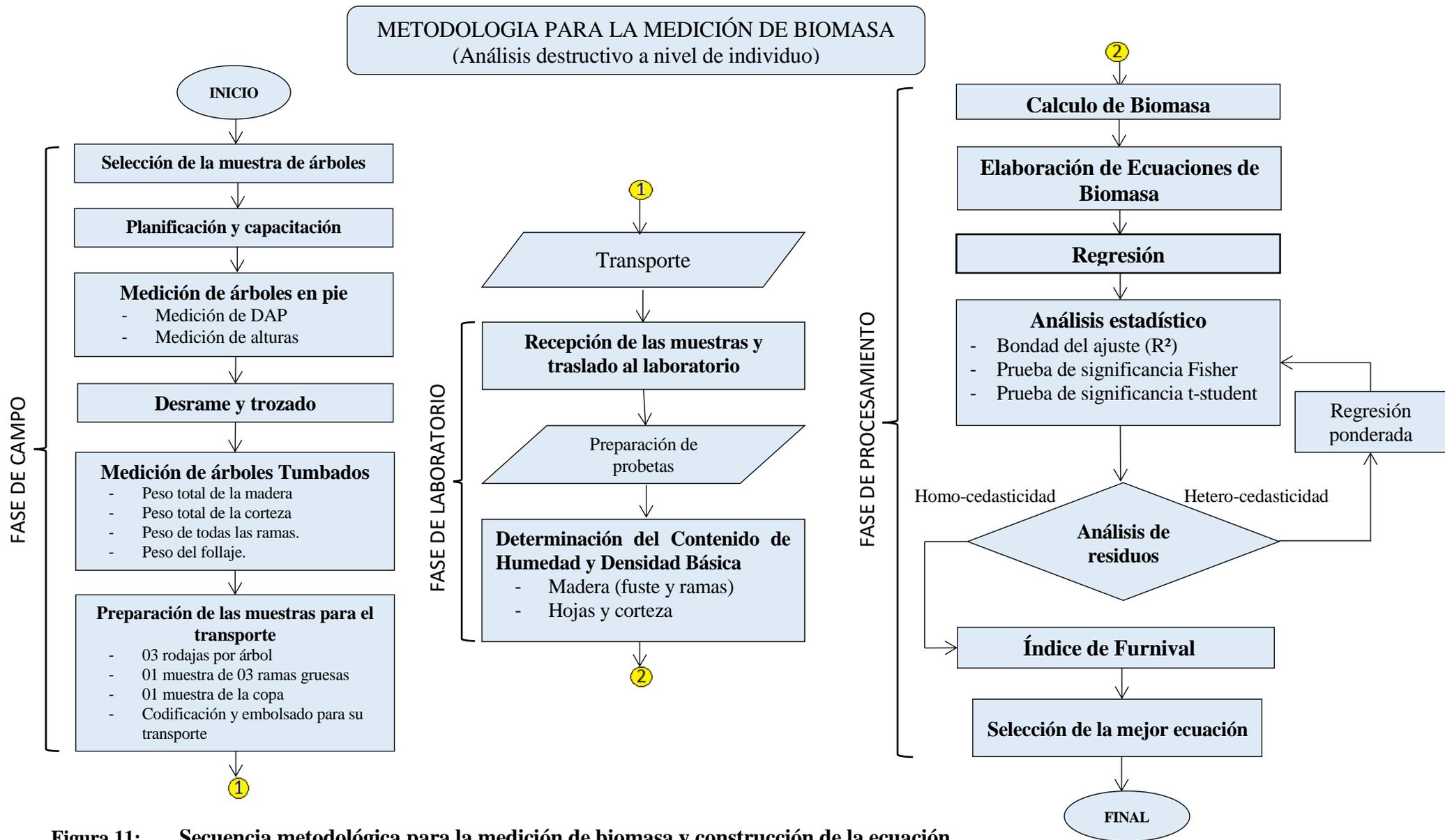


Figura 11: Secuencia metodológica para la medición de biomasa y construcción de la ecuación.

FUENTE: Elaboración propia

3.1. FASE DE CAMPO

3.1.1. SELECCIÓN DE LA MUESTRA DE ÁRBOLES

Se seleccionaron y marcaron un total de 40 árboles. Todos los individuos muestreados tuvieron un diámetro a la altura del pecho (DAP) superior a 15 cm, como lo recomiendan Alegre *et al.* (2012) y Schlegel *et al.* (2000). Se eligieron tomando dos chacras de cultivos con características representativas del total, cada una con un lindero perimétrico de cuatro lados constituido de árboles de *E. globulus* Labill, limitando el área agrícola correspondiente. De cada una de las chacras se seleccionaron 20 árboles, teniendo como criterio “conformar una muestra de árboles con diámetro, altura y forma de la copa representativa del lindero de cada chacra y de la totalidad de las chacras del distrito de Huertas. Cabe mencionar que los linderos seleccionados pertenecen a una muestra representativa del distrito Huertas, con una intensidad de muestreo de 7 por ciento y a un nivel de confianza del 95 por ciento, resultados obtenidos por Llancari y Barrena (2016). Así mismo dentro de la muestra representativa se seleccionaron aquellos predios cuyos propietarios concedieron el permiso para el tumbado de los árboles.

3.1.2. PLANIFICACIÓN DE TRABAJO DE CAMPO

El primer día del trabajo de campo se midió y marcó los árboles en pie, con la directa intervención del tesista y 2 personas como apoyo, para la obtención de la información de DAP y alturas de los árboles.

A partir del segundo día se llevó a cabo la medición de biomasa en el cual ocho personas formaron 3 equipos de trabajo:

Motossierista: Personal contratado, diestro en el uso de la motosierra y encargado del tumbado, cortes del fuste y desrame de ramas gruesas.

Equipo 1: De 2 personas, que utilizando machetes y una sierra de arco separaron los componentes luego del primer desrame con motosierra

Equipo 2: De 3 personas, dos de ellas encargadas del cargado de los grupos de ramas y hojas hacia las balanzas instaladas previamente, la tercera persona tuvo la labor de libretista, registrando los pesos con sus respectivos códigos.

Equipo 3: De 3 personas, 2 responsables de cargar las partes del fuste para su pesado, la tercera persona tuvo la labor de libretista, registrando y embolsando las muestras (ramitas terminales, corteza y ramas gruesas).

El autor supervisó todas las actividades, además de acompañar al motosierrista para la indicación de los cortes a realizar; también llevó a cabo la codificación y obtención de las muestras para el análisis de laboratorio

3.1.3. CAPACITACIÓN DE LOS EQUIPOS DE TRABAJO

El primer día junto a la medición y marcado de los árboles también se realizó una capacitación a todos los equipos de trabajo, de una duración aproximada de dos horas. La finalidad fue prepararlos con los conocimientos técnicos necesarios para llevar a cabo las labores de campo de forma sistemática. También se realizó la capacitación de las medidas de seguridad que se deben tomar en el trabajo de campo, teniendo como principales puntos; la identificación de la ruta de escape en el tumbado de árboles, el uso de equipo de protección personal y el adecuado uso de las herramientas.

3.1.4. MEDICIÓN DE BIOMASA

Para la medición de biomasa se siguió la metodología descrita en “Manual de procedimientos de muestreo de biomasa forestal” (Schlegel *et al.* 2000), adaptado al estudio.

Se realizó 2 tipos de medición: con el árbol en pie, y con el árbol apeado, las cuales se describen a continuación dentro de una secuencia de operaciones sucesivas realizadas en el campo:

a. Medición del árbol en pie

- El número de árbol, se tomaron los números asignados en el marcado de los árboles.
- DAP, se midió diámetro a 1,30 m desde la base del árbol, utilizando una cinta diamétrica.
- Alturas, mediante el uso de un hipsómetro Suunto se determinó: *altura total*, corresponde a la distancia desde el nivel del suelo hasta el ápice del árbol, asumiendo que este es recto y vertical; *altura del fuste* el cual corresponde a la distancia entre el nivel del suelo al punto de la primera rama que forma copa, como se muestra en la Figura 12.

b. Tumbado del árbol

Para el tumbado del árbol, se empleó una motosierra. Se despejó el área de caída de elementos que pudieran dificultar el trabajo y posterior procesamiento. El corte se realizó lo más cerca al suelo (aprox. 15 cm).

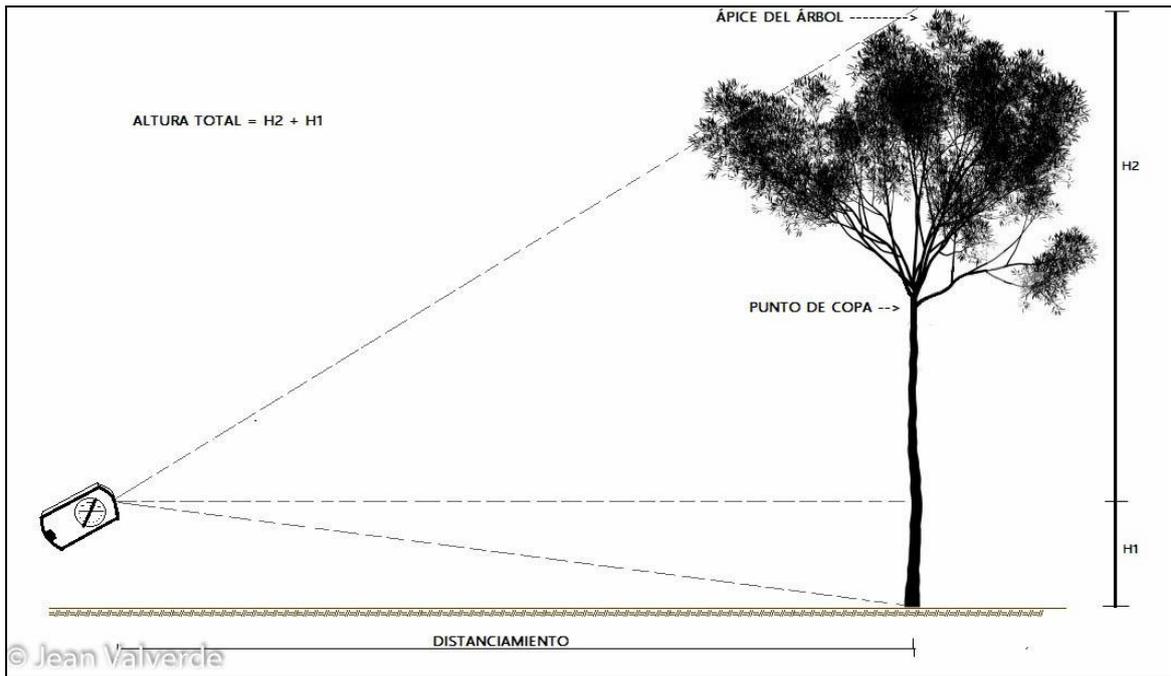


Figura 12: Medición de alturas del árbol en pie.

FUENTE: Elaboración propia

c. Medición del árbol tumbado

Inmediatamente después del tumbado se midió la longitud del fuste (largo), y en seguida se procedió al marcado de los tercios del árbol para la clasificación de madera según su ubicación de origen en el fuste: baja, media y alta. Se llevó a cabo con el uso de una wincha y se concluyó con las medidas del tocón (diámetro y altura).

d. Desrame y trozado

Con el uso de la motosierra se fraccionó el fuste en tres secciones (baja, media y alta) de igual largo, como lo indican Schlegel *et al.* (2001) en el marco de la promoción de carbono en el mercado mundial. Así mismo, con el uso de machete y una motosierra, se procedió al desrame y división de los componentes del árbol (fracciones de fuste, ramas y copa) para su posterior medición. En esta etapa se tomó las longitudes y diámetros de las fracciones del fuste. Se utilizó la medida de la longitud del fuste como referencia para realizar la división del fuste en sus tres secciones (1/3 del largo para cada sección), inmediatamente después de cada corte se tomó y anotó los diámetros de los extremos de las secciones, utilizando una cinta métrica. El fraccionamiento del árbol en cada uno de sus componentes se muestra en la Figura 13.

e. Medición del peso de los componentes

Para el pesado de cada componente se armó una estructura simple con materiales del campo, la cual consistía en un trípode, las patas estaban formadas por ramas gruesas de una altura superior a 2 metros y amarradas con una soga en el extremo superior, en el cual se amarró la balanza romana, de tal modo que los componentes del árbol pudieran suspenderse en el aire para su pesado. La estructura se grafica en la Figura 14.

- Peso del fuste y corteza: se determinó el peso de la madera y corteza por separado, de cada sección del fuste (baja, media y alta), el cual se fraccionó tantas veces como fueron necesario para posibilitar su pesado utilizando una balanza romana de 150kg (peso máximo).
- Peso de ramas: todas las ramas gruesas (mayores a 1,5 cm de diámetro), se cortaron y fueron amarradas con una soga previamente pesada para su descuento; luego se pesaron utilizando una balanza romana digital de 50 kg (peso máximo) por grupos hasta completar la totalidad de ramas por árbol. Se seleccionó al azar tres ramas con corteza, y se embolsó herméticamente para su posterior análisis en el laboratorio.
- Peso de follaje: todas las hojas y las ramitas terminales (iguales o menores a 1,5 cm de diámetro) fueron pesadas en grupos, atadas con una soga previamente pesada para su descuento. Este proceso se repitió hasta completar la totalidad del follaje del árbol. Se tuvo gran cuidado en la medición del peso del follaje, ya que es el parámetro con mayor variabilidad y se debe pesar la totalidad de sus componentes. Se seleccionó al azar tres ramitas terminales, embolsándolas herméticamente para su posterior análisis en el laboratorio.

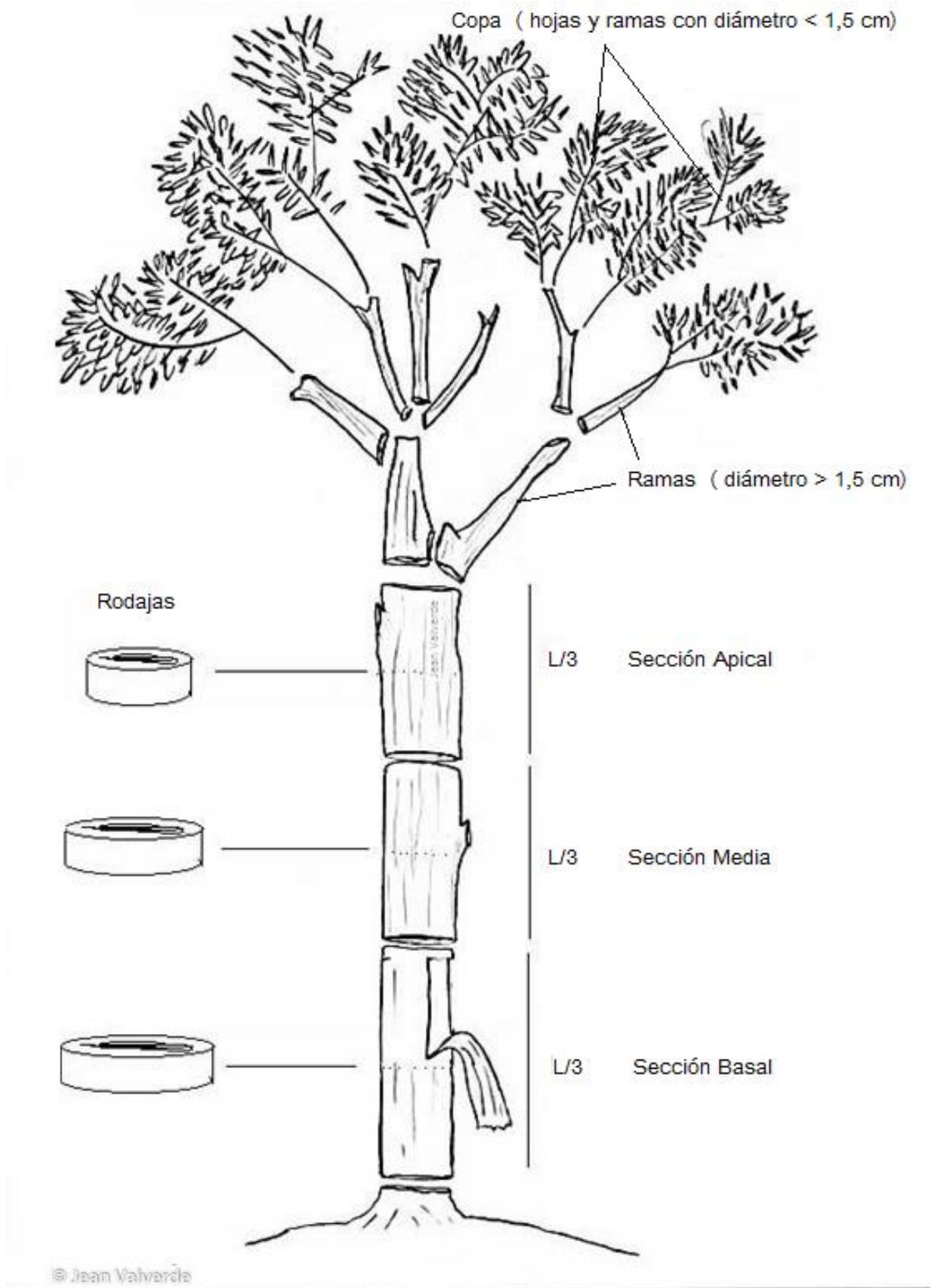


Figura 13: Componentes del árbol para su análisis y obtención de rodajas.
 FUENTE: *Elaboración propia.*

f. Obtención de rodajas

De la parte media de cada sección del fuste se extrajo una rodaja de 15 cm de largo. De las cuales se obtuvieron probetas para la fase de laboratorio (ver figura 13). Las muestras se colocaron en bolsas plásticas selladas herméticamente para evitar la pérdida de humedad.

Las muestras embolsadas obtuvieron una primera codificación con plumón indeleble. El sistema de codificación tuvo el siguiente formato:

Para rodajas: *Número del árbol _ Sección del árbol (B, M, A)_ repetición (si la hubiera)*

Para corteza: *Número del árbol _ Sección del árbol (B, M, A)_ repetición (si la hubiera)*

Para copa: *Número del árbol _ H (hojas) _ repetición*

Para ramas gruesas: *Número del árbol _ R (rama) _repetición*

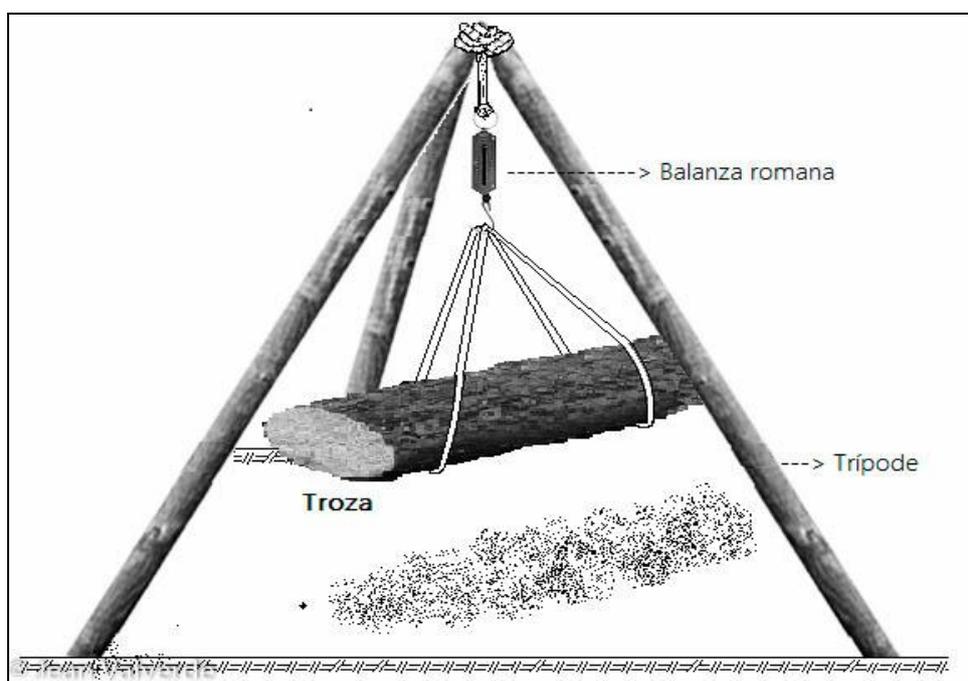


Figura 14: Estructura para el pesado.

FUENTE: *Elaboración propia*

g. Acopio

Las muestras de hojas, ramas, corteza y fuste (en rodajas), se trasladaron a las instalaciones del Instituto Regional de Desarrollo de Sierra de la UNALM, Fundo San Juan de Yanamuco, ubicado a aproximadamente 15 km del distrito de Huertas, y en cuyas instalaciones fueron preparadas para su transporte a la ciudad de Lima. Al material remanente de trozas y ramas, se le habilitó un espacio de acopio, en la misma chacra de

cultivo donde se realizó las mediciones. Las trozas fueron apiladas para su posterior carguío y comercialización como leña por el propietario del predio.

3.1.5. TRANSPORTE

Las muestras embolsadas fueron trasladadas del distrito de Huertas hacia el distrito de Jauja (capital de Jauja), su el traslado hacia la carretera se realizó manualmente, en sacos de yute. Inmediatamente después, las muestras fueron trasladadas hacia el IRD-sierra con el apoyo de un camión. Se embalaron en sacos de 70 kg evitando su maltrato en el transporte. Cabe mencionar que el traslado se realizó en bus de transporte público interprovincial Jauja – Lima.

3.2. FASE DE LABORATORIO

Se llevó a cabo en el laboratorio de Propiedades Físicas y Mecánicas de la Madera de la facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria la Molina.

3.2.1. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

De cada rodaja se obtuvieron dos probetas de madera (3cm x 3cm x 10cm), una para la determinación del contenido de humedad y la otra para determinar la densidad básica, además de una porción de corteza para determinar su contenido de humedad. Se codificó siguiendo la secuencia de la primera codificación y se repitió este procedimiento para la muestra de ramas gruesas. La Figura 15 muestra de manera en la que se obtuvo las probetas a partir de las rodajas y ramas gruesas.

Para las muestras de follaje se obtuvo una muestra conformada por tres ramitas terminales, las cuales fueron cortadas y envueltas en papel metálico para su análisis en el laboratorio. Se pesaron y codificaron de la misma forma.

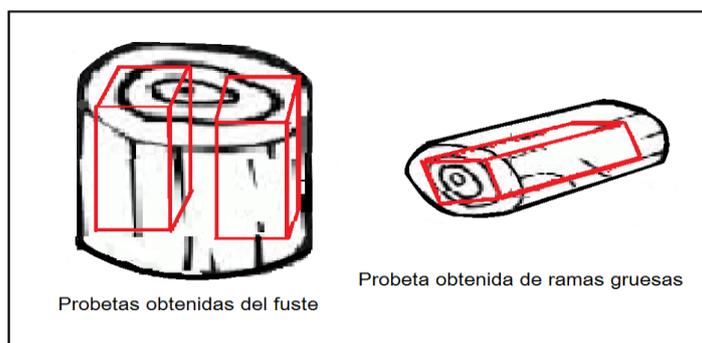


Figura 15: Obtención de probetas obtenidas de las rodajas y ramas gruesas.

FUENTE: Elaboración propia

3.2.2. DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DEL CONTENIDO DE HUMEDAD Y DENSIDAD

a. Densidad básica

Este parámetro se calculó utilizando las 160 probetas de la madera del fuste y de las ramas gruesas, para los 40 árboles de cada una de sus tres secciones (baja, media y alta) y de las ramas gruesas. Se ejecutó según la Norma Técnica Peruana NTP 251.011.

$$Db = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Volumen Saturado}} \times 100$$

El volumen saturado se consiguió mediante el método de desplazamiento de agua, utilizando una balanza digital y un recipiente graduado

b. Contenido de humedad

Se determinó el contenido de humedad, para el fuste en los tres niveles del árbol (superior, medio, inferior), ramas gruesas, corteza y follaje, aplicando la fórmula recomendada en la Norma Técnica Peruana NTP 251.010.

$$\%Humedad = \frac{\text{Peso verde} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$

El peso seco se consiguió utilizando un horno desecador a $100 \pm 2^\circ\text{C}$, hasta obtener un peso constante.

3.3. FASE DE PROCESAMIENTO

3.3.1. CALCULO DE BIOMASA

Se obtuvo la biomasa para el fuste, corteza y hojas de cada árbol con la siguiente fórmula (Simbaña, 2011).

$$Biomasa = \frac{\text{Peso verde}}{1 + CH\%}$$

La biomasa total para cada árbol se calcula como la sumatoria de la biomasa de sus componente (Simbaña 2011).

$$BT = BM + BC + BH$$

Siendo:

CH= contenido de humedad

BT = biomasa total

BM = biomasa de madera (fuste y ramas)

BC = biomasa de corteza

BH = biomasa de hojas

La biomasa del tocón fue incluida tomando la densidad de la sección basal y el volumen del cilindro formado por el diámetro del tocón y su altura (altura de corte).

3.3.2. ELABORACIÓN DE LA ECUACIÓN DE BIOMASA AÉREA

a. Evaluación previa de los datos

Consistió en identificar y establecer relaciones entre la variable dependiente (Biomasa aérea) y las variables independientes (DAP y altura), con la finalidad de detectar posibles errores o datos “outlier” que pudieran sesgar el análisis de la regresión. Esta relación se establece mediante gráficas de dispersión XY entre cada una de las variables independientes y la variable dependiente.

b. Selección de los modelos

Los modelos seleccionados para la estimación de biomasa aérea están definidos tomando como variable dependiente la biomasa aérea.

Tabla 2: Modelos para la estimación de biomasa aérea.

<i>Numero</i>	<i>Modelo para Biomasa</i>
1	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap^2$
2	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap^2h$
3	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap$
4	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap^3$
5	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap^2h^3$
6	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap^3h$
7	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap^3h^3$
8	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap^2h^2$
9	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap^3h^2$
10	Biomasa aérea = $b_0 + b_1LN(dap)$
11	Biomasa aérea = $b_0 + b_1(dap)^{0.5}$
12	Biomasa aérea = $b_0 + b_1(LN(dap))/dap$
13	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap + b_2dap^2h$

Continuación

Numero	Modelo para Biomasa
14	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap + b_2dap^2h^2$
15	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap^2 + b_2dap^2 h^2$
16	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap^3 + b_2dap^2h^2$
17	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap^3 + b_2dap^2h$
18	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap^3 + b_2dap^2h^3$
19	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap^3h + b_2dap^2h^3$
20	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap^2 + b_2dap^3$
21	Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap + b_2dap^3$
22	Ln(Biomasa aérea) = $b_0 + b_1ln(dap)$
23	Ln(Biomasa aérea) = $b_0 + b_1ln(h)$
24	Ln(Biomasa aérea) = $b_0 + b_1ln(dap) + b_2ln(h)$
25	Ln(Biomasa aérea) = $b_0 + b_1 [ln(dap)]^2 + b_2ln(h)$
26	Ln(Biomasa aérea) = $b_0 + b_1ln(dap) + b_2[ln(dap)]^2$
27	Ln(Biomasa aérea) = $b_0 + b_1ln(dap^2h)$
28	Ln(Biomasa aérea) = $b_0 + b_1ln(dap^2h) + b_2ln(h)$

FUENTE: Simbaña (2011), Ruiz (2007).

Adler, citado por Simbaña (2011), selecciona estos modelos, teniendo como variables independientes el diámetro a la altura del pecho (dap) y la altura total (h).

c. Análisis de regresión

Se ensayaron los modelos mediante el análisis de regresión basado en el método de los mínimos cuadrados a un nivel de significación del 0,05.

Teniendo identificadas nuestras variables y con ayuda del software Excel 2010 se realizó el análisis de regresión para cada uno de los modelos seleccionados. La información obtenida fue comparada y analizada de forma individual y entre todos los modelos, se extrajo la información de la bondad de ajuste (r y R^2) y las pruebas de significancia (Fisher y t-student), como primeros criterios de decisión para la aceptación o rechazo del modelo.

d. Bondad del ajuste de las ecuaciones.

Es el primer criterio analizado para la aceptación o rechazo de los modelos. En esta etapa se establece un umbral mínimo del coeficiente de determinación (R^2) que debe ser superado

por los modelos para su aceptación. Se eligieron aquellas ecuaciones cuyo valor del coeficiente de determinación (R^2) superó el 0,8 para modelos lineales y 0,75 para los modelos logarítmicos, como lo recomiendan Alvarado y Obagi (2008).

e. Prueba de significancia Fisher

Para conocer si el modelo lineal seleccionado es significativo o no utilizamos la prueba de Fisher, tomando como criterios de decisión el F calculado y el p-valor, los cuales fueron comparado al F tabular y al nivel de significancia de 0,05 respectivamente, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Criterio de decisión para la prueba de significancia Fisher.

<i>Condición</i>			<i>Decisión</i>
F calculado	>	F tabular	El modelo lineal es significativo
F calculado	<	F tabular	El modelo es constante, no significativo
P-Valor	>	0,05	El modelo lineal es significativo
P-Valor	<	0,05	El modelo es constante, no significativo

FUENTE: Elaboración propia.

Se realizó el análisis de varianzas lo cual permitió contrastar si el modelo es significativo o no. Bajo la hipótesis de que existe una relación lineal entre la variable dependiente y las variables independientes, se realizó la siguiente hipótesis,

$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ (el modelo es constante, no depende de las variables independientes)

$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$ (el modelo lineal es significativo, depende de las variables independientes)

Aquellos modelos lineales que resultaron ser un modelo constante y no significativo fueron rechazados en este segundo análisis.

f. Prueba de significancia t-student

Para conocer si cada una de las variables independientes son significativas en el modelo se utilizó la prueba de significancia t-student, tomando como criterios de decisión el t calculado y el p-valor, los cuales fueron comparado al t tabular y al nivel de significancia de 0,05 respectivamente, como se muestra Tabla 4.

Tabla 4: Criterio de decisión para la prueba de significancia t-student.

<i>Condición</i>			<i>Decisión</i>
t calculado	>	t tabular	La variable x_i es significativa en Y
t calculado	<	t tabular	La variable x_i no tiene un efecto significativo sobre Y
P-Valor	>	0,05	La variable x_i es significativa en Y
P-Valor	<	0,05	La variable x_i no tiene un efecto significativo sobre Y

FUENTE: *Elaboración propia.*

El análisis de t-student permitió el contraste de la significancia de las variables independientes, bajo la siguiente hipótesis,

$$H_0: b_1 = b_2 \dots = b_n = 0$$

$$H_1: \text{al menos un } b_n \neq 0$$

Uriel (2013), Menciona que b_j mide el efecto parcial de x_j , sobre Y, después de controlar para todas las otras variables independientes, $H_0: b_j = 0$ significa que, una vez que $x_1, x_2 \dots x_j - 1, \dots, x_k$ han sido tenidos en cuenta, x no tiene efecto sobre Y. En base a ello, los modelos que presentaron una variable sin efecto significativo sobre Y fueron rechazados, ya que se estaría ante un modelo más complejo que el necesario para obtener resultados parecidos.

g. Análisis de los residuos

Como lo recomiendan Montgomery (2004); Chatterjee y Price (1977) y Vilar (2006), el análisis de los residuos se efectuó de forma gráfica, observando e identificando los ajustes no adecuados de los modelos. Se elaboró una gráfica de dispersión entre el error (e_i) y la biomasa estimada por el modelo (\hat{y}_i). Siendo el error:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i$$

En los casos donde los modelos presentaron un ajuste de sus errores no deseados se realizó una ponderación de los modelos.

h. Regresión por mínimos cuadrados ponderados.

h.1. Ponderación

Consiste en la ponderación de las variables independientes y la variable dependiente a través de un factor “K” para nuevamente realizar el análisis de regresión y el análisis de residuos esperando que las ecuaciones no vuelvan a presentar ninguno de los ajustes no adecuados presentados anteriormente. Se realizó la ponderación de la siguiente forma:

$$\frac{\text{Biomasa aérea}}{K} = \frac{b_0}{K} + \frac{X_i}{K}$$

Para un $K = (X_i)^u$. donde $u = 0,2; 0,3; 0,4; \dots; u_i$

Se empleó distintos u_i hasta lograr un ajuste adecuado, además se utilizó el análisis visual de la distribución de los errores para elegir el mejor factor K de ponderación. Se aumentó de forma constante el valor de u_i hasta lograr un ajuste adecuado.

h.2. Análisis estadístico de los modelos ponderados

Se volvió a realizar el análisis de los resultados obtenidos a partir de la regresión de los modelos ponderados. Obteniendo nuevos resultados en la bondad de ajuste (r y R^2), pruebas de significancia (Fisher y t-student) y el análisis de los residuos. Teniendo el mismo criterio de decisión utilizado para las ecuaciones no ponderadas, se seleccionaron las ecuaciones que cumplieran cada uno de ellos.

i. Índice de Furnival para modelos ponderadas.

El último criterio de selección es el índice de Furnival. Al tratarse de modelos con diferentes variables dependientes luego de la ponderación (diferentes factores K de ponderación) se utilizó un índice derivado por Furnival (1961) y Cox (1961) el cual se expresa de la siguiente manera:

$$x = \left(\text{antilog} \frac{\sum \log_{10} \sqrt{v_i}}{n} \right)^{-1} xS$$

Dónde:

S: el error estándar del modelo.

V_i : valor número del factor K de ponderación.

n: número de observaciones.

3.3.3. SELECCIÓN DEL MEJOR MODELO.

Utilizando el valor del índice de Furnival obtenido a partir de las ecuaciones ponderadas se realizó la selección del mejor modelo, teniendo como criterio de decisión el menor valor del índice de Furnival.

3.3.4. OBTENCIÓN DE COEFICIENTES PARA ECUACIONES PONDERADAS.

Con lo anunciado por Chatterjee y Price (1977) y Montgomery *et al.* (2006), el procedimiento realizado para obtener los coeficientes ponderados para las ecuaciones que cumplieron con una varianza de error constante se llevó a cabo de la siguiente manera:

Tomando como ejemplo el modelo, Biomasa aérea = $b_0 + b_1dap^2h^2$ y con un factor de ponderación $1/K$ tenemos:

Para $K = dap^2h^2$ (igual a la variable independiente)

$$\frac{\text{Biomasa aérea}}{K} = \frac{b_0}{K} + \frac{b_1dap^2h^2}{K}$$

El modelo tendrá la siguiente forma:

$$\text{Biomasa aérea} = b_1' + b_0'(dap^2h^2)$$

Para $K = (dap^2h^2)^n$ (diferente a la variable independiente)

$$\frac{\text{Biomasa aérea}}{K} = \frac{b_0}{K} + \frac{b_1dap^2h^2}{K}$$

El modelo tendrá la siguiente forma:

$$\text{Biomasa aérea} = 0 + b_0'\left(\frac{1}{dap^2h^2}\right) + b_1'(dap^2h^2)$$

Para este caso la intercepción se hace cero para la regresión y los coeficientes ponderados para la ecuación inicial serán b_0 (intercepción) = b_0' y $b_1 = b_1'$.

3.3.5. PRECISIÓN DE LA ECUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LOS SUPUESTOS DE LA REGRESIÓN.

A la ecuación seleccionada se le realizó algunas pruebas matemáticas y estadísticas que permitieran identificar la precisión y la mejora en el ajuste luego de la ponderación:

- Precisión en la biomasa aérea total obtenida a partir de la ecuación y la obtenida en campo (real), expresada en el porcentaje del error.
- Análisis de la dispersión de los valores de biomasa aérea, entre la biomasa real (obtenida en campo) y la biomasa obtenida con la ecuación.

- Análisis de dispersión de los residuos, entre la biomasa real (obtenida en campo) y la biomasa obtenida con la ecuación.
- Análisis de la precisión de la ecuación para el cálculo individual de la biomasa para cada uno de los individuos muestreados. Mediante el uso del intervalo de confianza al 95 por ciento para la ecuación obtenida.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. ELECCIÓN DE ÁRBOLES

La primera chacra seleccionada se ubicó en las coordenadas UTM E448921, N8700347 correspondientes al centro de la chacra y los árboles seleccionados llevan los números correlativos del 1 al 20 siendo los que mostraron una mayor representatividad de la chacra y de todos los árboles plantados. La segunda chacra seleccionada se encontró ubicada en las coordenadas UTM E449870, N8700916 correspondientes al centro de la segunda chacra seleccionada, del mismo modo se obtuvieron los árboles con los números correlativos del 21 a 40 y con las características representativas de la chacra y la totalidad de árboles plantados. Este método para la selección de árboles nos brindó una muestra con resultados satisfactorios con respecto a la representativa del total de árboles del distrito de Huertas.

2. PLANIFICACIÓN DE TRABAJO DE CAMPO

La planificación del trabajo de campo fue parte importante en el desarrollo de las actividades realizadas, ya que permitió cumplir con los tiempos planteados desde un inicio y obtener la información completa para los 40 árboles. El correcto marcado de los árboles para su análisis destructivo permitió llevar la contabilidad y manejar los tiempos requeridos.

La correcta formación de los equipos de trabajo y las responsabilidades asignadas, favoreció en la dinámica del trabajo de campo pudiendo desarrollar las actividades de forma sistemática y organizada, sin presentarse “cuellos de botella” en ninguna de las actividades.

3. CAPACITACIÓN DE LOS EQUIPOS DE TRABAJO

El conocer la metodología de trabajo fue fundamental para que las actividades se realicen de forma sistemática. Así mismo los integrantes de cada equipo de trabajo conocían la importancia de una correcta toma de datos y análisis de cada componente del árbol, lo que favoreció en la calidad de la información recogida. El conocer las medidas de seguridad fue parte importante de la capacitación, para cuando se iniciaron las actividades de tumbado, todos los equipos de trabajo estuvieron alertas y se mantuvieron en las “rutas de escape”

identificadas previamente. El adecuado uso de las herramientas contribuyó a no tener accidentes durante las actividades de campo.

4. MEDICIÓN DE BIOMASA

4.1. MEDIDAS DEL ÁRBOL EN PIE

Se tomaron las medidas de los árboles en pie un día previo al tumbado, teniendo en cuenta que los árboles se encontraban rodeando las chacras de cultivo se pudo tomar las alturas a un distanciamiento de 15 y 20 metros con el uso del hipsómetro, lo cual garantiza medidas con mayor precisión y una lectura directa del instrumento. La Figura 16 muestra el momento de la toma de información de alturas y diámetros a la altura del pecho.



Figura 16: Medición en campo de alturas y DAP de los árboles.

La Tabla 5 contiene la información obtenida de los árboles en pie. Como se muestra los promedios de la altura total, altura al punto de copa y DAP son de 18,87 m 15,05 m y 20,05cm respectivamente. Promedios por debajo de los registrados por Orwa *et al.* (2009) y Lanzara y Pizzetti (1978) para la los árboles de *E. globulus* en su estado de madurez, por lo tanto los árboles muestreados y la población total de árboles del distrito de Huerta en promedio aun no llegan a su estado de madurez.

Tabla 5: DAP y alturas de árboles en pie para 40 individuos de las plantaciones de *E. globulus*.

Número	DAP (cm)	Altura Total (m)	Altura punto de copa (m)	Número	DAP (cm)	Altura Total (m)	Altura punto de copa (m)
1	26,42	18,50	16,00	21	28,65	21,75	17,25
2	19,89	15,50	13,75	22	28,33	15,75	12,00
3	29,19	21,25	18,00	23	20,69	19,50	14,50
4	26,83	22,25	17,75	24	26,58	20,75	16,75
5	25,62	21,25	17,25	25	23,24	16,50	13,00
6	25,46	20,50	17,50	26	36,76	21,50	17,00
7	28,65	18,50	15,75	27	34,06	24,50	18,00
8	23,87	19,50	16,00	28	25,46	17,50	13,00
9	21,33	14,00	11,25	29	23,71	14,00	11,75
10	18,78	15,25	12,50	30	17,83	23,75	19,00
11	18,14	15,75	13,00	31	23,87	21,00	17,00
12	21,04	14,00	11,00	32	23,40	19,75	14,50
13	24,19	18,25	15,25	33	25,46	22,50	18,00
14	28,81	21,00	16,75	34	23,71	19,75	16,00
15	18,84	16,00	13,00	35	20,85	17,50	12,50
16	16,71	15,00	11,00	36	20,37	17,50	13,00
17	23,62	20,00	16,25	37	23,08	17,25	13,00
18	24,92	22,00	17,75	38	28,97	20,50	16,25
19	23,55	20,75	16,75	39	22,85	18,75	13,00
20	20,69	15,50	13,50	40	17,51	20,00	16,50

En la Figura 17 se aprecia la relación entre altura total del árbol y DAP para los 40 individuos. La apreciación visual lleva a considerar que los árboles que presentan mayor DAP, también presentarán mayor altura total; sin embargo, se encuentran fluctuaciones en algunos árboles con valores bajos de DAP que pueden presentar alturas superiores a lo esperado. Dicho comportamiento se presenta en árboles de crecimiento rápido, cuyo crecimiento apical supera en proporción al crecimiento diamétrico en sus primeros estadios. Orwa *et al.* (2009) y Lanzara y Pizzetti (1978) describen al *E. globulus* como un árbol

grande a muy grande, que en condiciones ideales puede llegar a tener una altura de 40 a 50 m, lo cual nos indica que los árboles muestreados (con un promedio de altura total de 18,87 m) aún no se encontraban en su madurez y su crecimiento apical era acelerado. Esta lógica se apoya al encontrar arboles con estas características en la población de Huertas, considerados como “outlier” para el estudio y no tomados como muestra.

La condición del sitio es un factor que influye directamente en el crecimiento del *E. globulus*, el cual al ser plantado en linderos cuenta con las condiciones de luz necesaria y además de estar ubicados en suelos agrícola con constante abastecimiento de agua, características ideales para un crecimiento rápido, propio de la especie. Arias (2004), en su estudio concluye que las relaciones altura-diámetro dependen de la calidad de sitio y la densidad del rodal, por lo tanto estas relaciones son específicas para cada rodal.

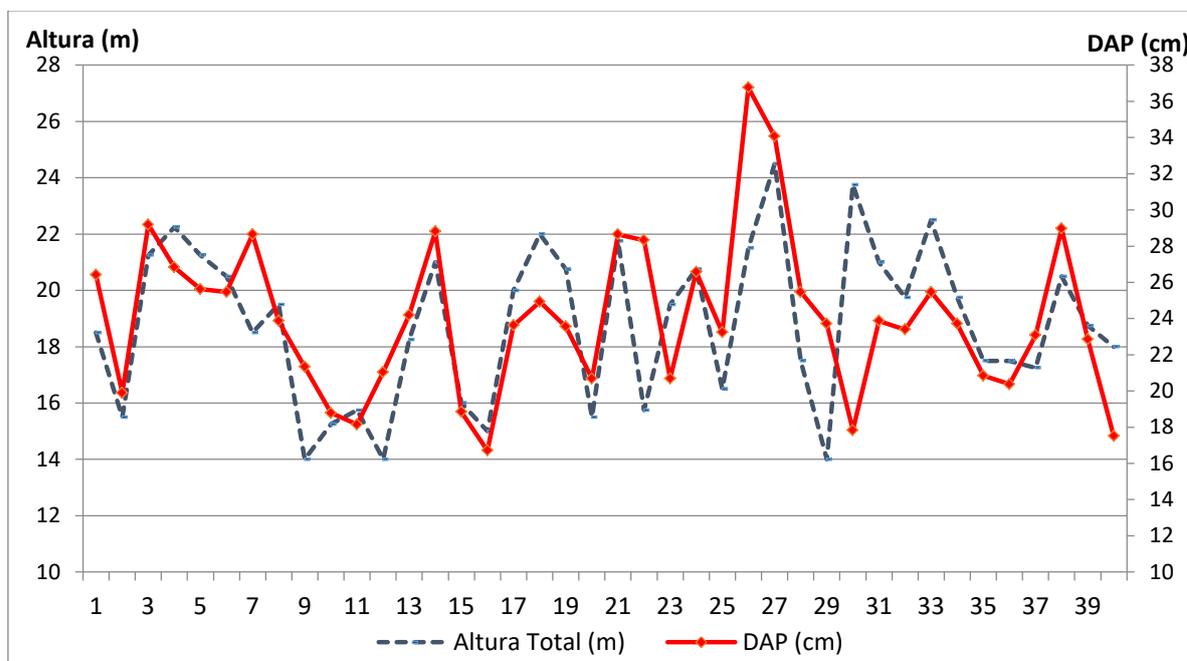


Figura 17: Relación de las alturas totales (m) con los DAP (cm) de los 40 árboles.

4.2. TUMBADO DEL ÁRBOL

El tumbado de los árboles se llevó a cabo siguiendo la enumeración asignada a cada individuo y teniendo en cuenta un corte por debajo de 15 cm de altura. En algunos individuos por seguridad del operador se cortó por encima de este valor. La Figura 18 muestra el momento del corte. El uso de la motosierra para el tumbado fue indispensable, debido a la rapidez en el corte y al menor desperdicio. El uso de otras herramientas de corte como hacha o tronadora, podrían ser perjudicial para el operador por el nivel de esfuerzo a

realizar y para el estudio por la pérdida de biomasa. Así mismo el tiempo de corte es superior lo cual demandaría mayor tiempo en la actividad, resultando justificable los costos para el uso de una motosierra y el pago al operador.



Figura 18: Tumbado de los árboles.

Tabla 6: Alturas de corte para cada árbol.

<i>Número del árbol</i>	<i>Altura del tocón (cm)</i>	<i>Número del árbol</i>	<i>Altura del tocón (cm)</i>	<i>Número del árbol</i>	<i>Altura del tocón (cm)</i>	<i>Número del árbol</i>	<i>Altura del tocón (cm)</i>
1	5,6	11	11	21	7	31	6
2	15,5	12	5,5	22	18	32	9
3	7	13	8	23	11	33	10
4	8	14	12	24	10	34	6
5	11	15	10	25	7	35	12
6	11	16	6	26	11	36	11
7	10	17	17	27	5	37	15
8	5	18	36	28	12	38	17
9	11	19	9	29	8	39	23
10	5	20	11	30	11	40	14

La Tabla 6 muestran las alturas de corte. Estas alturas fueron registradas junto con los diámetros para cada tocón, medidas que luego fueron utilizadas para el cálculo de la biomasa del tocón para cada árbol.

4.3. MEDICIÓN DEL ÁRBOL TUMBADO

Realizar la medición del largo del fuste inmediatamente después del tumbado y antes del desrame, resultó de suma importancia para poder identificar y marcar el punto donde inicia la primera rama que forma copa, la cual será separada del fuste en el desrame. La importancia de medir el largo del fuste radicó en identificar y marcar las tres secciones del fuste para realizar los cortes inmediatamente después del desrame. Los largos medidos para cada árbol se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Medidas del árbol tumbado (largo del fuste).

<i>Número del árbol</i>	<i>Largo del fuste (m)</i>	<i>Número del árbol</i>	<i>Largo del fuste (m)</i>	<i>Número del árbol</i>	<i>Largo del fuste (m)</i>	<i>Número del árbol</i>	<i>Largo del fuste (m)</i>
1	15,2	11	12,6	21	16,7	31	17,5
2	13,2	12	11,6	22	10,4	32	13,35
3	17,1	13	14,6	23	12,7	33	17,7
4	17,5	14	15,1	24	16	34	17,2
5	16,8	15	13,6	25	11,8	35	13
6	17,7	16	10,2	26	15,2	36	13,3
7	14,9	17	16	27	16,7	37	13
8	16,1	18	16,2	28	11,8	38	16
9	14,3	19	15,4	29	11,55	39	13,7
10	13,1	20	13,7	30	18,6	40	16

4.4. DESRAME Y TROZADO

El desrame de los árboles se llevó a cabo en dos etapas, el primer desrame fue ejecutado utilizando la motosierra sobre las ramas gruesas y la separación de la copa, como se muestra en la Figura 19. El uso de la motosierra en el desrame contribuyó en aligerar el proceso de desrame y disminuir los tiempos en dicha actividad. El segundo desrame se llevó a cabo utilizando machetes como se muestra en la Figura 20 y tuvo como finalidad separar las ramas gruesas de la copa para su posterior pesado, el proceso fue dinámico y no se presentaron complicaciones.



Figura 19: Desrame con motosierra.



Figura 20: Separación de las ramas gruesas y copa del árbol.

4.5. MEDICIÓN DE LOS PESOS DE CADA COMPONENTE Y OBTENCIÓN DE RODAJAS.

La toma de los pesos se llevó de forma ordenada con el uso de 3 trípodes (una para cada componente), Se recomienda que estas estructuras se mantengan cerca del árbol tumbado, evitando traslados innecesarios y las rodajas mantenerlas agrupadas según el número del árbol al cual pertenecen, para facilitar su conteo (Figuras 21 y 22).



Figura 21: Pesado de hojas (a) y ramas (b). Balanza romana digital (c).

El uso de una balanza romana digital resultó un factor importante para la obtención de los pesos de la copa, al tratarse de componentes que requieren varias mediciones para obtener su peso total. El uso de una balanza con alta precisión disminuye el error que podría acumularse dado el número de veces que hace falta realizar la operación de pesado según el tamaño de la copa.

Para el pesado del fuste es preferible tener una balanza con una capacidad igual o superior a los 150 kilos, esto evitará efectuar demasiados cortes, lo que trae como consecuencia una mayor pérdida de madera. La pérdida de madera por cada corte con motosierra es mínima, pero demasiados cortes en suma podrían llegar a ser relevante para el estudio. El registro de los pesos húmedos de cada componente del árbol se muestra en el Anexo 2.



Figura 22: Pesado de trozas (a) y obtención de rodajas (b).

4.6. ACOPIO

Las trozas, ramas y copa fueron apiladas al extremo más cercano a la carretera, en el predio donde se realizó el muestreo, permaneciendo en el lugar 2 días antes de su comercialización. La Figura 23 muestra el acopio de las trozas correspondientes al primer día de la segunda chacra muestreada. El acopio de las rodajas y muestras se realizó en el Instituto Regional de Desarrollo de Sierra Fundo San Juan de Yanamucllo (IRD-Sierra). Las muestras se mantuvieron en todo momento protegidos de los efectos del clima, evitando la ganancia de humedad por las lluvias o la pérdida por la incidencia de la radiación sobre ellas.



Figura 23: Acopio de las trozas.

4.7. TRANSPORTE

Se cargaron las muestras y rodajas de la chacra hacia la carretera, donde fueron transportadas hacia el IRD-Sierra con ayuda de una motocarga. Este transporte se realizó al término de cada jornada.

El transporte de las muestras y rodajas correctamente embolsadas hacia la ciudad de Lima se realizó por una agencia de transporte interprovincial, se trasladó un total de 10 costales de aproximadamente 50 kilos cada uno. Ya en ciudad de Lima se llevó las muestras a la Universidad Nacional Agraria la Molina, para la preparación de probetas y su análisis en el laboratorio. Este tipo de transporte no es recomendable de realizar, debido al riesgo de que las muestras puedan perder humedad. Lo ideal para el estudio es realizar el estudio en la misma ciudad donde se toman las muestras, por motivos ajenos a la planificación del estudio no se pudo realizar de dicha forma.

5. FASE DE LABORATORIO

5.1. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS Y MUESTRAS

Las muestras y probetas fueron preparadas para su análisis en el laboratorio como se muestra en la Figura 24 y 25.



Figura 24: Preparación de las muestras de hojas



Figura 25: Preparación de las probetas del fuste y corteza.

La preparación de las muestras de hojas con 3 ramitas terminadas de diferentes partes de la copa permitió tener una muestra representativa dentro del mismo individuo, favoreciendo a la precisión del contenido de humedad promedio para la copa de cada árbol. Para la preparación de las probetas el obtenerlas con medidas aproximadas a 3x3x10cm (madera del fuste), contribuyó a un mejor análisis en el laboratorio al poder utilizar los mismos equipos e instrumentos de medición para cada uno de los componentes.

5.2. DENSIDAD

La Figura 26 muestra la obtención del volumen saturado para una de las probetas, con dicho volumen saturado se procedió a estimar la densidad básica de la madera para la sección del árbol o rama gruesa (de donde proceda la probeta). La metodología empleada por desplazamiento de agua y utilizando una balanza analítica permite obtener una medida directa y precisa del volumen saturado. Cabe mencionar que las probetas se saturaron durante 24 horas previas, sumergiéndolas en agua como se muestra en la Figura 27.



Figura 26: Obtención del volumen saturado para la determinación de densidad básica.



Figura 27: Saturación de las probetas para el cálculo de volumen saturado.

Los promedios obtenidos para la madera del fuste de *E. globulus* son de $49,84 \text{ g/cm}^3$, $51,82 \text{ g/cm}^3$ y $55,84 \text{ g/cm}^3$ para las secciones basal, media y apical respectivamente, las ramas tienen una densidad básica promedio de $60,48 \text{ g/cm}^3$. Los resultados obtenidos concuerdan con los rangos obtenidos por Monteoliva *et al.* (2002), cuyos valores están entre de $0,49 \text{ kg/dm}^3$ y $0,608 \text{ kg/dm}^3$. Esta tendencia creciente de la base hacia el ápice del árbol es también descrita por Valdivieso (2001); Busnardo *et al.* (1983) y Simbaña (2011), para árboles de *E. globulus*. Este último añade que “la diferencia de valores de densidad básica entre madera de la base media y alta son significativas, tales incrementos tienden a ser menores en la región superior del tallo”.

El valor promedio de la densidad básica del fuste es de $52,50 \text{ g/cm}^3$, valor cercano al obtenido por Simbaña (2011), que fue $0,579 \text{ g/cm}^3$ y al de Monteoliva *et al.* (2002) con un valor de $0,549 \text{ g/cm}^3$.

Tabla 8: Densidad Básica por cada componente de 40 árboles de *E. globulus*.

<i>Densidad básica (g/cm³)</i>									
	<i>Fuste</i>			<i>Ramas</i>	<i>Fuste</i>			<i>Ramas</i>	
	<i>Basal</i>	<i>Media</i>	<i>Apical</i>		<i>Basal</i>	<i>Media</i>	<i>Apical</i>		
1	45,04	50,10	51,26	60,66	21	51,36	50,10	54,66	58,79
2	51,01	48,56	51,98	60,94	22	49,20	50,00	55,35	60,60
3	51,76	54,83	61,25	59,28	23	50,20	51,63	54,18	63,00
4	43,20	47,62	47,36	61,40	24	47,37	49,13	55,69	59,09

Continuación

<i>Densidad básica (g/cm³)</i>									
	<i>Fuste</i>			<i>Ramas</i>		<i>Fuste</i>			<i>Ramas</i>
	<i>Basal</i>	<i>Media</i>	<i>Apical</i>			<i>Basal</i>	<i>Media</i>	<i>Apical</i>	
5	56,71	54,67	60,88	62,79	25	56,02	57,58	59,17	61,12
6	57,67	54,31	61,11	58,39	26	53,01	54,02	58,38	61,01
7	47,05	49,50	50,73	58,75	27	44,59	51,24	54,25	59,68
8	45,60	52,13	52,52	61,32	28	55,33	55,75	55,49	61,40
9	55,70	58,86	57,80	58,81	29	45,02	47,72	59,96	58,67
10	47,85	50,76	53,63	62,83	30	44,38	49,60	57,43	58,65
11	42,62	45,90	49,70	61,21	31	55,28	55,74	56,84	57,76
12	46,27	47,72	51,09	61,88	32	55,24	54,03	55,60	60,61
13	54,66	51,37	51,65	62,69	33	49,41	54,55	55,38	59,20
14	42,20	52,01	56,98	61,15	34	51,95	54,03	57,29	60,29
15	53,35	48,94	54,11	59,16	35	49,75	57,01	58,70	61,05
16	43,38	44,56	48,42	62,92	36	51,70	55,99	59,55	58,23
17	52,14	52,89	55,67	62,43	37	46,82	45,39	52,13	61,89
18	52,66	53,01	62,46	58,55	38	48,31	47,46	58,32	58,42
19	50,85	53,43	61,69	58,97	39	47,53	54,47	57,73	62,11
20	51,00	54,26	60,32	62,82	40	50,55	51,99	56,88	60,54
Promedio:						49,84	51,82	55,84	60,48

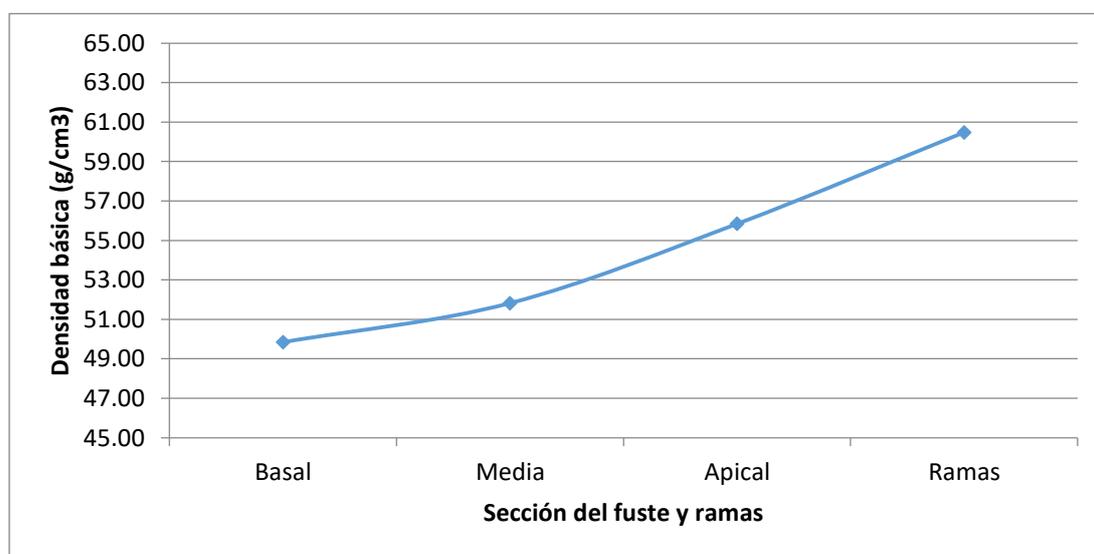


Figura 28: Densidad básica promedio por sección del árbol.

Arroyo (1983) plantea que la tendencia creciente de la densidad básica desde la base a la copa es ocasionada por un crecimiento rápido de la especie. Talbert y Jett, citados por Pereyra y Gelid (2002), en su estudio de la madera juvenil de los árboles más viejos de *Pinus taeda* obtuvo que la madera juvenil de estos árboles poseen considerablemente mayor densidad que la madera juvenil de árboles más jóvenes y mayor densidad básica que la madera del área basal. Si bien no existe muchos estudios para este fenómeno, diversos autores concuerdan en la teoría que aquellos arboles cuyo crecimiento es acelerado y soportan grandes tensiones en la sección apical debido a una copa frondosa y abundante ramificación, tienden a tener una mayor densidad básica en su madera juvenil, lo cual también es sustentado en la teoría de una mayor compactación de la madera.

5.3. CONTENIDO DE HUMEDAD

La Figura 29 muestra el proceso de secado de las probetas y muestras para el cálculo de su contenido de humedad, se llevó a cabo a una temperatura que oscilaba entre 100 a 102 °C y utilizando 3 hornos desecadores. Para las probetas del fuste se requirió de 6 días para llegar a su estado anhidro a igual que las ramas, 4 días para la corteza y 3 días para hojas. Con el peso seco de las probetas y muestras se estimó el contenido de humedad de cada componente el cual se muestra en la Tabla 9.



Figura 29: Secado en estufa de las probetas de madera, corteza y hojas hasta su estado anhidro.

Analizando los promedios de contenido de humedad obtenidos para cada componente del árbol, se muestra que la corteza tiene el mayor valor seguido por las hojas y finalmente las ramas, siendo estos promedios 127,39, 92,61 y 83,38 por ciento respectivamente. La madera muestra valores decrecientes desde la base hacia el ápice del árbol, los valores son 114,03 por ciento para la sección basal, 104,20 por ciento para la sección media y 87,22 por ciento para la sección apical del fuste, como se grafica en la Figura 24. Esta relación concuerda con los resultados de Simbaña (2011), cuyos promedios del contenido de humedad para corteza y hojas fueron 123,59 y 105,39 por ciento respectivamente; así mismo, 99,51 por ciento para la madera basal, 90,60 por ciento para la madera de la sección media y 89,60 por ciento para la madera de la sección alta.

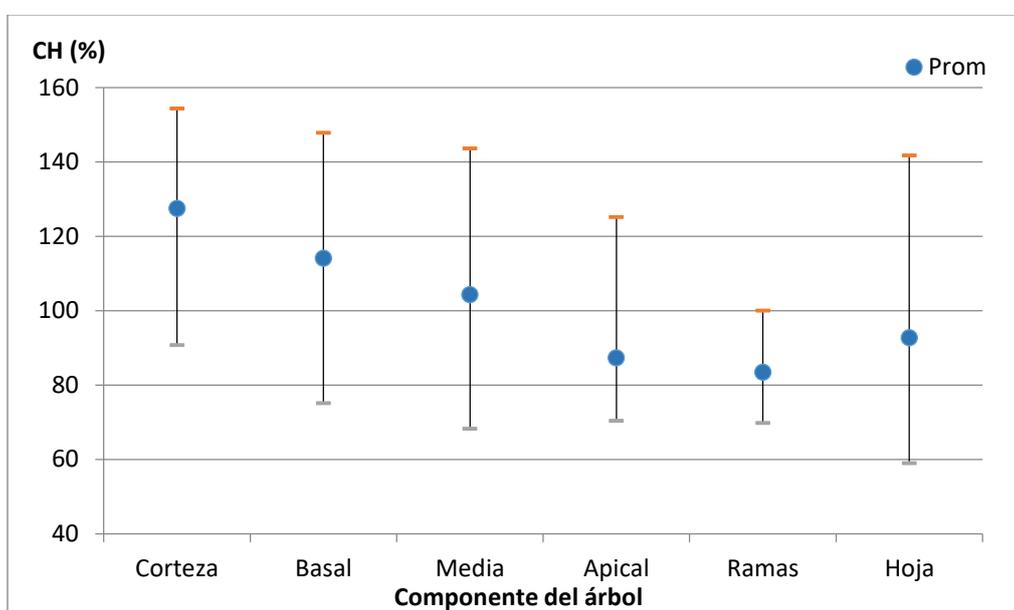


Figura 30: Contenido de humedad por componentes del árbol

La Figura 30 nos grafica los valores máximos y mínimos del contenido de humedad contrastados con los promedios. Donde se puede notar que los valores de contenido de humedad para las ramas posee una menor variación con respecto al resto de componentes. Este comportamiento puede deberse al resultado de tener unidades muestrales con características semejantes. Al momento de definir un diámetro mínimo para las ramas se está realizando una disminución de la variabilidad para este componente. Así mismo, una de las características de la especie es tener un mayor contenido de humedad en su madera con menor densidad, sin embargo esta humedad está conformada por una mayor proporción de agua libre fácilmente eliminable, lo cual aumenta la variabilidad para madera de menor

densidad como la corteza y el fuste, y proporciona una menor variabilidad para las ramas con mayor densidad, al contener menor proporción de agua libre y mayor agua higroscópica y de constitución difícil de eliminar por el medio ambiente.

La hoja muestra la mayor variabilidad en los valores, al mostrar máximos y mínimos bastante alejados del promedio. La variabilidad de la hoja puede deberse a la naturaleza propia de la copa de ganar y perder humedad con mayor o menor facilidad dependiendo de las condiciones climáticas en las que se encuentre; es decir, un día previo de lluvia puede saturar las hojas con mayor facilidad que a las ramas y el fuste del árbol, y un día soleado puede disminuir el contenido de humedad con la misma facilidad.

El contenido de humedad de la corteza, al igual que el del fuste, tiene una tendencia decreciente desde la base del árbol hacia el ápice; los valores que se muestran para la corteza corresponden a los promedios de las 3 secciones del fuste.

Tabla 9: Contenido de humedad componente de 40 árboles de *E. globulus*.

	<i>Contenido de humedad (%)</i>					
	<i>Fuste</i>			<i>Ramas</i>	<i>Corteza</i>	<i>Hoja</i>
	<i>Basal</i>	<i>Media</i>	<i>Apical</i>			
1	120,88	132,74	109,86	86,06	139,56	107,41
2	119,44	121,68	100,39	75,67	133,76	129,03
3	107,20	89,24	79,13	74,75	148,80	95,31
4	133,06	143,52	125,05	70,49	154,27	59,74
5	87,37	88,49	76,01	75,07	140,52	76,32
6	91,19	97,01	77,92	81,68	134,19	83,87
7	128,39	121,17	104,42	72,48	112,28	98,21
8	137,03	103,90	101,32	78,91	114,43	91,89
9	94,20	86,39	78,67	99,98	126,29	78,26
10	121,29	110,14	92,76	76,07	124,91	107,78
11	147,15	126,71	97,75	81,64	116,35	91,18
12	135,01	125,93	83,66	71,97	129,71	93,98
13	97,06	99,21	88,39	70,10	124,32	89,13
14	135,33	97,88	76,55	83,01	122,55	60,22

Continuación

	<i>Contenido de humedad (%)</i>					
15	106,27	115,67	86,11	79,02	112,04	83,70
16	147,79	126,03	99,16	101,89	128,13	58,90
17	75,05	68,58	73,64	89,20	116,59	102,60
18	105,99	103,66	73,61	86,75	115,83	107,61
19	105,88	101,86	71,70	91,19	122,18	86,17
20	97,64	89,65	75,99	88,22	90,63	58,88
21	113,89	111,74	92,96	97,82	147,40	80,00
22	115,18	102,04	96,34	87,22	145,88	93,18
23	106,05	98,22	84,93	98,99	115,31	91,18
24	126,15	115,56	92,52	85,63	151,80	85,45
25	98,72	68,16	78,06	100,36	149,12	88,66
26	106,33	100,37	79,41	87,34	133,95	78,57
27	129,89	105,81	96,27	89,27	139,51	94,57
28	101,26	89,23	89,08	82,44	121,90	101,43
29	133,11	131,06	84,96	87,25	112,93	101,22
30	131,05	115,48	70,83	78,36	108,95	87,10
31	105,09	92,71	76,11	74,48	131,97	125,81
32	97,63	92,82	86,10	87,73	107,26	105,26
33	117,56	99,08	92,87	80,82	115,98	87,80
34	108,27	95,52	87,10	88,97	123,36	77,46
35	117,61	91,62	87,89	72,76	116,33	141,67
36	101,74	90,65	88,54	85,76	117,22	96,51
37	128,88	124,02	100,78	69,67	122,62	95,38
38	122,84	124,32	85,81	89,09	146,75	108,82
39	120,41	95,90	75,76	80,45	131,05	106,90
40	86,19	74,66	70,32	76,83	148,97	97,25
Promedio	114,03	104,21	87,22	83,39	127,39	92,61

6. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

6.1. CALCULO DE BIOMASA

Se obtuvo una biomasa aérea total de 10413,36 kg correspondiente a los 40 árboles muestreados de *E. globulus*, con un promedio de 260,33 kg por cada árbol. El valor obtenido se encuentra muy por debajo del peso húmedo muestreado en el campo, el cual sumó un total de 20828,37 kg. El porcentaje de biomasa o peso seco del árbol resultó el 49,99 por ciento del peso húmedo, lo cual indica que aproximadamente la mitad del peso de los árboles de *E. globulus* está conformada por agua. La Tabla 10 muestra la relación de árboles y su biomasa para cada uno de sus componentes.

Tabla 10: Resultados de la biomasa aérea por componente de 40 árboles de *E. globulus*.

	<i>Biomasa por componente (kg)</i>							<i>Biomasa total (kg)</i>
	<i>Fuste</i>			<i>Ramas</i>	<i>Corteza</i>	<i>Copa</i>	<i>Tocón</i>	
	<i>Basal</i>	<i>Media</i>	<i>Apical</i>					
1	97,00	59,33	36,02	5,02	23,33	20,95	1,41	243,06
2	47,60	26,18	14,46	18,36	10,86	31,92	2,61	151,99
3	126,51	92,86	21,86	19,43	25,23	31,25	2,66	319,81
4	117,51	74,30	8,72	24,93	24,70	70,84	2,09	323,08
5	119,33	93,43	36,73	37,63	24,89	73,88	3,45	389,35
6	117,37	85,28	55,06	17,28	26,95	51,26	3,47	356,67
7	103,66	49,81	26,54	36,79	25,45	81,32	3,04	326,61
8	36,84	22,62	6,81	10,40	9,20	29,52	1,11	116,51
9	73,41	38,76	22,77	9,86	15,05	38,75	2,31	200,91
10	57,85	24,12	20,60	24,00	13,13	65,14	0,73	205,57
11	39,27	18,96	12,53	10,22	10,27	44,18	1,42	136,86
12	45,25	27,07	27,91	26,46	12,46	45,17	0,91	185,23
13	107,40	38,02	12,38	20,72	19,18	57,43	2,13	257,26
14	90,84	90,53	27,92	17,26	25,54	49,75	3,63	305,48
15	95,00	21,35	8,18	11,93	17,29	21,86	1,60	177,20
16	29,39	21,55	5,82	9,46	7,68	25,42	0,61	99,93
17	87,18	76,28	26,14	12,72	19,33	19,57	4,21	245,43
18	89,90	82,03	52,78	13,01	26,05	22,96	10,39	297,12

Continuación

	<i>Biomasa por componente (kg)</i>							<i>Biomasa total (kg)</i>
	<i>Fuste</i>			<i>Ramas</i>	<i>Corteza</i>	<i>Copa</i>	<i>Tocón</i>	
	<i>Basal</i>	<i>Media</i>	<i>Apical</i>					
19	68,45	,77	45,22	7,79	21,76	15,97	2,10	247,06
20	55,13	34,87	33,89	4,03	16,00	8,04	1,98	153,94
21	103,89	101,91	57,21	12,14	27,91	47,21	2,43	352,70
22	64,67	33,43	21,76	13,55	13,55	53,90	6,12	206,96
23	48,28	55,18	14,78	8,82	13,75	19,97	2,14	162,93
24	83,13	81,50	41,86	5,93	22,33	29,45	2,92	267,11
25	63,22	55,11	38,18	2,81	14,75	9,13	1,77	184,96
26	164,63	160,05	94,91	45,76	36,25	117,15	6,44	625,18
27	136,78	149,04	86,94	40,65	41,57	136,26	2,17	593,40
28	79,04	72,33	28,66	22,69	20,16	39,89	3,75	266,51
29	61,00	35,73	27,68	9,20	17,04	19,32	1,77	171,75
30	120,16	127,79	122,27	25,69	45,57	35,49	1,31	478,29
31	89,56	87,38	49,21	15,97	23,94	27,22	1,63	294,90
32	65,35	64,01	22,51	12,07	18,00	29,80	2,34	214,07
33	105,07	96,90	63,23	17,59	31,99	37,81	2,52	355,11
34	84,49	53,55	68,98	23,61	23,69	52,20	1,47	307,99
35	57,54	37,47	23,33	7,90	14,66	7,30	2,17	150,38
36	54,38	47,56	16,38	9,69	13,68	13,43	1,93	157,06
37	48,76	39,98	48,51	21,27	16,95	42,43	3,05	220,94
38	125,02	107,41	61,63	15,63	32,73	30,62	5,54	378,58
39	41,30	28,63	26,18	6,39	10,87	22,37	5,03	140,77
40	43,89	47,01	22,71	5,80	10,22	13,28	1,80	144,70
Prom:	81,13	63,63	35,98	16,51	20,60	39,74	2,75	260,33
Min	29,39	18,96	5,82	2,81	7,68	7,30	0,61	99,93
Max	164,63	160,05	122,27	45,76	45,57	136,26	10,39	625,18

En promedio para los 40 árboles analizados el fuste posee el 69,03 por ciento de la biomasa total, seguida de la copa con un 15,39 por ciento y la corteza, ramas y tocón con 8,02 por ciento, 6,40 por ciento y 1,14 por ciento respectivamente. Esta relación coincide con las obtenidas por Simbaña (2011) y Herrera (1977), cuyos resultados para la misma especie

muestran al fuste como mayor contribuyente en la biomasa aérea total; sin embargo, estos autores atribuyen un mayor porcentaje a la corteza sobre las hojas. La biomasa promedio (en kilogramos) por cada componente del árbol y sección del fuste se grafica en la Figura 31, donde también se puede apreciar a la copa como mayor contribuyente de biomasa en comparación con la corteza, ramas, tocón y la sección apical del fuste. Este resultado corresponde a plantaciones que no han recibido un correcto tratamiento silvicultural, permitiendo el crecimiento frondoso de sus copas.

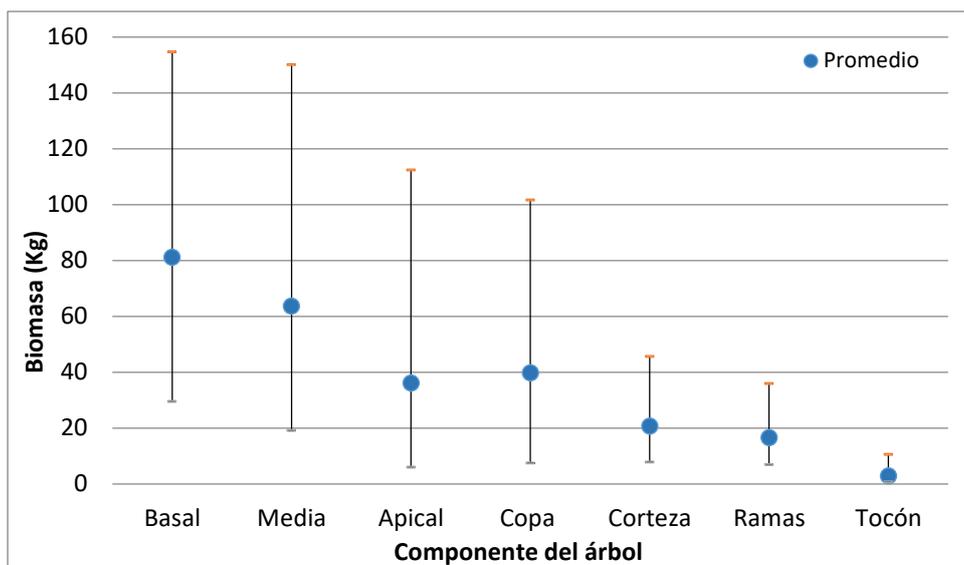


Figura 31: Biomasa promedio por componente del árbol.

La Figura 32 grafica el incremento porcentual de la biomasa total promedio al pasar de una CD a otra mayor con intervalos de 2 cm. La tendencia para los 40 árboles de *E. globulus* es un incremento promedio de 17,7208 por ciento de biomasa por cambio de clase DAP en 2cm. Sin embargo este porcentaje de crecimiento está afectado por una tendencia inesperada en la clase diamétrica de “[26-28>”, que muestra un decremento en la biomasa de -13.29 por ciento; es decir, en este intervalo se encontraron árboles cuya biomasa total promedio era inferior al intervalo que lo antecede. Este comportamiento se debe a un alto contenido de humedad de los árboles que componen este intervalo (árboles 1, 4 y 24) y a un contenido de humedad inferior de los árboles del intervalo “[24-26>” (árboles 5, 6, 13, 18, 28 y 33). Lo cual da como consecuencia, que los árboles con mayores diámetros registren menores pesos anhidros (biomasa) al extraerle el peso ocupado por el agua. En cambio los árboles cuyos diámetros son menores pero su contenido de humedad es bajo registraron mayor biomasa almacenada en su estructura.

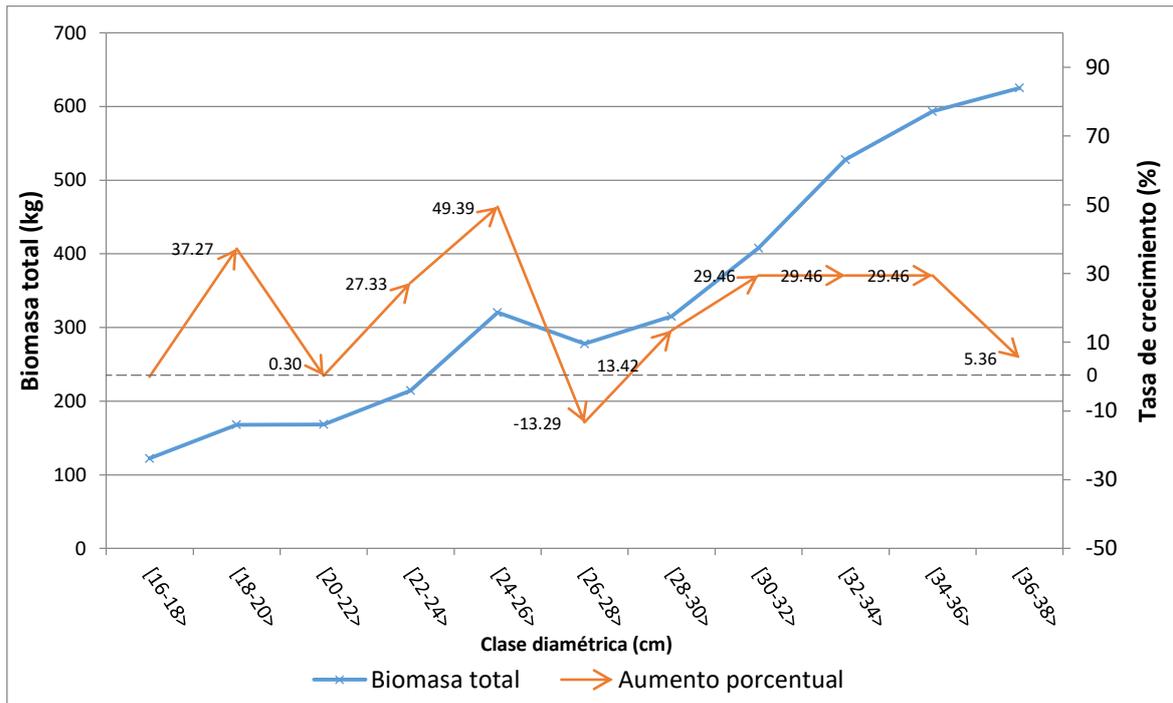


Figura 32: Biomasa total y aumento porcentual entre clase diamétrica.

6.2. ELABORACIÓN DE LA ECUACIÓN DE BIOMASA

6.2.1. EVALUACIÓN PREVIA DE LOS DATOS

Se estableció gráficamente la relación entre las variables independientes (dap y altura total) y la variable dependiente (Figura 33 y 34). Esta primera evaluación de los datos mostró al árbol 30 como un valor “outlier”. Cuyo valor de biomasa y altura no es coherente con el dap que se indicaba. El árbol con valores “outlier” no fue tomado en cuenta para el futuro análisis de regresión. Siendo así, la nueva muestra se volvió de 39 unidades muestrales. Valor superior a las 30 unidades muestrales, considerándose estadísticamente una muestra grande, representativa y que tiende a una distribución normal.

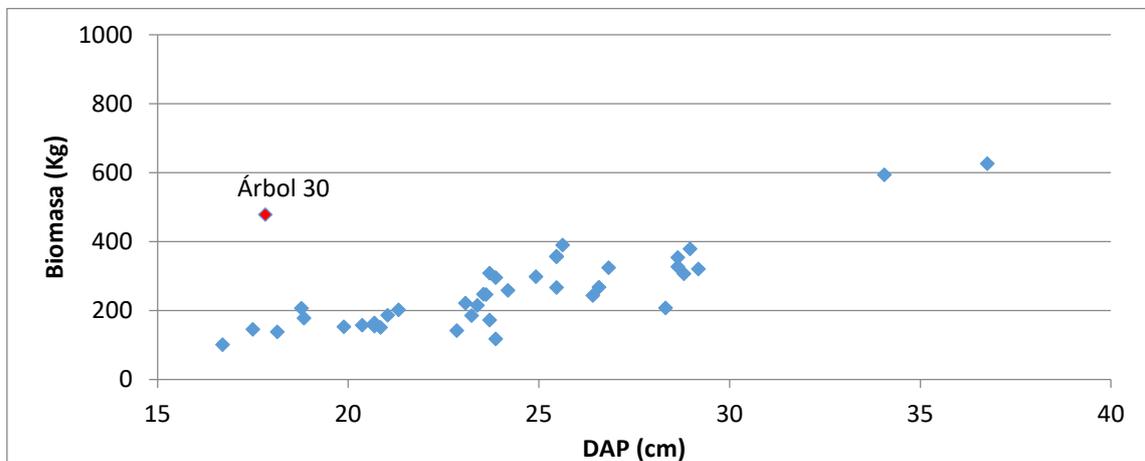


Figura 33: Relación entre la biomasa total y el dap de los 40 árboles de *E. globulus*.

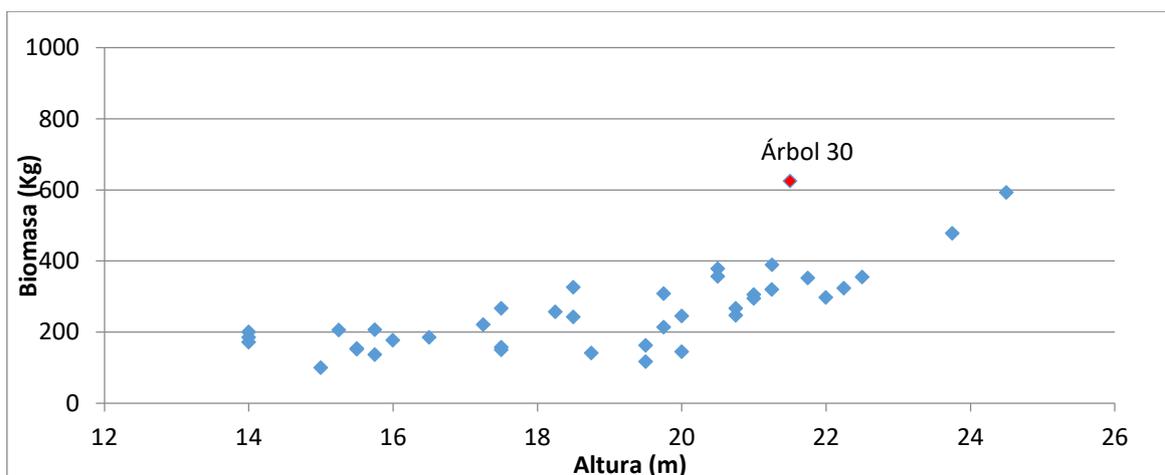


Figura 34: Relación entre la biomasa total y la altura total de los 40 árboles de *E. globulus*.

6.2.2. ANÁLISIS DE REGRESIÓN

Realizar el análisis de regresión utilizando la herramienta Excel 2010 resultó satisfactorio para los objetivos requeridos, brindó resultados confiables y ordenados, fáciles de obtener y de forma inmediata. Las tablas resumen obtenidas a partir de la regresión se muestran en el Anexo 3.

6.2.3. BONDAD DEL AJUSTE

Todos los modelos mostraron valores muy altos para el coeficiente de determinación, sin embargo no todos superaron el valor mínimo propuesto en la metodología (0,8 para los modelos lineales y 0,75 para los logarítmicos). Los modelos aceptados para este primer análisis de se muestran en la Tabla 11. Se puede apreciar que aquellos modelos lineales que solo presentan el dap como única variable independientes fueron rechazados en este primer análisis, al presentar los valores de R^2 más bajos. Caso contrario, todos los modelos que incluyen la altura total (h) en sus variables fueron aceptados. Lo cual denota la importancia de tener más de una variable independiente o explicativa que nos brinde valores confiables para el cálculo de la biomasa aérea.

Tabla 11: Resultado del análisis de regresión y selección de los modelos de mayor R^2 .

	<i>Modelo</i>	b_0	b_1	b_2	r	R^2	<i>Calificación</i>
1	$B = b_0 + b_1dap^2$	-24,2820	0,4621		0,8864	0,7856	Rechazado
2	$B = b_0 + b_1dap^2h$	32,7281	0,0190		0,9235	0,8529	Aceptado
3	$B = b_0 + b_1dap$	-311,2309	23,3792		0,8681	0,7536	Rechazado
4	$B = b_0 + b_1dap^3$	76,6967	0,0115		0,8916	0,7949	Rechazado
5	$B = b_0 + b_1dap^2h^3$	111,2128	0,0000		0,9141	0,8356	Aceptado
6	$B = b_0 + b_1dap^3h$	101,5439	0,0005		0,9220	0,8501	Aceptado
7	$B = b_0 + b_1dap^3h^3$	143,4957	0,0000		0,9196	0,8456	Aceptado
8	$B = b_0 + b_1dap^2h^2$	78,7253	0,0008		0,9236	0,8530	Aceptado
9	$B = b_0 + b_1dap^3h^2$	124,5565	0,0000		0,9267	0,8587	Aceptado
10	$B = b_0 + b_1LN(dap)$	-1512,109	557,0200		0,8379	0,7021	Rechazado
11	$B = b_0 + b_1(dap)^{0,5}$	-872,2687	229,9061		0,8543	0,7299	Rechazado
12	$B = b_0 + b_1(LN(dap))1/dap$	1055,1895	-5987,54		0,8175	0,6683	Rechazado
13	$B = b_0 + b_1dap + b_2dap^2h$	138,5843	-6,7718	0,0240	0,9262	0,8578	Aceptado
14	$B = b_0 + b_1dap + b_2dap^2h^2$	13,6027	3,6740	0,0007	0,9252	0,8560	Aceptado
15	$B = b_0 + b_1dap^2 + b_2dap^2h^2$	50,9237	0,1054	0,0006	0,9266	0,8585	Aceptado
16	$B = b_0 + b_1dap^3 + b_2dap^2h^2$	73,1963	0,0031	0,0006	0,9280	0,8612	Aceptado
17	$B = b_0 + b_1dap^3 + b_2dap^2h$	31,7603	-0,0004	0,0196	0,9236	0,8530	Aceptado
18	$B = b_0 + b_1dap^3 + b_2dap^2h^3$	89,4038	0,0047	0,0000	0,9287	0,8626	Aceptado
19	$B = b_0 + b_1dap^3h + b_2dap^2h^3$	102,1879	0,0003	0,0000	0,9289	0,8628	Aceptado
20	$B = b_0 + b_1dap^2 + b_2dap^3$	65,5321	0,0499	0,0102	0,8916	0,7950	Rechazado
21	$B = b_0 + b_1dap + b_2dap^3$	51,4940	1,4812	0,0108	0,8917	0,7950	Rechazado
22	$Ln(B) = b_0 + b_1ln(dap)$	-1,0304	2,0438		0,8464	0,7163	Rechazado
23	$Ln(B) = b_0 + b_1ln(h)$	-0,1322	1,9125		0,6845	0,4686	Rechazado
24	$Ln(B) = b_0 + b_1ln(dap) + b_2ln(h)$	-1,8894	1,6587	0,7125	0,8694	0,7559	Aceptado
25	$Ln(B) = b_0 + b_1[ln(dap)]^2 + b_2ln(h)$	0,7459	0,2617	0,7074	0,8715	0,7595	Aceptado
26	$Ln(B) = b_0 + b_1ln(dap) + b_2[ln(dap)]^2$	7,1153	-3,0877	0,8058	0,8501	0,7227	Rechazado
27	$Ln(B) = b_0 + b_1ln(dap^2h)$	-1,9442	0,7984		0,8691	0,7553	Aceptado
28	$Ln(B) = b_0 + b_1ln(dap^2h) + b_2ln(h)$	-1,8894	0,8294	-0,1169	0,8694	0,7559	Aceptado

6.2.4. PRUEBA DE SIGNIFICACIÓN FISHER

Todos los modelos fueron aceptados al cumplir con la prueba de significancia Fisher ya que los resultados obtenidos muestran valores de p-valor menores a 0,05, además de mostrar F calculados mayores a los F tabulares en cada uno de los modelos analizados (Tabla 12). Lo cual indica que a un nivel de significancia de 0,05 se demuestra suficiente evidencia estadística para rechazar H_0 , por lo tanto se acepta la hipótesis alterna (H_1), la cual menciona que el modelo lineal es significativo, ya que la variable dependiente (biomasa) posee una dependencia de las variables independientes (dap y altura). En un supuesto caso que el F calculado resultara menor que el F tabular significaría el rechazo de la hipótesis alterna (H_1), es decir que el modelo lineal no dependería de la variable independiente y cualquier cambio en esta última no significaría un cambio en la variable dependiente.

Tabla 12: Resultados de la prueba de significancia Fisher.

<i>PRUEBA DE SIGNIFICANCIA FISHER</i>				
<i>Modelo</i>	<i>F</i>	<i>F-tabular</i>	<i>p – valor</i>	<i>Calificación</i>
2	214,5772	4,1108	5,58E-17	Aceptado
5	188,0196	4,1108	4,44E-16	Aceptado
6	209,7937	4,1108	7,98E-17	Aceptado
7	202,7088	4,1108	1,34E+01	Aceptado
8	214,7409	4,1108	5,52E-17	Aceptado
9	224,8817	4,1108	2,65E-17	Aceptado
13	108,5652	3,2656	5,67E-16	Aceptado
14	107,0108	3,2656	7,08E-16	Aceptado
15	109,235	3,2656	5,15E-16	Aceptado
16	111,6683	3,2656	3,66E-16	Aceptado
17	104,4352	3,2656	1,03E-15	Aceptado
18	112,9818	3,2656	3,06E-16	Aceptado
19	113,2325	3,2656	2,95E-16	Aceptado
24	55,7494	3,2656	9,45E-12	Aceptado
25	56,8516	3,2656	7,23E-12	Aceptado
27	114,2137	4,1108	7,27E-13	Aceptado
28	55,7494	3,2656	9,45E-12	Aceptado

6.2.5. PRUEBA DE SIGNIFICACIÓN T-STUDENT

Todos los modelos cuyos coeficientes cumplieron con la aceptación de la hipótesis alterna (H_1) fueron aceptados para este análisis (Tabla 13). Se tomó el análisis de los valores de p-valor y el análisis del t tabular y el t calculado como criterios de decisión para la aceptación o rechazo de los modelos. En este análisis los modelos 13, 14, 15, 16, 17 fueron rechazados por no cumplir con la significancia de cada una de sus variables independientes, una o más de una variable no influenciaba significativamente en el resultado de la biomasa aérea.

Tabla 13: Resultados de la prueba de significancia t-student.

<i>PRUEBA DE SIGNIFICANCIA t-student</i>							
<i>Modelo</i>	<i>t b₁</i>	<i>t -tabular</i>	<i>p – valor</i>	<i>t b₂</i>	<i>t - tabular</i>	<i>p - valor</i>	<i>Calificación</i>
2	14,6485	1,686	5,58E-17				Aceptado
5	13,712	1,686	4,44E-16				Aceptado
6	14,4843	1,686	7,98E-17				Aceptado
7	14,2376	1,686	1,37E-16				Aceptado
8	14,654	1,686	5,52E-17				Aceptado
9	14,9961	1,686	2,65E-17				Aceptado
13	-1,1083	1,686	0,2751	5,1358	1,686	9,91E-06	Rechazado
14	0,8645	1,686	0,3931	5,0607	1,686	1,25E-05	Rechazado
15	1,1837	1,686	0,2443	4,3066	1,686	0,0001	Rechazado
16	1,4548	1,686	0,1544	4,1471	1,686	0,0002	Rechazado
17	-0,1167	1,686	0,9077	3,7724	1,686	0,0006	Rechazado
18	2,6598	1,686	0,0116	4,2115	1,686	0,0002	Aceptado
19	2,6753	1,686	0,0112	1,8302	1,686	0,0755	Aceptado
24	6,51	1,686	1,45E-07	2,4169	1,686	0,0208	Aceptado
25	6,5993	1,686	1,11E-07	2,4196	1,686	0,0207	Aceptado
27	-2,8057	1,686	0,008	10,6871	1,686	7,27E-13	Aceptado
28	6,51	1,686	1,45E-07	-0,3017	1,686	0,7646	Aceptado

6.2.6. ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS

Se realizó el análisis residual para los modelos lineales 2, 5, 6, 7, 8, 9, 18, 19, el resultado de la distribución de los errores mostró heterocedasticidad en todos los modelos. Las gráficas de la distribución de los residuos para cada modelo se muestran en la Figura 35.

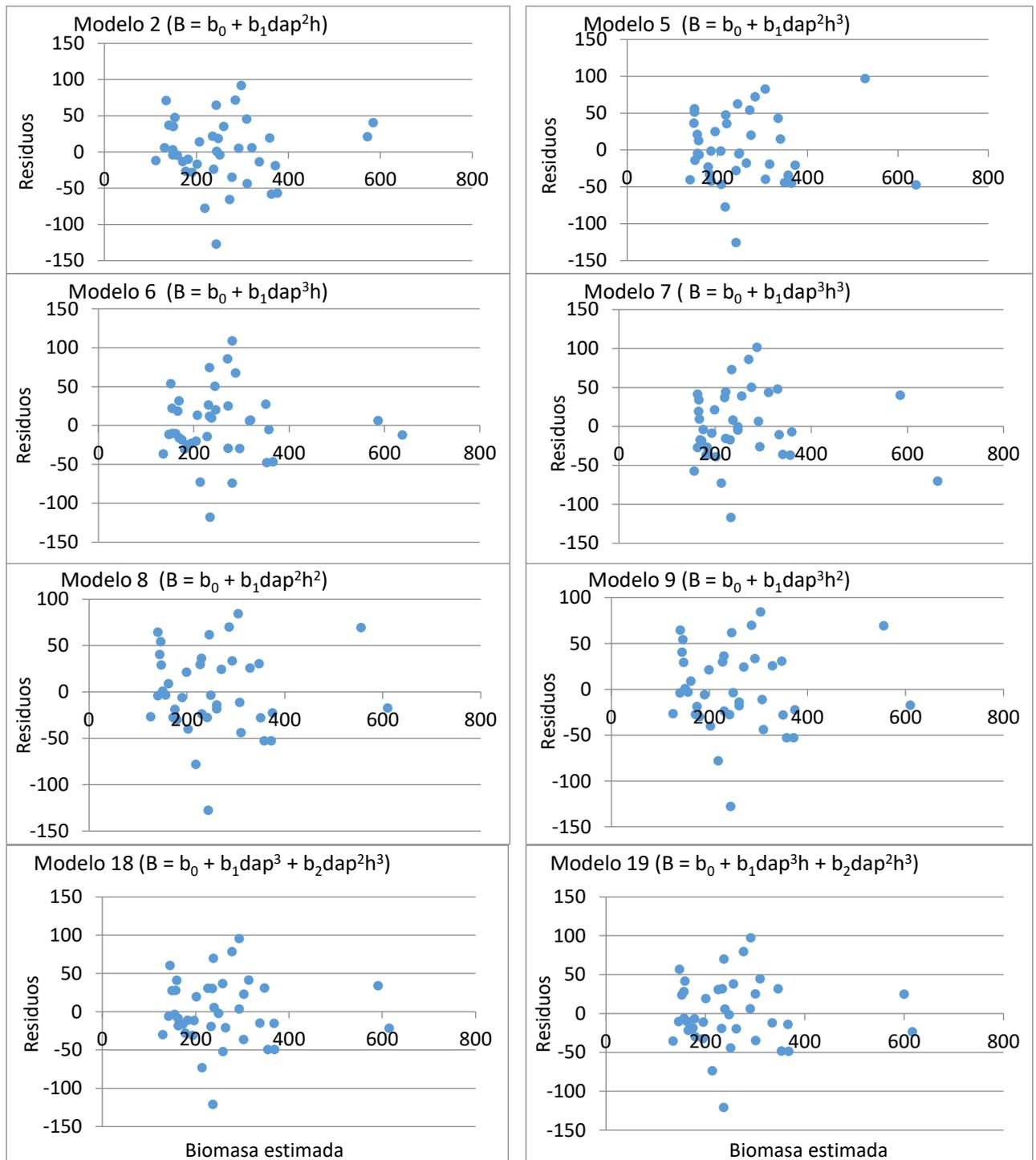


Figura 35: Gráfica de residuos para los modelos sin ponderar.

Vilar (2006) menciona que al detectar el problema de heterocedasticidad, se deben de transformar los datos o introducir nuevas variables que pueden ser cuadrados de las existentes o aplicar mínimos cuadrados ponderados. Montgomery *et al.* (2006) recomienda que los modelos de regresión lineal con varianza de error no constante también se pueden ajustar con el método de los mínimos cuadrados ponderados. En base a este anuncio se realizó la ponderación de las ecuaciones con el fin de llegar a homocedastizar la distribución de los errores. Los modelos logarítmicos al ser modelos ya transformados, no fueron ponderados y se fueron rechazados por no cumplir con el principio de homocedasticidad de sus errores.

6.2.7. ANÁLISIS DE REGRESIÓN POR MÍNIMOS CUADRADOS PONDERADOS.

a. Ponderación

Se realizó la ponderación de los modelos, seguido de un previo análisis gráfico de la distribución de los residuos para cada uno de ellos y con distintos coeficientes de ponderación, los cuales se muestran en el Anexo 5. Se obtuvo que los modelos que lograron una homocedasticidad fueron los modelos 2, 5, 6 y 8; con coeficientes de ponderación (K) igual a $(dap^2h)^{0,9}$, $daph$, $(dap^3h)^{0,5}$ y $(dap^2h^2)^{0,7}$ respectivamente. Los modelos 7, 9, 18 y 19 no lograron homocedastizarse, luego de ensayarles diversos coeficientes de ponderación, por lo tanto fueron rechazados en esta etapa en base a lo afirmado por Vilar (2006). La falta de homocedasticidad influye en el modelo de regresión lineal, los estimadores mínimo-cuadrados siguen siendo centrados pero no son eficientes y las fórmulas de las varianzas de los estimadores de los parámetros no son correctas. Por lo tanto no pueden aplicarse los contrastes de significación. La tabla resumen de la regresión de los modelos ponderados se muestra en el Anexo 4.

b. Bondad de ajuste para modelos ponderados.

Los cuatro modelos mostraron mejoras significativas en sus coeficientes de determinación, siendo todos los valores superiores a 0,96 como se muestra en la Tabla 14. Esta tendencia creciente de los coeficientes de determinación no coincide con lo encontrado por Barrena (1988), sin embargo se debe tomar en cuenta lo anunciado por Rodríguez (2005), quien menciona al R^2 como el coeficiente que mide la capacidad explicativa de la variable X sobre la variable dependiente y que al introducir otra variable X_i el nivel explicativo será mayor y por consiguiente mayor el R^2 . Por lo tanto la interpretación del R^2 no solo debe ser en base al tamaño de la muestra, sino se debe incluir el número de variables explicativas en

el modelo de regresión. Por lo tanto se debe tener en cuenta que al ponderar un modelo con un coeficiente de ponderación diferente a la variable independiente, el modelo aumentará su número de variables y es de esperarse un aumento en su coeficiente de determinación.

Tabla 14: Coeficiente de determinación para los modelos ponderados.

<i>Modelo</i>	<i>R² (modelo ponderado)</i>	<i>R² (modelo sin ponderar)</i>
Modelo 2	0,96656263	0,85292786
Modelo 5	0,96563488	0,83556987
Modelo 6	0,96774002	0,8500772
Modelo 8	0,96553331	0,85302348

c. Análisis de significancia Fisher para los modelos ponderados.

Todos los modelos presentaron mejoras en el F-calculado, siendo ampliamente superior al F-tabular, es decir se puede afirmar estadísticamente que existe una dependencia de la variable respuesta (biomasa) sobre las variables explicativas (dap y altura). Los valores obtenidos en el análisis de significancia Fisher se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15: Resultados del análisis Fisher para los modelos ponderados.

<i>Modelo</i>	<i>F-calculado</i>	<i>F-tabular</i>	<i>p – valor</i>	<i>Calificación</i>
2	534,7732405	4,1108	1,69457E-27	Aceptado
5	519,8365713	4,1108	2,77459E-27	Aceptado
6	554,9659201	4,1108	8,88356E-28	Aceptado
8	518,2501368	4,1108	2,92612E-27	Aceptado

d. Análisis de significancia t-student para los modelos ponderados.

En el análisis de la significancia para cada una de las variables independientes ponderadas, se encontró valores aceptables para cada uno de los modelos, siendo los t calculados superiores al t-tabular y los p-valor menores a 0,05 en todos los casos, es decir, existe suficiente evidencia estadística para afirmar que cada una de las variables independientes tiene una influencia significativa sobre el modelo. En base a estos resultados se aceptaron todos los modelos (Tabla 16).

Tabla 16: Resultados del análisis t-student para los modelos ponderados.

Modelo	$t b_1$	t - tabular	p - valor	$t b_2$	t - tabular	p - valor	Calificación
2	3,385024846	1,686	0,001697209	10,40526102	1,686	1,5364E-12	Aceptado
5	10,20640369	1,686	2,62114E-12	10,78555507	1,686	5,6121E-13	Aceptado
6	8,255030306	1,686	6,48373E-10	11,23142905	1,686	1,7647E-13	Aceptado
8	7,413281061	1,686	8,03358E-09	10,03591315	1,686	4,1606E-12	Aceptado

e. Análisis de residuos para los modelos ponderados.

Se realizó el análisis gráfico de los residuos para los modelos ponderados mostrando el cumplimiento de los principios de homocedasticidad, normalidad y linealidad de los residuos, con este análisis se confirma la mejora de los modelos y se procede a la selección del mejor de ellos. Los modelos ponderados se muestran en la Figura 36.

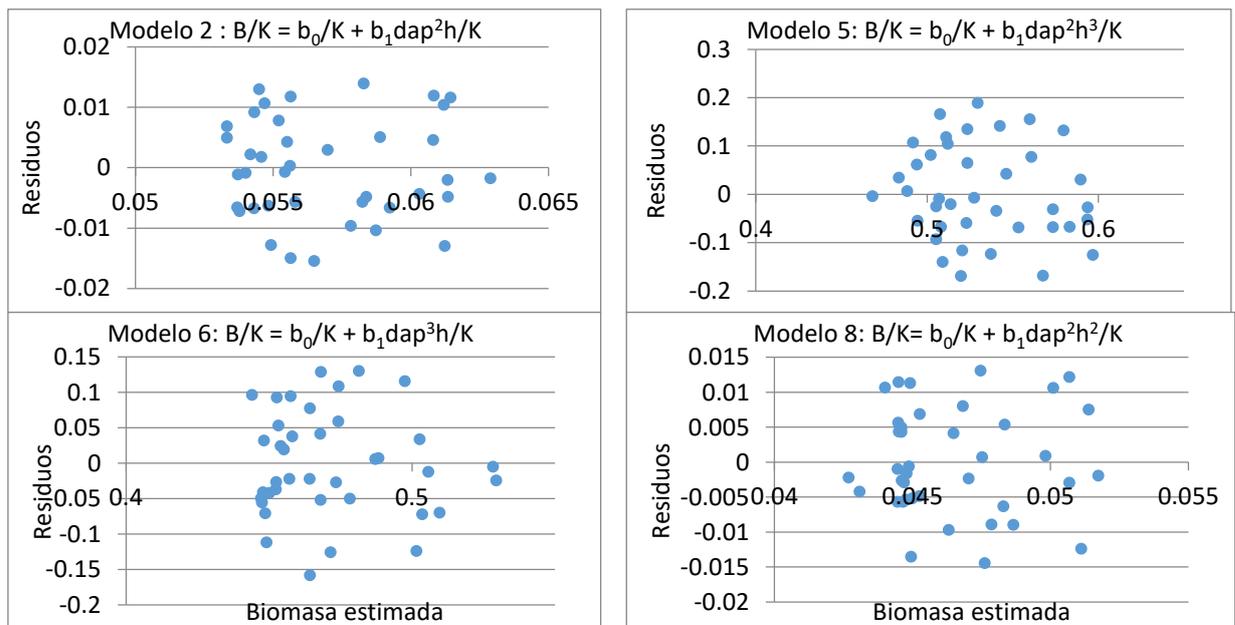


Figura 36: Gráficos de residuos para los modelos ponderados.

f. Índice de Furnival para ecuaciones ponderadas

El resultado de la comparación de los mejores modelos ponderados a diferentes factores se realizó utilizando el índice de Furnival, los resultados para los cuatro modelos se muestran en la Tabla 18. El modelo que presentó el menor índice de Furnival y por lo tanto el mejor ajuste, fue el modelo 8 con un valor de 0,00012922, valor muy cercano pero mejor al obtenido por el modelo 2 con un valor de 0,0001688. Con este resultado se reafirma el mejor ajuste del modelo 8 para la estimación de árboles de *E.globulus*.

Tabla 17: Índice de Furnival para las ecuaciones ponderadas.

<i>Modelos ponderados</i>		<i>Índice Furnival</i>
Modelo 2	(Biomasa aérea)/K = $b_0 /K + (b_1dap^2h)/K$	0,00016881
Modelo 5	(Biomasa aérea)/K = $b_0/K + (b_1dap^2h^3)/K$	0,00499173
Modelo 6	(Biomasa aérea)/K = $b_0/K + (b_1dap^3h)/K$	0,00398338
Modelo 8	(Biomasa aérea)/K = $b_0/K + (b_1dap^2h^2)/K$	0,00012922

6.2.8. SELECCIÓN DEL MEJOR MODELO.

Tomando como criterios de selección el menor índice de Furnival (Tabla 17), el modelo que presenta un mejor ajuste para la estimación de biomasa aérea de los árboles de *E. globulus* plantados como linderos o cercos vivos en el distrito de Huertas, es el modelo 8. La ecuación de biomasa aérea seleccionada presentó la siguiente forma:

$$Biomasa\ aérea = b^{0'} + b_1'dap^2h^2$$

Dónde:

b_0' : Coeficiente de intercepción ponderado.

b_1' : Coeficiente de la variable independiente ponderado.

dap: diámetro a la altura del pecho (1,30 m).

h: altura total del árbol.

6.2.9. OBTENCIÓN DE COEFICIENTES PARA LA ECUACIÓN PONDERADA.

La ponderación del modelo permitió la obtención de coeficientes ponderados, los cuales mejoran significativamente la precisión de la ecuación inicial. Al volver a la ecuación lineal inicial podemos apreciar la variación de los coeficientes, siendo la intercepción la que muestra el mayor cambio con un aumento de 11,7315 lo cual corresponde a kg de biomasa aérea por árbol, es decir, la nueva ecuación obtenida nos presenta un ajuste de dicho valor en la estimación. El coeficiente de la variable independiente presenta una reducción de 0,00005415, lo cual indica que por el aumento de una unidad en la variable independiente, la biomasa aérea tiene un aumento de 0,00005415 menos al de la ecuación inicial.

Tabla 18: Ecuación antes y después de la ponderación.

Seleccionada	Ecuación sin ponderar	Factor K	Ecuación ponderada
Ecuación 8	$B = 78,725255 + 0,0007642dap^2h^2$	$(dap^2h^2)^{0,7}$	$B = 90,45675 + 0,00071005dap^2h^2$

Ecuación obtenida para la estimación de la biomasa aérea de los árboles de *E. globulus*:

$$Biomasa\ aérea = 90,45675 + 0,00071005dap^2h^2$$

6.2.10. PRECISIÓN DE LA ECUACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LOS SUPUESTOS DE LA REGRESIÓN.

Utilizando la ecuación Biomasa aérea = $90,45674 + 0,00071dap^2h^2$ se obtuvo una biomasa total de los 39 árboles de *E. globulus* de 9966,024994 kg, valor que sobrestima la biomasa total en 30,832 kg correspondiente al 0,31 por ciento del total. Es decir que utilizando la ecuación podemos llegar a estimar la biomasa total con una precisión de 99,69 por ciento para árboles de la especie *E. globulus* en el distrito de Huertas.

En la Figura 37 se presenta la tendencia de la biomasa estimada y la biomasa real para los 39 árboles muestreados utilizando la ecuación Biomasa aérea = $90,45674 + 0,00071dap^2h^2$, la cual dio la mayor precisión en el cálculo de la biomasa aérea de los árboles de *E. globulus*.

La Figura 38 muestra la distribución de los residuos obtenidos a partir de la biomasa real y la biomasa estimada por la ecuación seleccionada. Realizando un análisis visual de la gráfica de dispersión se puede identificar que la ecuación cumple con el principio de homocedasticidad, linealidad y normalidad de los errores.

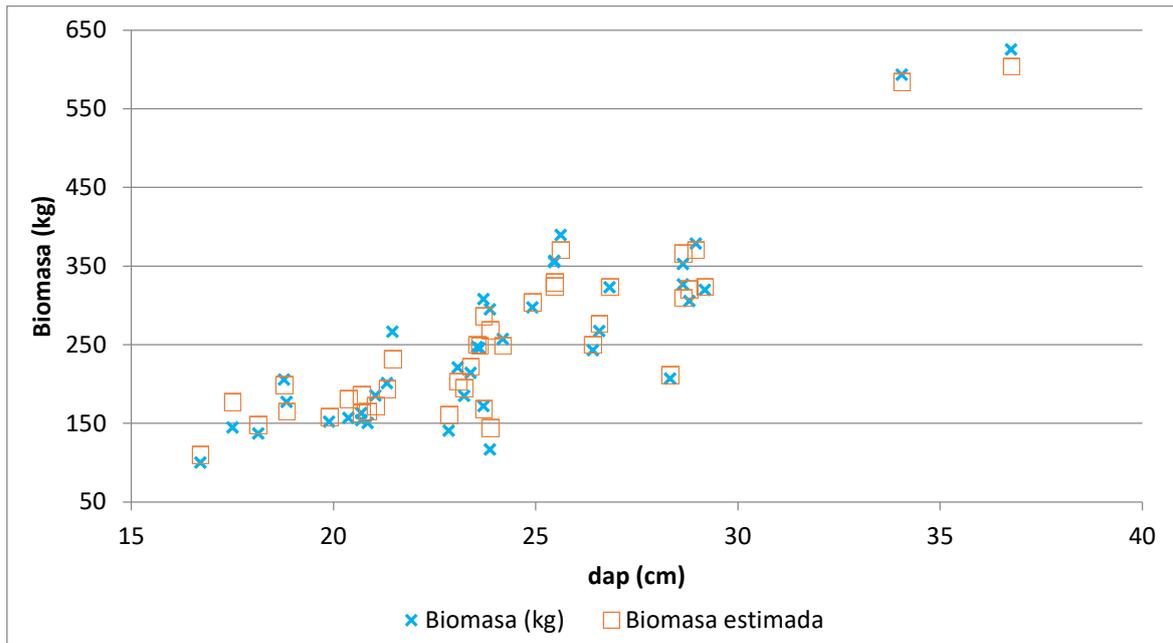


Figura 37: Distribución de la biomasa estimada con la ecuación final y la biomasa real de los 39 árboles de *E. globulus*.

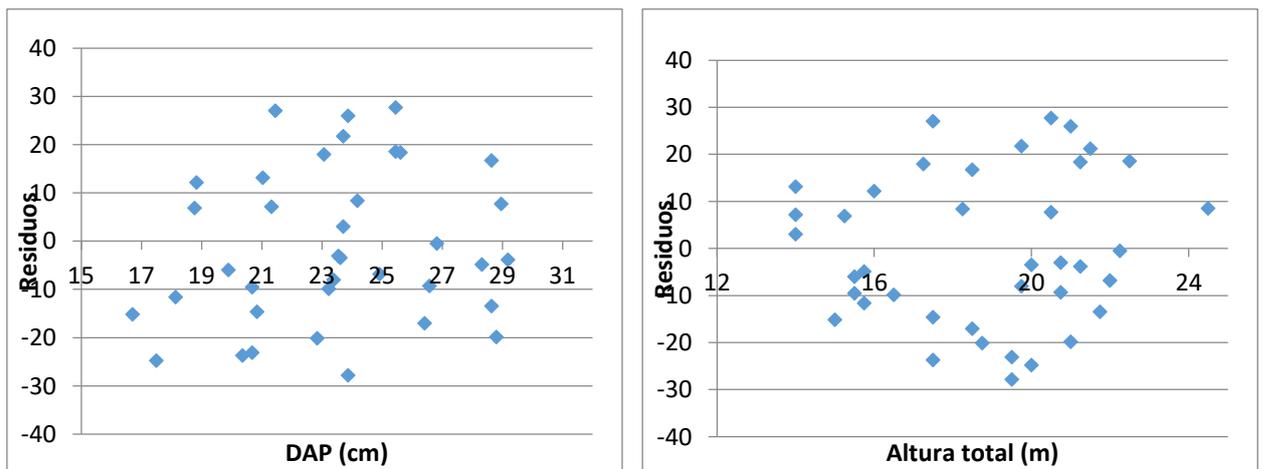


Figura 38: Distribución de los residuos para la ecuación seleccionada.

La Figura 39 representa los valores de biomasa obtenidos en campo y los intervalos de confianza a un nivel de 95 por ciento para la ecuación obtenida. Como resultado de la estimación a partir de la ecuación podemos identificar a dos valores que sobrepasan el límite superior, árboles cuya biomasa es cercana o superior a los 600 kg; por lo tanto la precisión de la ecuación para la estimación de los árboles de *E. globulus* es del 94,87 por ciento.

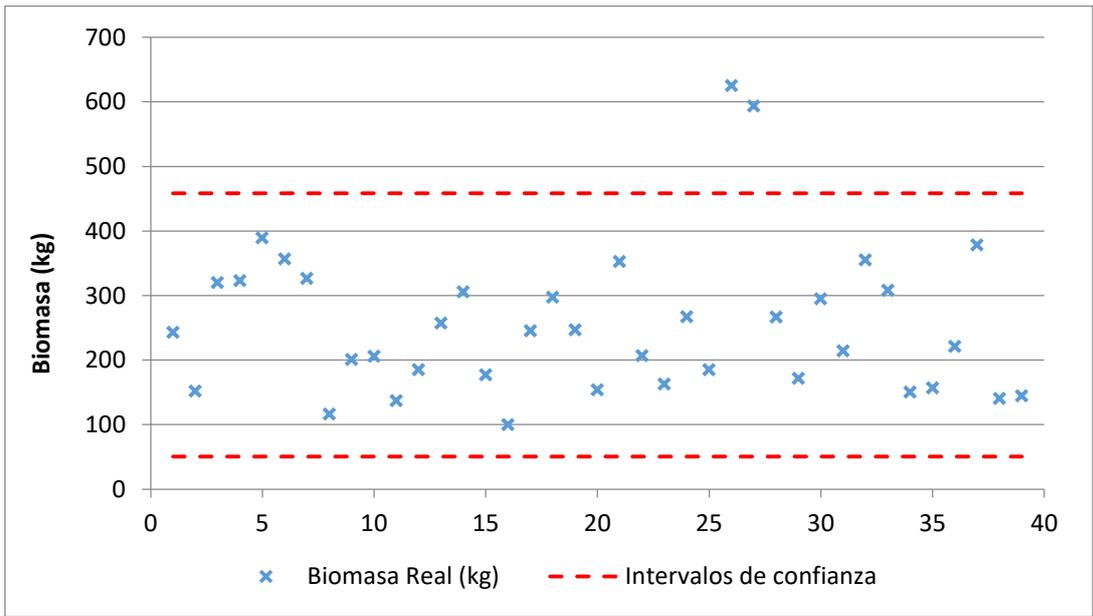


Figura 39: Intervalos de confianza para la ecuación de biomasa.

V. CONCLUSIONES

1. La ecuación determinada para el cálculo de la biomasa aérea de las plantaciones de *E. globulus* en el distrito de Huertas, provincia de Jauja de la región de Junín es:

$$\text{Biomasa aérea} = 90,45674 + 0,00071\text{dap}^2\text{h}^2$$

2. La metodología utilizada para el estudio permite elaborar estimaciones precisas de la cantidad de biomasa almacenada en los árboles de *E. globulus*.
3. Los 40 árboles muestreados de *E. globulus* contenían un total de 10413,36 kg de biomasa aérea en su estructura.
4. El contenido de humedad en la especie de *E. globulus* disminuye desde la parte basal hacia la zona apical del árbol.
5. La densidad básica en la especie de *E. globulus* aumenta desde la parte basal hacia la zona apical y es superior en las ramas.

VI. RECOMENDACIONES

- Se debe tomar en cuenta que la precisión de la ecuación determinada para la estimación de la biomasa aérea de árboles de *E. globulus* responde a un lugar con características climáticas, fisiológicas y en condiciones ambientales particulares, correspondientes al distrito de Huertas, por lo tanto el uso de la ecuación debe estar sujeto a condiciones parecidas para lograr la precisión adecuada.
- Es recomendable tomar como mínimo una muestra de 33 árboles para la construcción de la ecuación de biomasa o carbono, de tal forma se asegura contar con un margen de error de muestreo del 10 por ciento y mantener una muestra representativa de 30 individuos o unidades de muestreo para los análisis estadísticos correspondientes.
- Se recomienda que la preparación de las probetas, así como la obtención del contenido de humedad y la densidad se realice en la localidad más cercana al lugar de muestreo. Esto evitará la variación del contenido de humedad de las probetas y el transporte innecesario de la madera.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alegre, J; Arévalo, L; Ricse, A. 2001. Reservas de carbono y emisión de gases con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la Amazonía Peruana. Taller Internacional de Sistemas agroforestales CORPOICA, 31 de Julio al 3 de Agosto. Santa Fe de Bogotá, CO. 15 p.
- Allison, I; Bindoff, N; Bindschadler, R; Cox, P; Noblet, N; Francis, J; Gruber, N; Haywood, A; Kaser, G; Lenton, T; Mann, M; McNeil, B; Pitman, A; Tignot, E; Schellnhuber, H; Schneider, S; Sherwood, S; Somerville, R; Visbeck, M; Weaver, A. 2009. The Copenhagen Diagnosis. Updating the World on the Latest Climate Science. The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC) Sydney, 64 p.
- Alvarado, J; Obagi, J. 2008. Fundamentos de inferencia estadística. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, CO. 244 p.
- Aróstegui, A. 1982. Recopilación y análisis de estudios tecnológicos de maderas peruanas. Documento de trabajo N° 2 PNUD/FAO/PER/81/002. 103 p.
- Balboa, M. 2005. Biomasa arbórea y estabilidad nutricional de los sistemas forestales de *Pinus pinaster* Air, *Eucalyptus globulus* Labill. *Quercus robur* L. en Galicia. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Agroforestal, Universidad de Santiago de Compostela, ES. 244 p.
- Barón, F; Téllez F. 2004. Apuntes de Bioestadística. Universidad de Málaga, departamento de Matemática Aplicada, ES. 43 p.
- Barragán, D. 2008. Aporte y descomposición de biomasa aérea en asociaciones agroforestales y su influencia en los cultivos de cacao y café. Tesis de grado previo a la obtención del título de Ingeniero Forestal, Facultad de Ciencias Ambientales Escuela de Ingeniería Forestal, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, EC. 100 p.
- Barrena, V. 1988. La regresión ponderada en la elaboración de ecuaciones de volumen. Revista forestal del Perú, Lima, PE. 15(2): 21-28.

- _____; Dancé, J; Sáenz, D. 1986. Metodología para la selección de ecuaciones de volumen. *Revista Forestal del Perú*, Lima, PE. 13(2): 10.
- Boqué, R; Maroto, A. 2005. El análisis de la varianza (ANOVA), comparación de multiples poblaciones. Grupo de Quimiometría y Cualimetría. Universitat Rovira i Virgili. Tarragona, ES. 25 p.
- Borges, Th F. 1960. Eucaliptos en regiones semi- húmeda y semi-árido. *Caribber Forester* 2 (1-2): 119 .
- Brooker, M.I.H. 2000. A new classification of the genus *Eucalyptus* L'Her. (Myrtaceae). *Australian Systematic Botany* 13:79-148.
- Bueno, J. 1972. Postes de madera para líneas aéreas de conducción de energía, convenio UNA-MEM-ITINTEC. 208 p.
- Busnardo, C; Gonzaga, C; Foelkel B. 1987. Em busca da qualidade ideal da madeira do eucalipto para producao da celulose. Congresso anual da ABCP-semana do papel. Sao Paulo, BR. 123 p.
- Chatterjee, S; Price, B. 1977. *Regression Analysis by Example*. Wiley, J. & Sons, INC., publication. 230 p.
- Che Piu, H; Menton, M. 2013. Contexto de REDD+ en Perú, motores, actores e instituciones. CIFOR documento ocasional no. 90. 75 p.
- Cuadras C. 2014. Nuevos métodos de análisis multivariante. CMC editions Manacor 30 Barcelona, ES. 305 p.
- Díaz, R; Acosta, M; Carrillo F; Buendía E; Flores E. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. Madera y Bosques, primavera. Instituto de Ecología A. C. Xalapa, MX. 10 p.
- Dolado, J. 1999. Validez de las predicciones en la estimación de Costes. Proyectos CICYT TIC98 1179-E y UPV-EHU 141.226. 25 p.
- Fonseca, W; Alice, F; Rey, J. 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosque secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. Universidad Nacional Autónoma de Costa Rica, Universidad de Alcalá de Henares, ES. 12 p.

- FAO Montes (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 1981. N° 11. 790 p.
- Fuente, S. de la 2011. Regresión múltiple. Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales UAM. 85 p.
- Furnival, G. 1961. An Index for Comparing Equations used in Constructing Volumen Tables. *Forest Science* 7 (4): 337-341.
- Gabriel A; Defossé L; Defossé G. 2001. Ecuación de biomasa aérea, factores de expansión y reducción de la Lengua *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser, En El So Del Chubut, Argentina. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino-patagónico, AR. 11 p.
- Geldres E. Gerding V. Schlatter J. 2006. Biomasa de *Eucalyptus nitens* de 4 -7 años de edad en un rodal de la X Región, Chile. Universidad de Los Lagos, Departamento de Ciencia y Tecnología Forestal, CL. 95 p.
- Gonzales, H. 1992. Utilización de la corteza de *Eucalyptus globulus* Labill en la obtención de pulpa química al sulfato. Tesis para optar el grado de Magister Scientiae Escuela de Post Grado, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, PE. 165 p.
- Herrera, A. 1977. La madera como materia prima natural. Ingeniería Química. 42 p.
- Huamán, M. 1972. Densidad de siembra por metro cuadrado en almácigos de *Eucalyptus globulus* Labill en el valle del Mantaro. Tesis para optar el grado de Ing. Forestal Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, PE. 65 p.
- INDECOPI (Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual, PE). 2004. Norma Técnica Peruana 251.010 Lima, PE. 24 p.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, SU). 2007. Cambio Climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Ginebra, SH- 104 p.
- Lanzara, P; Pizzetti, M. 1978. Simon & Schuster's Guide to Trees: A Field Guide to Conifers, Palms, Broadleaves, Fruits, Flowering Trees, and Trees of Economic Importance. 320 p.

- Leith, H; Whittaker, R. 1975. Primary productivity of the biosphere. Ecological studies N° 14. 339 p.
- Llancari, Y; Barrena, V. 2016. Desarrollo de un diseño de inventario para linderos de eucalipto en parcelas agrícolas en el distrito de Huertas, provincia de Jauja, región Junín. Informe de investigación, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, PE. 12 p.
- Loguercio, G; Defossé, G. 2001. Ecuaciones de biomasa aérea, factores de expansión y de reducción de la Lengas *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser, en el so del Chubut, AR. 11 p.
- MINAM (Ministerio del Ambiente, PE). 2014. Primer Informe Bienal de Actualización del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Lima, PE. 100 p.
- Monteoliva, S; Nuñez, C; Igartúa, A. 2002. Calidad del leño en *Eucalyptus globulus* ssp: variaciones en la densidad básica y la longitud de fibras en lobería, provincia de Buenos aires, Argentina. Revista de la facultad de agronomía, La Plata, AR. 105 (1). 13.
- Montgomery, D. 2004. Diseño y análisis de experimentos segunda edición. Universidad estatal de Arizona. 700 p.
- _____; Peck, E; Vining, G. 2006. Introducción al análisis de regresión lineal. 588 p.
- Morales, S. 1973. Zonificación ecológica de *Gmelina arborea* Roxb y *Eucalyptus globulus* Labill para Perú. Tesis de Grado de Magister Scientiae. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA - Centro Tropical de Enseñanza e Investigación, departamento de Ciencias Forestales, Turrialba, CR. 152 p.
- Murillo, C; Gonzáles, B. 2000. Manual de econometría. Catedrática Universidad de Las Palmas de GC. 35 p.
- Najera, J. 1999, Ecuaciones para estimar biomasa, volumen y crecimiento en biomasa y captura de carbono en diez especies típicas del matorral espinoso Temaulipeco del nordeste de México. Tesis de maestría para obtener el grado de maestría en ciencias forestales, MX. 111 p.

- Orwa, C; Mutua, A; Kindt, R; Jamnadass, R; Anthony, S. 2009. Agroforestry Database: a tree reference and selection guide version 4.0. World Agroforestry Centre, KE. 180 p.
- Parresol, B.R 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science*, Washington, US. 45(4): 610.
- Pereyra O; Gelid M. 2002. Estudio de la variabilidad de la densidad básica de la madera de *Pinus taeda* para plantaciones de misiones y norte de corrientes. *Revista Floresta*. 33 (1): 17.
- Philip M. 1994. Measuring trees and forests. A textbook written for students in Africa. Tanzania. The Division of Forestry. University of Dar-es-Salaam. 338 p.
- Picard, N; Saint-André L; Henry. 2012. Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. FAO, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Roma, IT. 223 p.
- Rodríguez, M. 2005. Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario jurídico y económico escurialense*, (38): 315-331.
- Rosales, UD. 1989. La utilización de *Eucalyptus globulus*. Dirección General de Fomento Forestal y de Fauna. Instituto Nacional Forestal y de Fauna. Madrid, ES. 26 p.
- Ruiz, E. 2007. Elaboración de una ecuación de volumen para un bosque de terrazas altas en el codo de Pozuzo, Puerto Inca, Huanuco. Tesis para optar el título de Ingeniero Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, PE. 100 p.
- Schlegel, B. 2001. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Universidad Austral de Chile, CL. 13 p.
- _____; Gayoso, J; Guerra, J. 2000. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Universidad Austral de Chile, CL. 17 p.
- Simbaña, N. 2011. Estimación de la captura de carbono en plantaciones de eucalipto *globulus labill*. Tesis para optar el grado de magister. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, PE. 120 p.

- Soares, T; Carneiro, A; Goncalves, E; Lelles, J. 2006. Uso da Biomassa Florestal na Geração de Energia. Revista Científica Electrónica de Engenharia Florestal. 9 p.
- Soares, T. (2002). Gestão estratégica com responsabilidade social: arcabouço analítico para auxiliar sua implementação em empresas no Brasil. Revista de Administração Contemporânea, 6(3), 75-96.
- Skolmen, R. G. Leading, F. T. 1990. Blue gum eucalyptus. In Burns, R. M. & B.H. Honkala, technical coordinators. Silvics of North America, Vol. 2. Hardwoods. USDA Forest Service, Washington DC, US. 22 p.
- Turrall, H. 2011. Climate change, water and food security. FAO Land and Water Division, Water Reports Vol. 36. 200 p.
- Uriel, E. 2013. Contraste de hipótesis en el modelo de regresión múltiples. Universidad de Valencia. 168 p.
- USAID (Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional, US); Sinchi Amazonic Institute of Scientific Research; Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF); FEDEMADERAS. 2004. Maderas de Colombia. Bogotá, CO. 170 p.
- Valdiviezo, J. 2012. Optimización del Uso de Agua en la Producción de Plantones de *Eucalyptus globulus* Labill en Antabamba y Abancay Departamento de Apurímac. Tesis para optar el Título de Ing. Forestal. 112 p.
- Vilar, J. 2006. Modelos estadísticos aplicados, segunda edición. Universidad de Santiago de Compostela. Lugo, ES. 203 p.
- Villegas M; Rivera S. 2002. Revisión xilológica de las principales especies del género *Eucalyptus globulus* cultivadas en Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía, UNLP, La Plata, AR. 105 (1): 21.
- Zamora, J. 2003. Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea en el bosque de pino del Ejido “La Majada” Municipio de Periban de Ramos, Michoacán. Tesis para obtener el título de Ingeniero Agrónomo especialidad en bosques, Facultad de Agrobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 59 p.

ANEXO 2

PESOS HÚMEDOS REGISTRADOS EN LA FASE DE CAMPO

Número del árbol	Fuste (kg)			Ramas(kg)	Corteza (kg)	Copa (kg)
	Basal	Media	Apical			
1	214,27	138,09	75,60	9,340	55,885	43,445
2	104,46	58,04	28,98	32,260	25,379	73,100
3	262,13	175,74	39,16	33,960	62,767	61,040
4	273,88	180,94	19,62	42,500	62,801	113,160
5	223,59	176,11	64,65	65,880	59,869	130,270
6	224,41	168,00	97,97	31,395	63,104	94,260
7	236,75	110,16	54,25	63,460	54,018	161,190
8	87,33	46,13	13,71	18,600	19,736	56,640
9	142,56	72,25	40,68	19,720	34,067	69,080
10	128,03	50,69	39,71	42,250	29,536	135,350
11	97,07	42,99	24,77	18,570	22,225	84,460
12	106,35	61,17	51,26	45,510	28,613	87,610
13	211,65	75,74	23,32	35,250	43,027	108,620
14	213,78	179,14	49,30	31,590	56,851	79,710
15	195,96	46,04	15,22	21,350	36,655	40,160
16	72,83	48,72	11,60	19,090	17,512	40,390
17	152,61	128,60	45,39	24,060	41,858	39,645
18	185,20	167,06	91,64	24,290	56,217	47,675
19	140,93	173,13	77,65	14,890	48,354	29,730
20	108,97	66,13	59,65	7,580	30,507	12,770
21	222,21	215,80	110,40	24,008	69,053	84,980
22	139,15	67,55	42,72	25,365	33,308	104,120
23	99,48	109,39	27,34	17,560	29,600	38,180
24	188,01	175,68	80,60	11,003	56,218	54,617
25	125,63	92,67	67,99	5,630	36,737	17,220
26	339,68	320,69	170,29	85,720	84,813	209,190
27	314,43	306,74	170,64	76,941	99,553	265,110
28	159,07	136,88	54,19	41,402	44,728	80,343
29	142,19	82,56	51,20	17,235	36,292	38,880
30	277,64	275,35	208,89	45,827	95,221	66,408
31	183,68	168,40	86,66	27,859	55,531	61,455
32	129,14	123,42	41,89	22,654	37,304	61,176
33	228,60	192,92	121,95	31,801	69,093	71,014
34	175,98	104,70	129,07	44,617	52,916	92,628
35	125,22	71,80	43,85	13,649	31,722	17,650
36	109,72	90,67	30,89	17,996	29,708	26,394
37	111,60	89,57	97,40	36,093	37,729	82,892
38	278,61	240,93	114,52	29,552	80,772	63,937
39	91,03	56,09	46,02	11,527	25,120	46,282
40	81,71	82,10	38,67	10,258	25,443	26,192

FUENTE: *Elaboración propia*

ANEXO 3

TABLAS RESUMEN DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE EXCEL 2010 (MODELOS NO PONDERADOS)

MODELO LINEAL 1

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,886366246
Coefficiente de determinación R ²	0,785645123
R ² ajustado	0,779851748
Error típico	103,6185052
Observaciones	39

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	1456026,969	1456026,969	135,610955	6,16978E-14
Residuos	37	397261,4011	10736,79462		
Total	38	1853288,37			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	170,7273032	40,72760264	4,191931077	0,00016509	88,20534172	253,249265	88,2053417	253,249265
Variable X 1	1,70025909	0,146004997	11,64521166	6,1698E-14	1,404424866	1,99609331	1,40442487	1,99609331

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 2

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,92354094
Coefficiente de determinación R ²	0,85292787
R ² ajustado	0,84895294
Error típico	44,7439106
Observaciones	39

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	429587,3775	429587,3775	214,57723	5,5829E-17
Residuos	37	74074,64895	2002,017539		
Total	38	503662,0265			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	32,7280564	16,76471581	1,952198698	0,058513	-1,24048444	66,6965972	-1,24048444	66,6965972
Variable X 1	0,01900702	0,001297544	14,64845486	5,5829E-17	0,01637794	0,02163609	0,01637794	0,02163609

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 3

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coeficiente de correlación múltiple	0,86808867
Coeficiente de determinación R ²	0,75357794
R ² ajustado	0,74691788
Error típico	57,9173302
Observaciones	39

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	379548,592	379548,592	113,148895	8,2955E-13
Residuos	37	124113,434	3354,41714		
Total	38	503662,026			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-311,23092	54,0100299	-5,76246523	1,3171E-06	-420,665635	-201,796204	-420,665635	-201,796204
Variable X 1	23,3791843	2,19788111	10,6371469	8,2955E-13	18,9258542	27,8325145	18,9258542	27,8325145

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 4

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,89155395
Coefficiente de determinación R ²	0,79486845
R ² ajustado	0,78932435
Error típico	52,8426973
Observaciones	39

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	400345,052	400345,052	143,372055	2,7197E-14
Residuos	37	103316,974	2792,35066		
Total	38	503662,026			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	76,6966753	17,1090321	4,4828179	6,8807E-05	42,0304834	111,362867	42,0304834	111,362867
Variable X 1	0,01146388	0,00095741	11,973807	2,7197E-14	0,00952398	0,01340378	0,00952398	0,01340378

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 5

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coeficiente de correlación múltiple	0,91409511
Coeficiente de determinación R ²	0,83556987
R ² ajustado	0,83112581
Error típico	47,3107073
Observaciones	39

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	420844,814	420844,814	188,019588	4,4402E-16
Residuos	37	82817,2121	2238,30303		
Total	38	503662,026			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	111,212842	12,9216371	8,60671459	2,3188E-10	85,0311186	137,394566	85,0311186	137,394566
Variable X 1	3,1064E-05	2,2655E-06	13,7120235	4,4402E-16	2,6474E-05	3,5655E-05	2,6474E-05	3,5655E-05

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 6

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coeficiente de correlación múltiple	0,92199631
Coeficiente de determinación R ²	0,8500772
R ² ajustado	0,84602524
Error típico	45,1754595
Observaciones	39

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	428151,607	428151,607	209,79369	7,976E-17
Residuos	37	75510,4191	2040,82214		
Total	38	503662,026			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	101,543856	12,8143887	7,92420606	1,728E-09	75,5794385	127,508274	75,5794385	127,508274
Variable X 1	0,00050203	3,4661E-05	14,4842566	7,976E-17	0,0004318	0,00057226	0,0004318	0,00057226

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 7

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coeficiente de correlación múltiple	0,91959015
Coeficiente de determinación R ²	0,84564605
R ² ajustado	0,84147432
Error típico	45,8382065
Observaciones	39

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	425919,803	425919,803	202,708799	1,3705E-16
Residuos	37	77742,2234	2101,14117		
Total	38	503662,026			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	143,495721	10,720745	13,3848648	9,3754E-16	121,773429	165,218014	121,773429	165,218014
Variable X 1	8,9561E-07	6,2905E-08	14,237584	1,3705E-16	7,6815E-07	1,0231E-06	7,6815E-07	1,0231E-06

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 8

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,923592703
Coefficiente de determinación R ²	0,853023481
R ² ajustado	0,849051142
Error típico	44,72936383
Observaciones	39

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	429635,5349	429635,5349	214,740891	5,51585E-17
Residuos	37	74026,49157	2000,715988		
Total	38	503662,0265			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	78,7252548	13,98523611	5,629168803	1,9962E-06	50,3884748	107,062035	50,3884748	107,062035
Variable X 1	0,000764234	5,21518E-05	14,65404011	5,5159E-17	0,000658565	0,0008699	0,00065856	0,0008699

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 9

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,92666866
Coefficiente de determinación R ²	0,85871481
R ² ajustado	0,8548963
Error típico	43,854792
Observaciones	39

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	432502,043	432502,043	224,881667	2,6482E-17
Residuos	37	71159,983	1923,24278		
Total	38	503662,026			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	124,556505	11,1663213	11,1546589	2,1497E-13	101,931389	147,181621	101,931389	147,181621
Variable X 1	2,1319E-05	1,4216E-06	14,996055	2,6482E-17	1,8439E-05	2,42E-05	1,8439E-05	2,42E-05

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 10

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,83793278
Coefficiente de determinación R ²	0,70213135
R ² ajustado	0,69408084
Error típico	63,676787
Observaciones	39

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	353636,898	353636,898	87,2158242	2,8612E-11
Residuos	37	150025,128	4054,7332		
Total	38	503662,026			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-1512,10925	189,467082	-7,9808547	1,4597E-09	-1896,00602	-1128,21248	-1896,00602	-1128,21248
Variable X 1	557,020015	59,6448783	9,33894128	2,8612E-11	436,168013	677,872018	436,168013	677,872018

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 11

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coeficiente de correlación múltiple	0,85433764
Coeficiente de determinación R ²	0,72989281
R ² ajustado	0,72259261
Error típico	60,6368759
Observaciones	39

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	367619,29	367619,29	99,9826529	4,599E-12
Residuos	37	136042,737	3676,83072		
Total	38	503662,026			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-872,268743	113,128957	-7,71039324	3,2766E-09	-1101,48978	-643,047703	-1101,48978	-643,047703
Variable X 1	229,906079	22,9926023	9,99913261	4,599E-12	183,318642	276,493517	183,318642	276,493517

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 12

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,81748035
Coefficiente de determinación R ²	0,66827413
R ² ajustado	0,65930857
Error típico	67,1983197
Observaciones	39

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	336584,302	336584,302	74,5378789	2,1452E-10
Residuos	37	167077,724	4515,61417		
Total	38	503662,026			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	1055,18947	93,3353682	11,305355	1,4603E-13	866,074048	1244,30489	866,074048	1244,30489
Variable X 1	-5987,54697	693,522281	-8,63353224	2,1452E-10	-7392,75659	-4582,33735	-7392,75659	-4582,33735

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 13

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,92616457
Coefficiente de determinación R ²	0,85778081
R ² ajustado	0,84987975
Error típico	44,6064283
Observaciones	39

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	432031,622	216015,811	108,565201	5,6656E-16
Residuos	36	71630,4041	1989,73345		
Total	38	503662,026			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	138,584295	96,9597077	1,42929778	0,1615395	-58,0591066	335,227696	-58,0591066	335,227696
Variable X 1	-6,77184854	6,10987507	-1,10834484	0,27506296	-19,1632495	5,61955244	-19,1632495	5,61955244
Variable X 2	0,02397932	0,00466901	5,13584609	9,9137E-06	0,01451013	0,03344852	0,01451013	0,03344852

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 14

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,92520943
Coefficiente de determinación R ²	0,85601249
R ² ajustado	0,84801318
Error típico	44,8828856
Observaciones	39

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	431140,983	215570,492	107,01084	7,077E-16
Residuos	36	72521,043	2014,47342		
Total	38	503662,026			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	13,602669	76,6279351	0,1775158	0,86009832	-141,805986	169,011324	-141,805986	169,011324
Variable X 1	3,67400125	4,24998211	0,86447452	0,39305115	-4,94536197	12,2933645	-4,94536197	12,2933645
Variable X 2	0,00066081	0,00013058	5,06071708	1,2478E-05	0,00039599	0,00092564	0,00039599	0,00092564

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 15

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,92656866
Coefficiente de determinación R ²	0,85852948
R ² ajustado	0,85067001
Error típico	44,4888654
Observaciones	39

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	432408,697	216204,349	109,234988	5,1521E-16
Residuos	36	71253,3293	1979,25915		
Total	38	503662,026			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	50,9236981	27,2972849	1,86552246	0,07027402	-4,43776162	106,285158	-4,43776162	106,285158
Variable X 1	0,1053911	0,08903641	1,18368545	0,24429496	-0,0751831	0,28596531	-0,0751831	0,28596531
Variable X 2	0,00060863	0,00014132	4,30660891	0,00012207	0,00032201	0,00089524	0,00032201	0,00089524

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 16

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,92800016
Coefficiente de determinación R ²	0,8611843
R ² ajustado	0,85347232
Error típico	44,0694512
Observaciones	39

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	433745,832	216872,916	111,668333	3,6635E-16
Residuos	36	69916,1949	1942,11653		
Total	38	503662,026			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	73,1962858	14,2934368	5,12097172	1,0376E-05	44,2078523	102,184719	44,2078523	102,184719
Variable X 1	0,00314194	0,00215972	1,45478543	0,15439324	-0,00123819	0,00752206	-0,00123819	0,00752206
Variable X 2	0,00057637	0,00013898	4,14706326	0,00019584	0,0002945	0,00085824	0,0002945	0,00085824

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 17

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,92357105
Coefficiente de determinación R ²	0,85298349
R ² ajustado	0,84481591
Error típico	45,3525184
Observaciones	39

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	429615,393	214807,697	104,435229	1,0294E-15
Residuos	36	74046,6332	2056,85092		
Total	38	503662,026			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	31,7602956	18,9080329	1,679725	0,10167042	-6,58697249	70,1075637	-6,58697249	70,1075637
Variable X 1	-0,00037872	0,00324507	-0,11670772	0,90774034	-0,00696003	0,00620258	-0,00696003	0,00620258
Variable X 2	0,01959344	0,00519395	3,77235439	0,0005825	0,00905961	0,03012727	0,00905961	0,03012727

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 18

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,92874986
Coefficiente de determinación R ²	0,8625763
R ² ajustado	0,85494165
Error típico	43,8479373
Observaciones	39

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	434446,929	217223,464	112,981777	3,0557E-16
Residuos	36	69215,0977	1922,6416		
Total	38	503662,026			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	89,403788	14,5138544	6,15989284	4,2515E-07	59,9683268	118,839249	59,9683268	118,839249
Variable X 1	0,00474206	0,00178284	2,659831	0,01159825	0,00112629	0,00835783	0,00112629	0,00835783
Variable X 2	1,9844E-05	4,7119E-06	4,21153072	0,00016188	1,0288E-05	2,9401E-05	1,0288E-05	2,9401E-05

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 19

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,92889119
Coefficiente de determinación R ²	0,86283885
R ² ajustado	0,85521878
Error típico	43,8060322
Observaciones	39

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	434579,162	217289,581	113,232492	2,9523E-16
Residuos	36	69082,8646	1918,96846		
Total	38	503662,026			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	102,187881	12,4309212	8,22045929	8,8388E-10	76,9768048	127,398958	76,9768048	127,398958
Variable X 1	0,00030363	0,0001135	2,67528526	0,01116293	7,3454E-05	0,00053381	7,3454E-05	0,00053381
Variable X 2	1,2964E-05	7,0835E-06	1,83015961	0,0755158	-1,4021E-06	2,733E-05	-1,4021E-06	2,733E-05

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 20

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,89162983
Coefficiente de determinación R ²	0,79500376
R ² ajustado	0,78361508
Error típico	53,5539241
Observaciones	39

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	400413,206	200206,603	69,8064896	4,0872E-13
Residuos	36	103248,82	2868,02279		
Total	38	503662,026			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	65,5320847	74,4716328	0,87996036	0,38471739	-85,5033869	216,567556	-85,5033869	216,567556
Variable X 1	0,0499284	0,32388661	0,15415394	0,87834932	-0,60694409	0,70680089	-0,60694409	0,70680089
Variable X 2	0,0102415	0,00798875	1,2819901	0,20804094	-0,00596044	0,02644343	-0,00596044	0,02644343

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LINEAL 21

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,89165406
Coefficiente de determinación R ²	0,79504697
R ² ajustado	0,78366069
Error típico	53,5482799
Observaciones	39

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	400434,968	200217,484	69,8250008	4,0717E-13
Residuos	36	103227,058	2867,41828		
Total	38	503662,026			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	51,4939789	143,374608	0,35915689	0,7215758	-239,283203	342,271161	-239,283203	342,271161
Variable X 1	1,48116317	8,36429645	0,17708162	0,86043684	-15,4824163	18,4447426	-15,4824163	18,4447426
Variable X 2	0,0107779	0,00399345	2,6988952	0,010527	0,00267881	0,01887699	0,00267881	0,01887699

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LOGARÍTMICO 22

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,84636106
Coefficiente de determinación R ²	0,71632704
R ² ajustado	0,7086602
Error típico	0,22573856
Observaciones	39

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	4,76109252	4,76109252	93,4318888	1,1486E-11
Residuos	37	1,88544217	0,0509579		
Total	38	6,64653469			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-1,03036212	0,67167374	-1,53402174	0,13353173	-2,39130239	0,33057815	-2,39130239	0,33057815
Variable X 1	2,04383261	0,21144517	9,66601721	1,1486E-11	1,61540401	2,47226122	1,61540401	2,47226122

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LOGARÍTMICO 23

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,68454815
Coefficiente de determinación R ²	0,46860617
R ² ajustado	0,45424417
Error típico	0,30896197
Observaciones	39

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	3,11460713	3,11460713	32,6282072	1,5412E-06
Residuos	37	3,53192755	0,0954575		
Total	38	6,64653469			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-0,13215648	0,97896234	-0,13499649	0,89334637	-2,11572261	1,85140964	-2,11572261	1,85140964
Variable X 1	1,91250108	0,33481514	5,71211057	1,5412E-06	1,23410117	2,59090099	1,23410117	2,59090099

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LOGARÍTMICO 24

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,86944256
Coefficiente de determinación R ²	0,75593037
R ² ajustado	0,74237095
Error típico	0,21227716
Observaciones	39

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	5,02431742	2,51215871	55,7494458	9,446E-12
Residuos	36	1,62221727	0,04506159		
Total	38	6,64653469			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-1,88937736	0,72475272	-2,60692689	0,01320996	-3,359244	-0,41951071	-3,359244	-0,41951071
Variable X 1	1,65874072	0,25479918	6,50999244	1,4548E-07	1,14198404	2,17549741	1,14198404	2,17549741
Variable X 2	0,71246952	0,29478546	2,4169086	0,02084684	0,11461689	1,31032214	0,11461689	1,31032214

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LOGARÍTMICO 25

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,87150691
Coefficiente de determinación R ²	0,75952429
R ² ajustado	0,74616453
Error típico	0,21070847
Observaciones	39

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	5,04820452	2,52410226	56,851634	7,2324E-12
Residuos	36	1,59833016	0,04439806		
Total	38	6,64653469			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	0,74594157	0,68077083	1,09573081	0,28047303	-0,63472566	2,12660881	-0,63472566	2,12660881
Variable X 1	0,26171399	0,03965755	6,59934797	1,1076E-07	0,18128475	0,34214324	0,18128475	0,34214324
Variable X 2	0,70743581	0,29237523	2,41961609	0,02071437	0,11447136	1,30040026	0,11447136	1,30040026

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LOGARÍTMICO 26

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,85013676
Coefficiente de determinación R ²	0,72273252
R ² ajustado	0,70732877
Error típico	0,22625379
Observaciones	39

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	4,80366675	2,40183337	46,9192607	9,3795E-11
Residuos	36	1,84286794	0,05119078		
Total	38	6,64653469			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	7,11533201	8,95737191	0,79435487	0,43219444	-11,0510602	25,2817242	-11,0510602	25,2817242
Variable X 1	-3,08772533	5,630922	-0,54835164	0,58683516	-14,5077645	8,3323138	-14,5077645	8,3323138
Variable X 2	0,80584297	0,88363496	0,91196366	0,36785465	-0,98625179	2,59793773	-0,98625179	2,59793773

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LOGARÍTMICO 27

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coeficiente de correlación múltiple	0,869087512
Coeficiente de determinación R ²	0,755313104
R ² ajustado	0,748699945
Error típico	0,209653507
Observaciones	39

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	5,02021475	5,02021475	114,213656	7,2711E-13
Residuos	37	1,62631994	0,04395459		
Total	38	6,64653469			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-1,94419438	0,69294237	-2,8057086	0,00795793	-3,348229	-0,54015976	-3,348229	-0,54015976
Variable X 1	0,798439049	0,07471069	10,6870789	7,2711E-13	0,64706081	0,94981729	0,64706081	0,94981729

FUENTE: Elaboración propia

MODELO LOGARÍTMICO 28

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,869442562
Coefficiente de determinación R ²	0,755930369
R ² ajustado	0,742370945
Error típico	0,212277156
Observaciones	39

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	5,02431742	2,51215871	55,7494458	9,446E-12
Residuos	36	1,62221727	0,045061591		
Total	38	6,64653469			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-1,889377357	0,72475272	-2,606926887	0,01320996	-3,359244	-0,41951071	-3,359244	-0,41951071
Variable X 1	0,829370361	0,12739959	6,509992438	1,4548E-07	0,57099202	1,0877487	0,57099202	1,0877487
Variable X 2	-0,116900845	0,38742484	-0,301738127	0,76458795	-0,90263483	0,66883314	-0,90263483	0,66883314

FUENTE: Elaboración propia

ANEXO 4

TABLAS RESUMEN DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE EXCEL 2010 (MODELOS PONDERADOS)

Modelo ponderado 2 ($k = (DAP^2H)^{0,9}$)

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,98313917
Coefficiente de determinación R ²	0,96656263
R ² ajustado	0,93863189
Error típico	0,01091185
Observaciones	39

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,12734928	0,06367464	534,77324	1,6946E-27
Residuos	37	0,00440553	0,00011907		
Total	39	0,13175481			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	51,0045918	15,0677157	3,38502485	0,00169721	20,4745	81,5346837	20,4745	81,5346837
Variable X 2	0,01732978	0,00166548	10,405261	1,5364E-12	0,01395519	0,02070437	0,01395519	0,02070437

FUENTE: Elaboración propia

Modelo ponderado 5 ($k = DAPH$)

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,98266723
Coefficiente de determinación R ²	0,96563488
R ² ajustado	0,93767907
Error típico	0,10498845
Observaciones	39

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	11,4598747	5,72993733	519,836571	2,7746E-27
Residuos	37	0,40783526	0,01102257		
Total	39	11,8677099			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	113,700337	11,1400979	10,2064037	2,6211E-12	91,1283542	136,272319	91,1283542	136,272319
Variable X 2	3,0358E-05	2,8147E-06	10,7855551	5,6121E-13	2,4655E-05	3,6061E-05	2,4655E-05	3,6061E-05

FUENTE: Elaboración propia

Modelo ponderado 6 ($k = (\text{DAP}^3\text{H})^{0,5}$)

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,98373778
Coefficiente de determinación R ²	0,96774002
R ² ajustado	0,9398411
Error típico	0,08922461
Observaciones	39

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	8,83620087	4,41810044	554,96592	8,8836E-28
Residuos	37	0,29455812	0,00796103		
Total	39	9,13075899			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	96,4206328	11,6802276	8,25503031	6,4837E-10	72,7542437	120,087022	72,7542437	120,087022
Variable X 2	0,00051882	4,6194E-05	11,231429	1,7647E-13	0,00042522	0,00061242	0,00042522	0,00061242

FUENTE: Elaboración propia

Modelo ponderado 8 ($k = (DAP^2H^2)^{0,7}$)

Resumen

Estadísticas de la regresión

Coefficiente de correlación múltiple	0,982615546
Coefficiente de determinación R ²	0,965533311
R ² ajustado	0,937574752
Error típico	0,009191246
Observaciones	39

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	0,08756251	0,04378125	518,250137	2,9261E-27
Residuos	37	0,00312572	8,4479E-05		
Total	39	0,09068823			

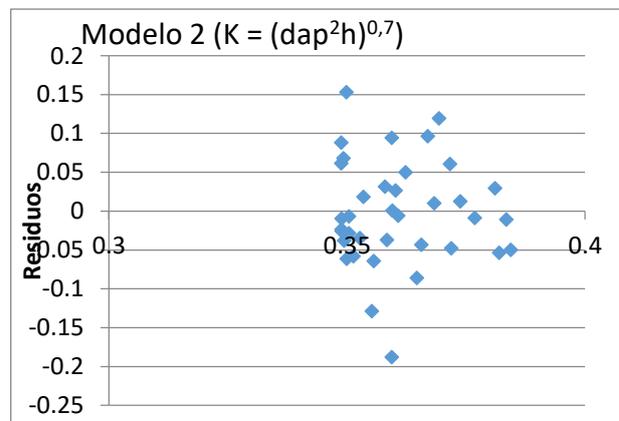
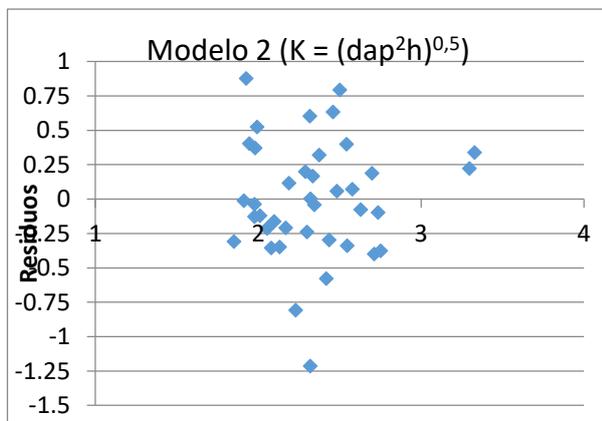
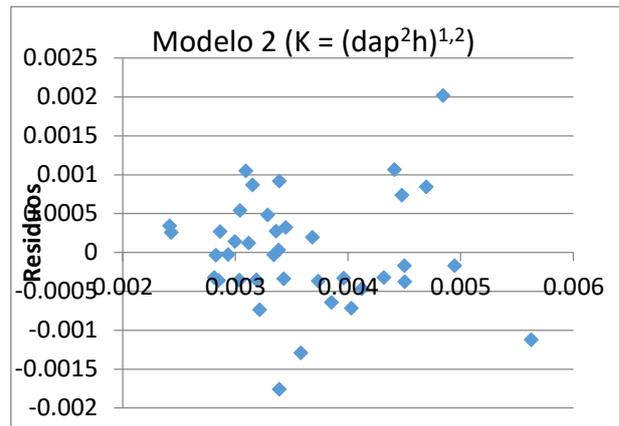
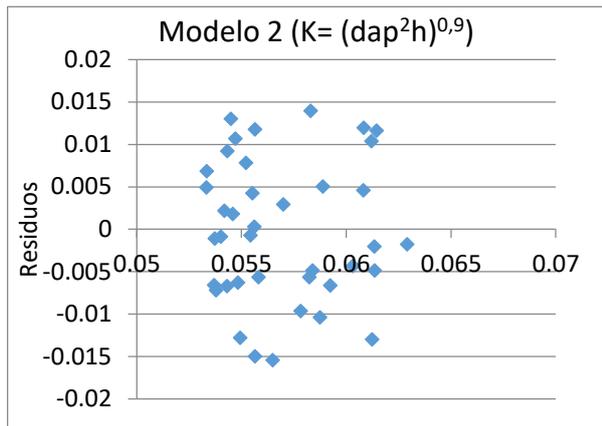
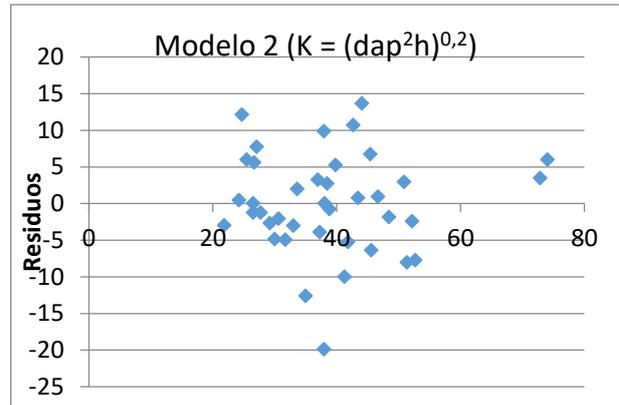
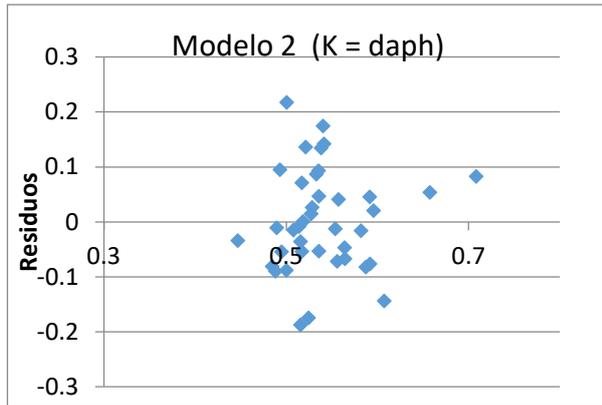
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	90,45674738	12,2019854	7,41328106	8,0336E-09	65,7331765	115,180318	65,7331765	115,180318
Variable X 2	0,000710053	7,0751E-05	10,0359132	4,1606E-12	0,0005667	0,00085341	0,0005667	0,00085341

FUENTE: Elaboración propia

ANEXO 5

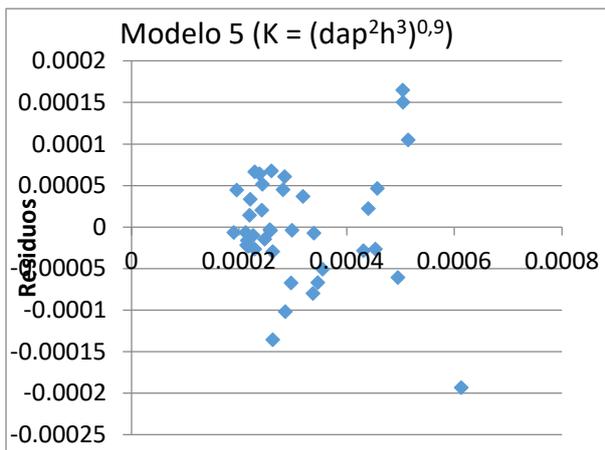
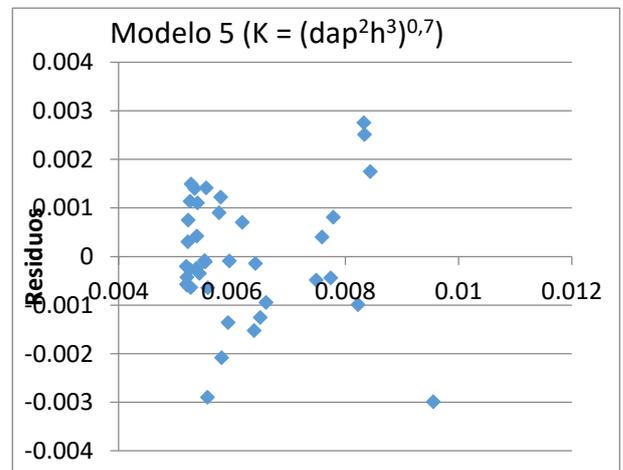
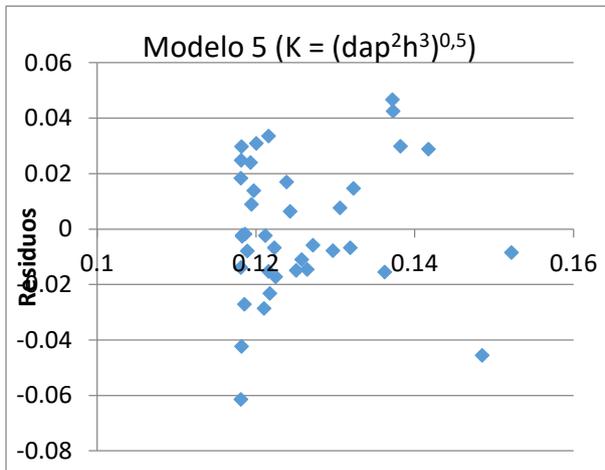
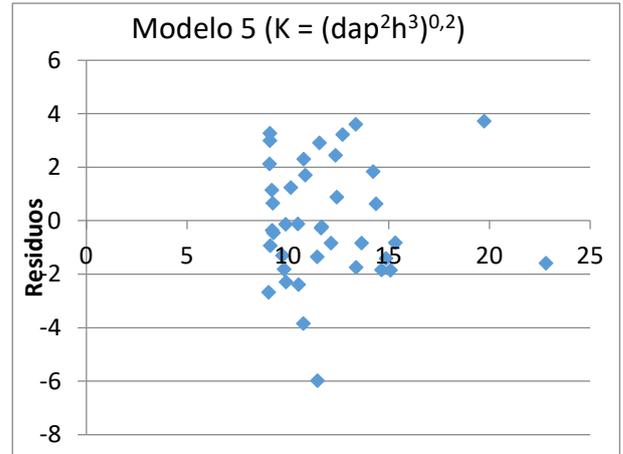
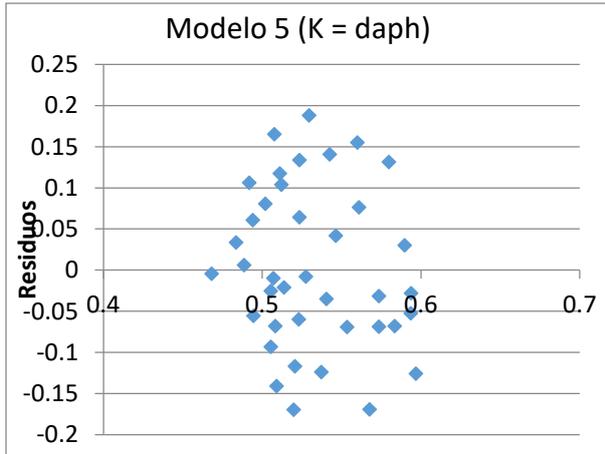
ANÁLISIS DE RESIDUOS DE LOS MODELOS A DISTINTOS COEFICIENTES DE PONDERACIÓN

MODELO 2



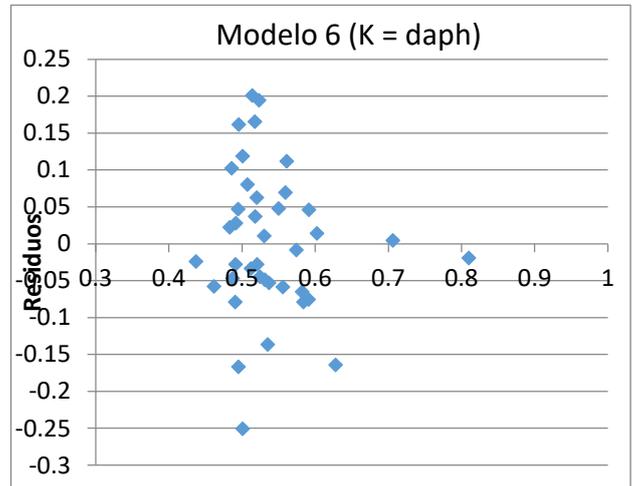
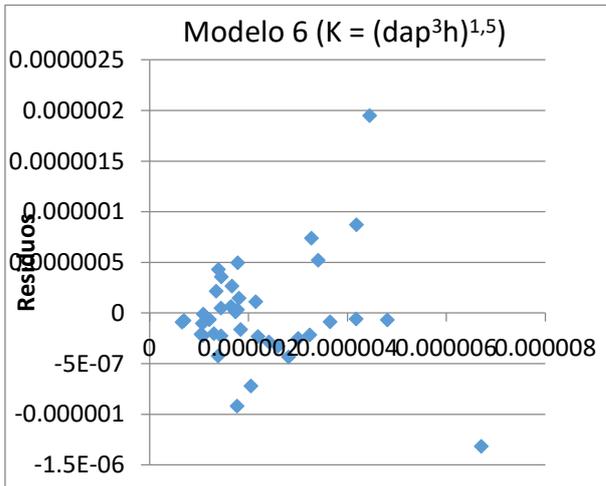
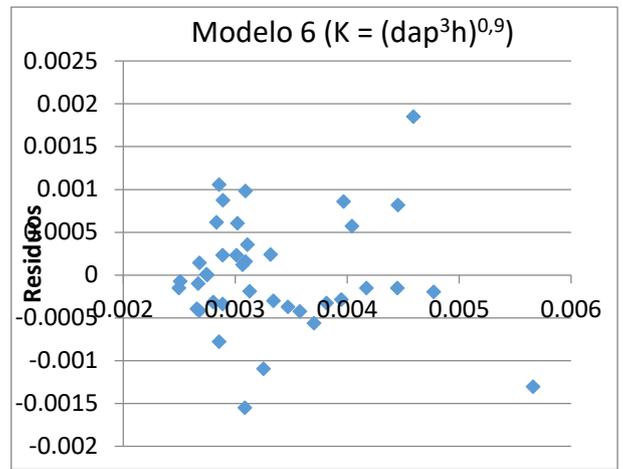
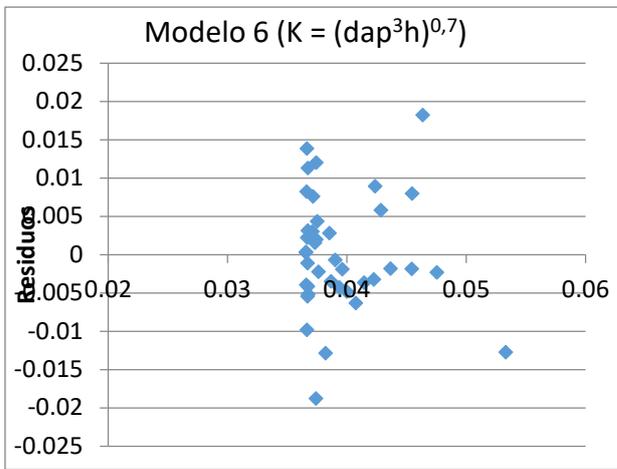
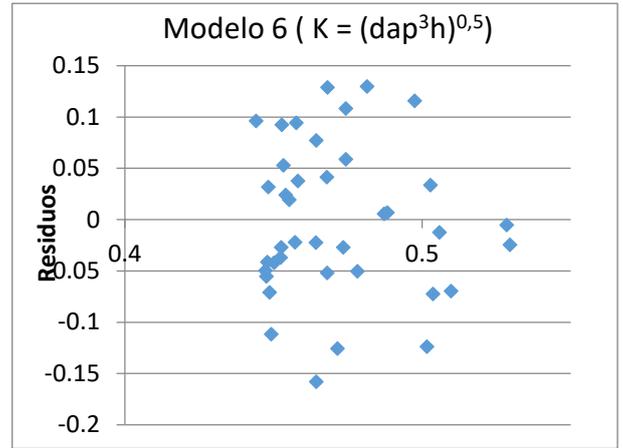
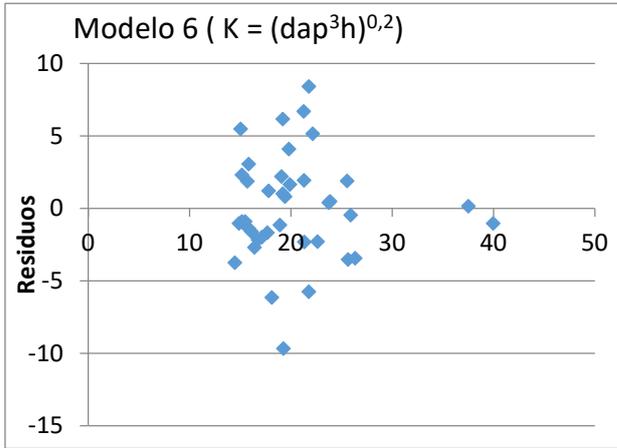
FUENTE: Elaboración propia

MODELO 5



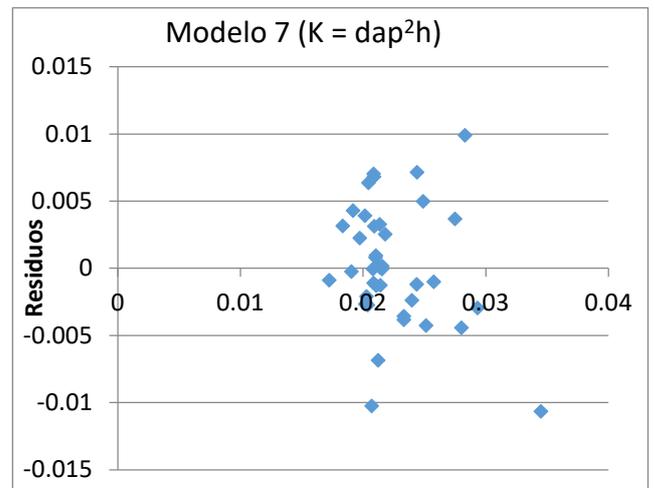
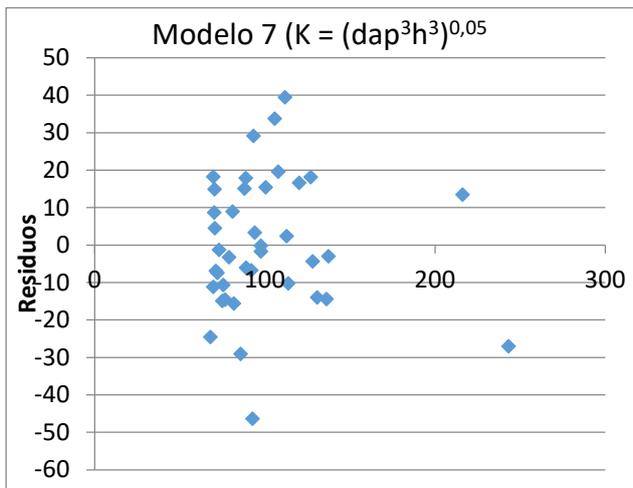
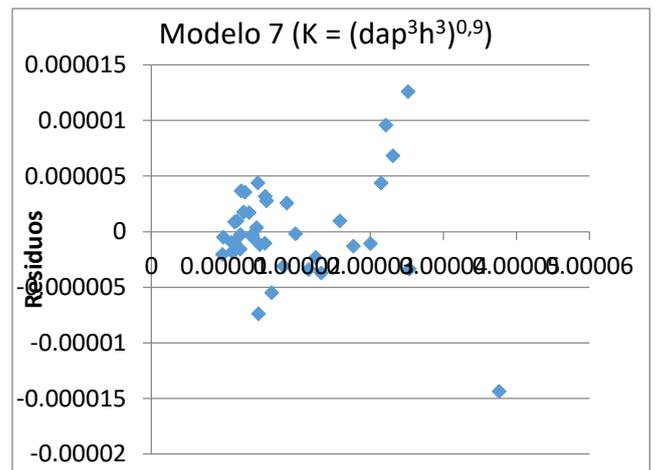
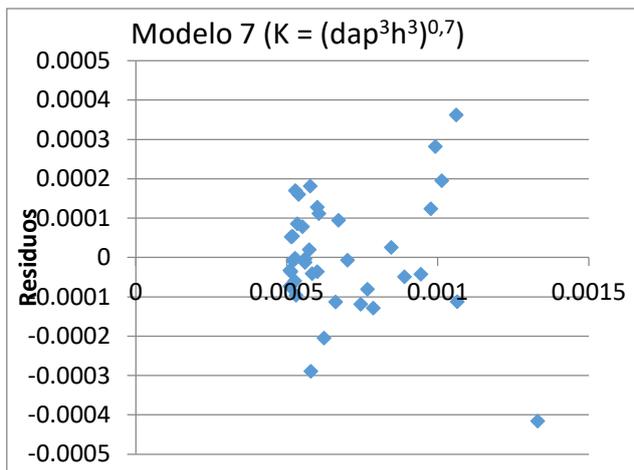
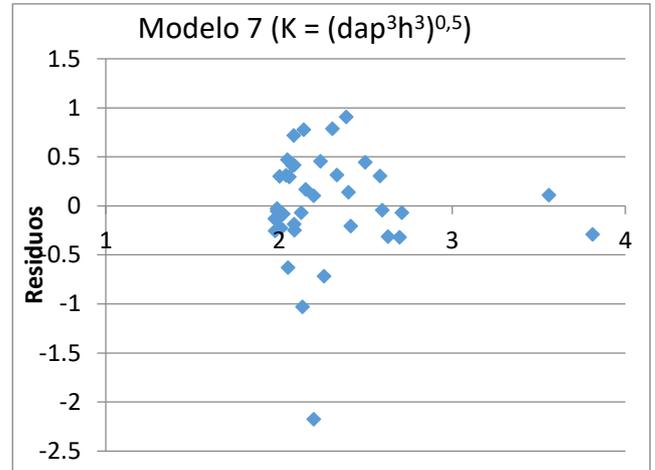
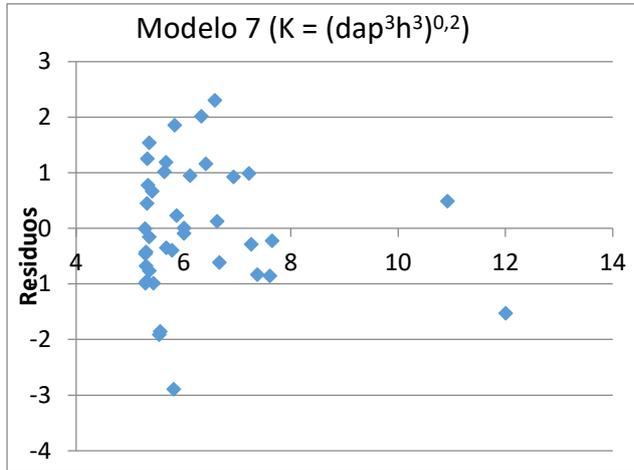
FUENTE: *Elaboración propia*

MODELO 6



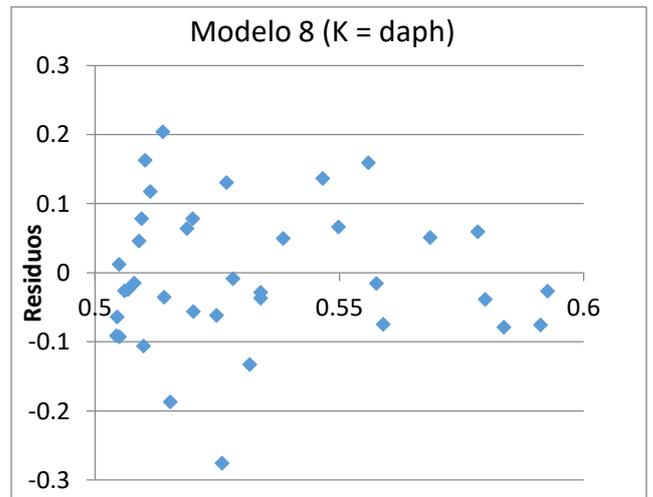
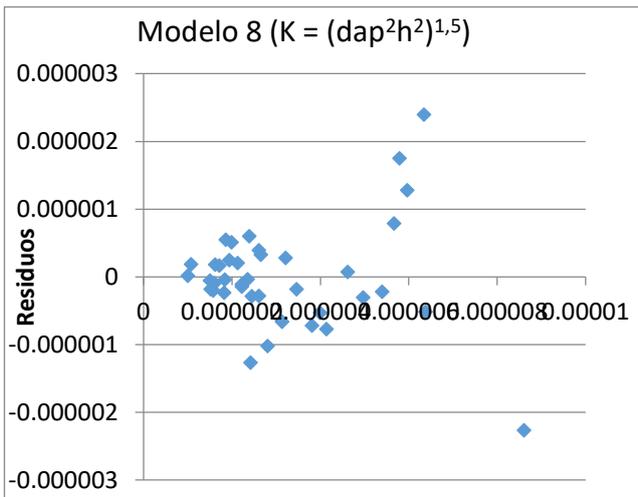
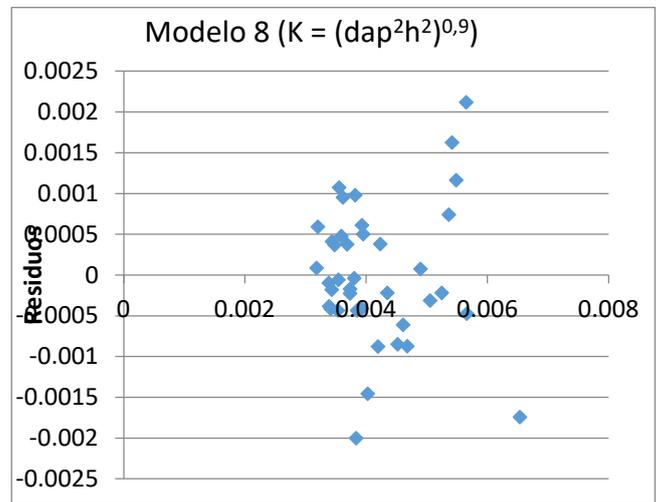
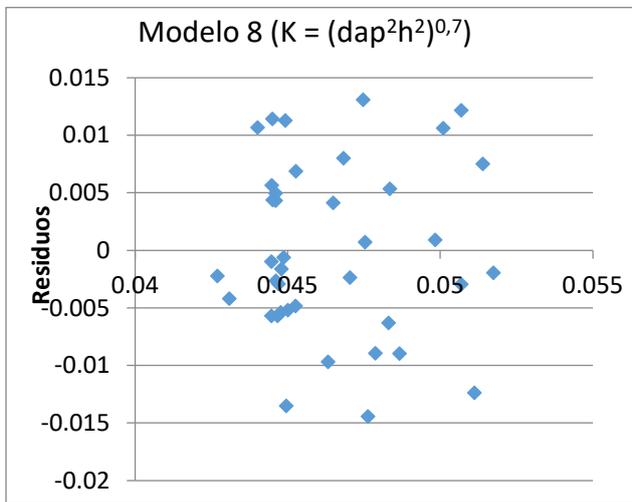
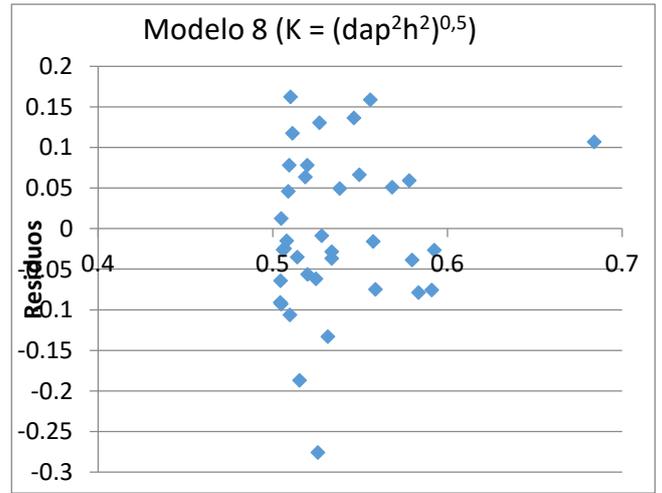
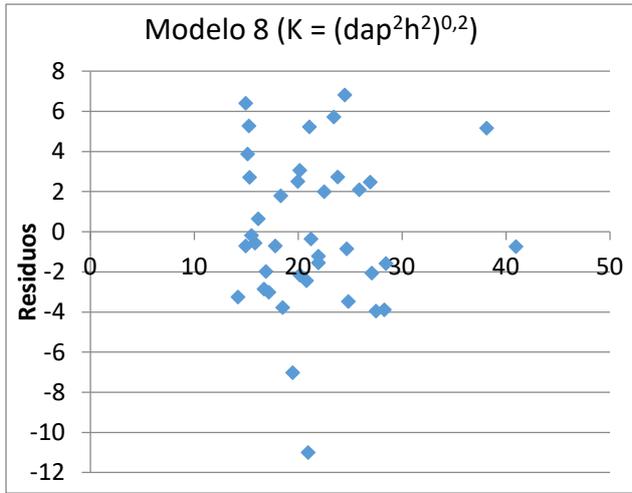
FUENTE: *Elaboración propia*

MODELO 7



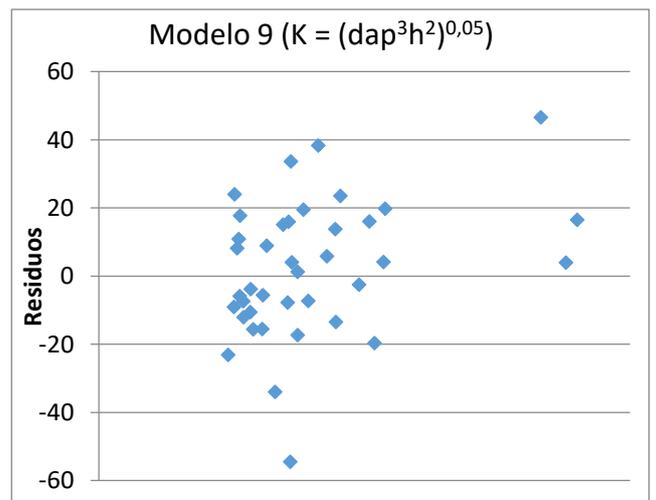
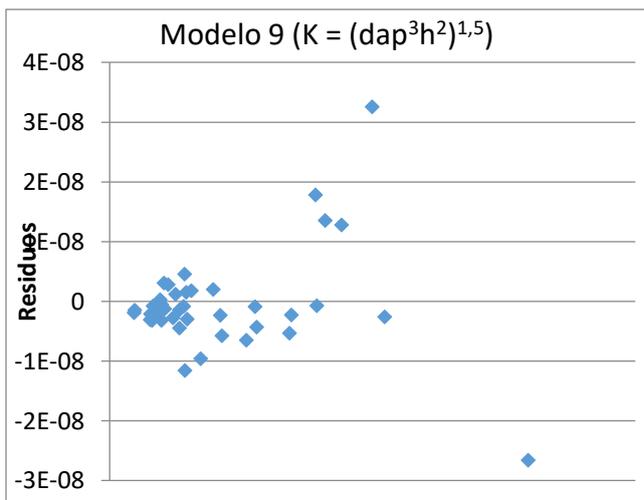
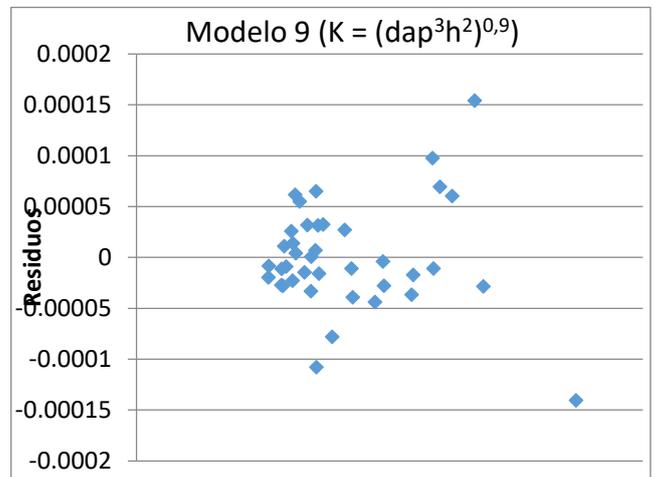
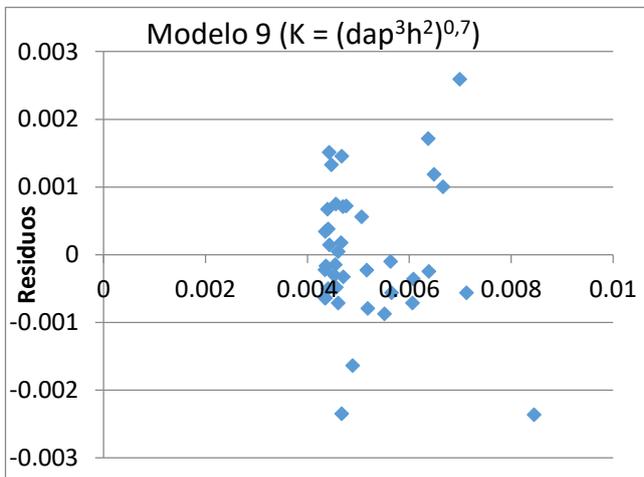
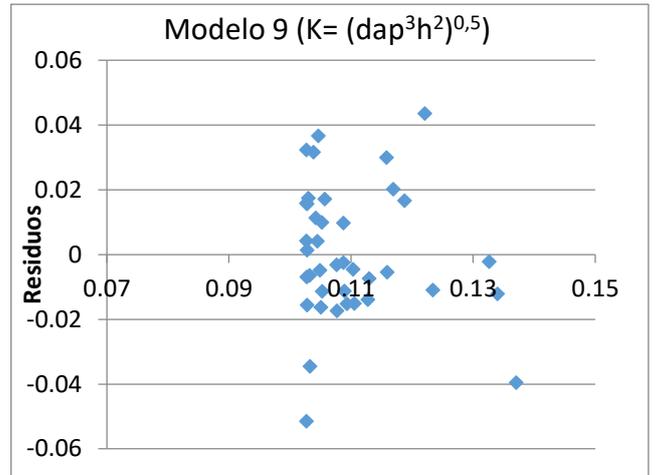
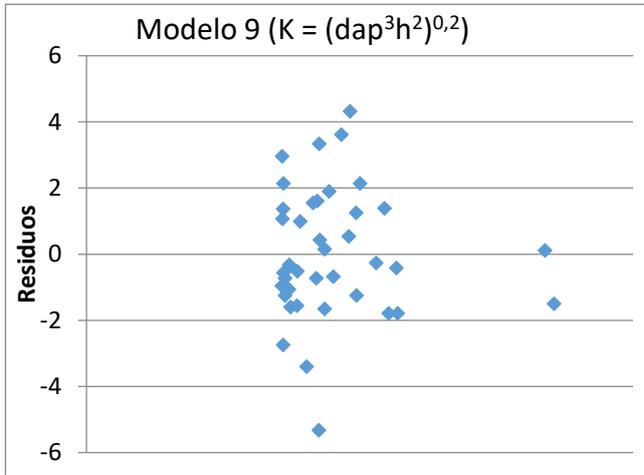
FUENTE: Elaboración propia

MODELO 8



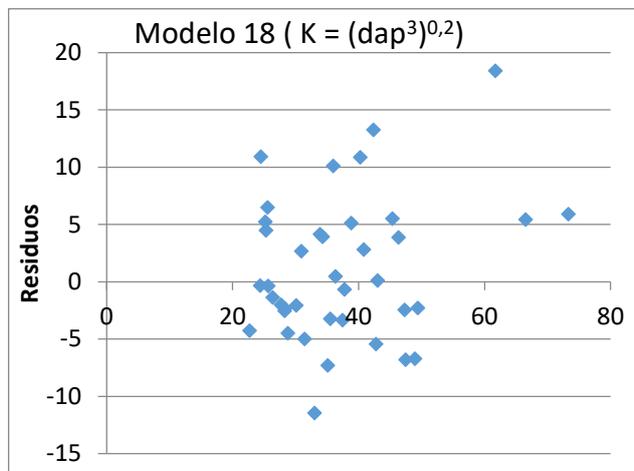
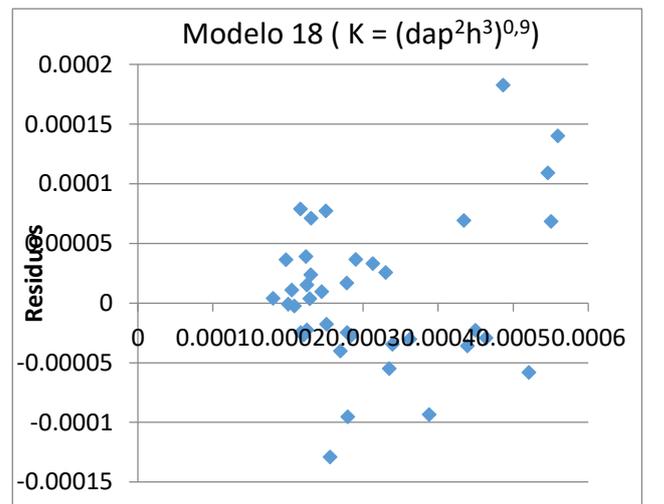
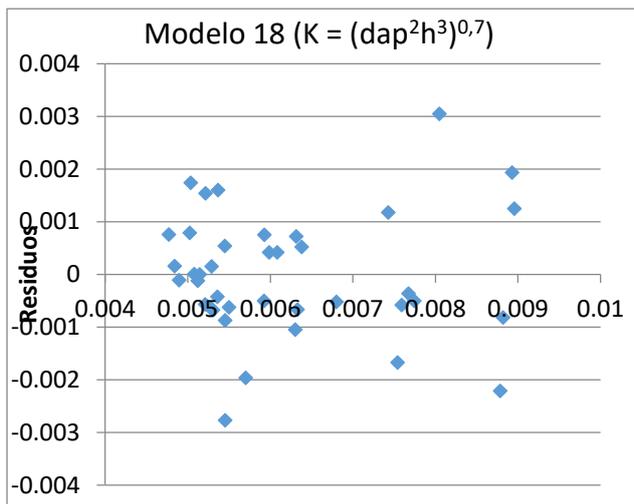
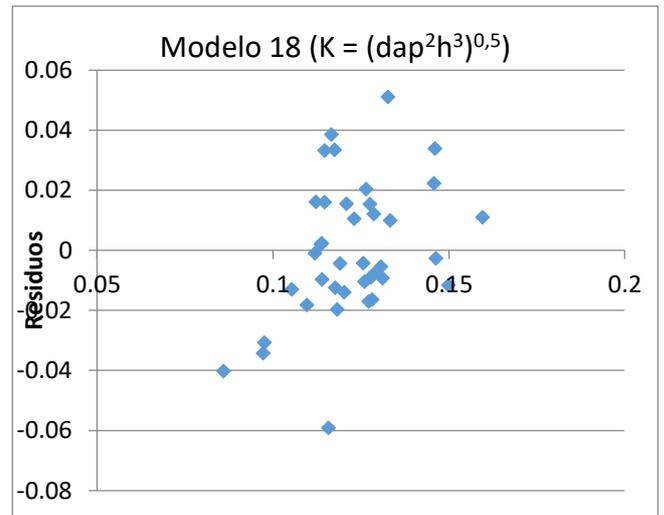
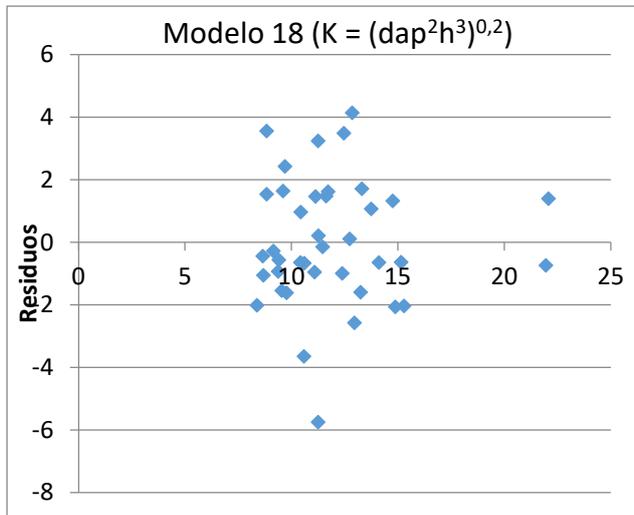
FUENTE: Elaboración propia

MODELO 9



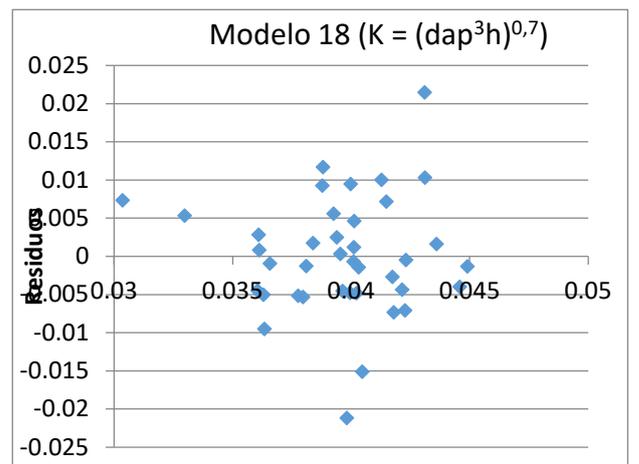
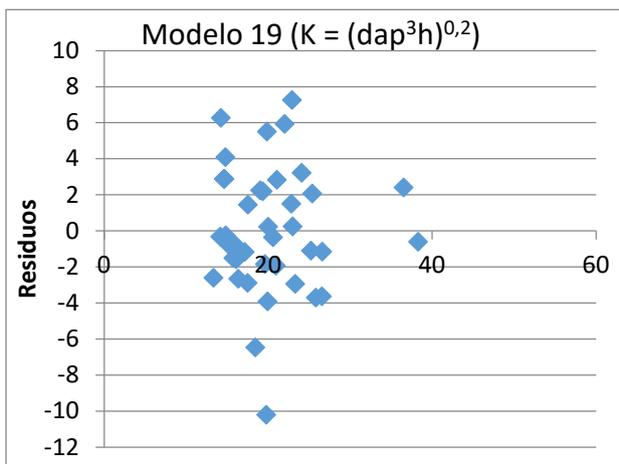
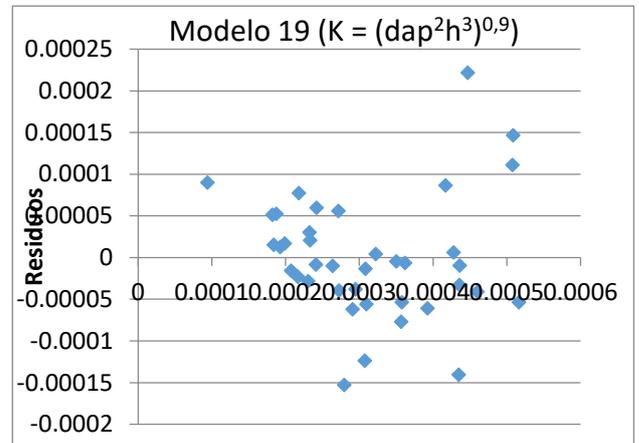
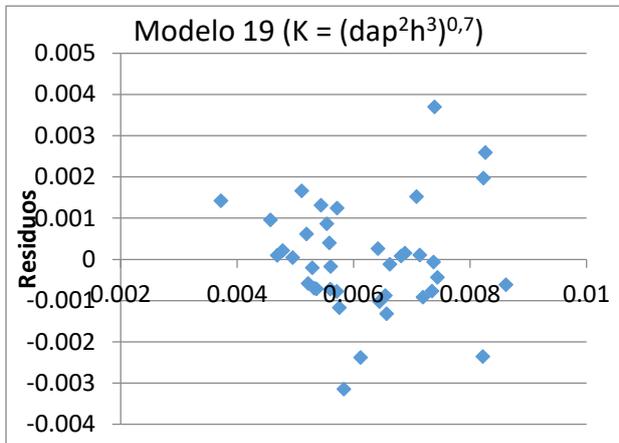
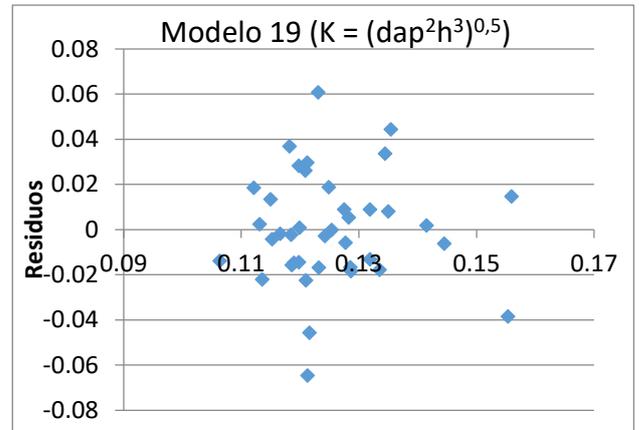
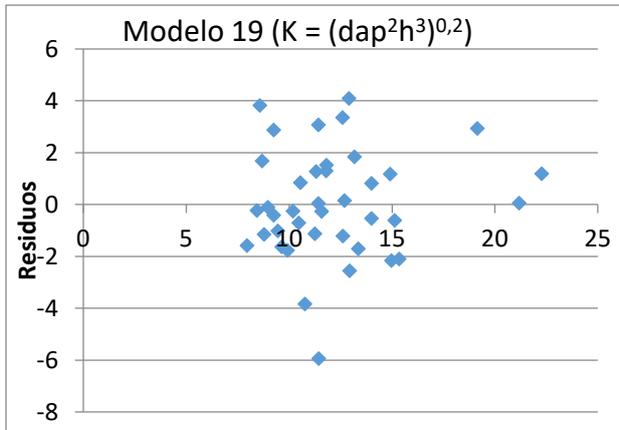
FUENTE: Elaboración propia

MODELO 18



FUENTE: Elaboración propia

MODELO 19



FUENTE: Elaboración propia