



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS  
AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES**

## **ESTIMACIÓN DE BIOMASA AÉREA Y VOLUMEN EN PLANTACIONES FORESTALES DE *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake EN HUIMANGUILLO, TABASCO**

JONATHAN HERNÁNDEZ RAMOS

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

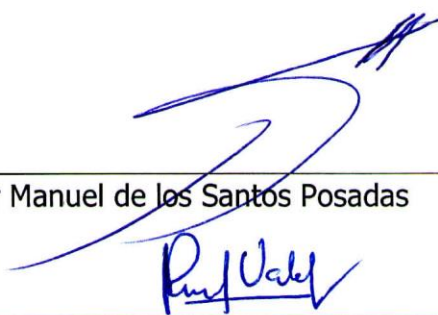
2016

La presente tesis titulada: **Estimación de biomasa aérea y volumen en plantaciones forestales de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en Huimanguillo, Tabasco**, realizada por el alumno: **Jonathan Hernández Ramos**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:


MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES  
POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

  
\_\_\_\_\_  
Ph. D. Héctor Manuel de los Santos Posadas

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
Ph. D. José Rene Valdez Lazalde

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Juan Carlos Tamarit Urias

Montecillo, Texcoco, Estado de México, 1 de abril de 2016

Esta investigación fue patrocinada por la Oficina de Programas Internacionales del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de EE.UU. a través del Northern Research Station y el Programa de Paisajes Sustentables de la Agencia para el Desarrollo Internacional de EE.UU., por medio del proyecto: “Reducing Greenhouse Gas Emissions and Improving Forest Management in Mexico”

# ESTIMACIÓN DE BIOMASA AÉREA Y VOLUMEN EN PLANTACIONES FORESTALES DE *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake EN HUIMANGUILLO, TABASCO

M.en C. Jonathan Hernández Ramos

Colegio de Postgraduados: Postgrado en Ciencias Forestales (2016).

## RESUMEN

El manejo técnico de las plantaciones forestales comerciales (PFC), fundamentado en herramientas silvícolas confiables, es la base que garantiza la rentabilidad de la inversión y la adecuada planeación del manejo forestal para un aprovechamiento sostenido a largo plazo. Este trabajo tuvo como objetivo estimar el volumen comercial y la biomasa aérea de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake en PFC en Huimanguillo, Tabasco, México. Se utilizó información dasométrica de 175 árboles de clones medidos en 2007 (P1) y 93 árboles en 2014 (P2), de entre uno y siete años de edad, así como 459 provenientes de semilla y medidos en 2007 (P3) de dos a once años de edad. Se determinó que las poblaciones son estadísticamente diferentes en términos de forma y ahusamiento. Los índices de esbeltez (relación altura/diámetro) obtenidos fueron 114, 122 y 118 cm cm<sup>-1</sup>, mientras que los factores de forma medios fueron 0.45, 0.34 y 0.34 para P1, P2 y P3, respectivamente. El mejor sistema compatible de ahusamiento-volumen comercial ( $d-Vc$ ) ajustado mediante el método de máxima verosimilitud, corregido por heterocedasticidad y autocorrelación, es el modelo generalizado de Fang y Bailey (1999) para las tres muestras. En la muestra medida en 2014 (P2), el modelo polinomial de quinto orden describe el ahusamiento de mejor manera y señala puntos de inflexión a los 36, 50 y 73 % de la altura total ( $H$ ). La biomasa de fuste ( $B_f$ ), ramas ( $B_r$ ) y follaje ( $B_h$ ) representan 91.42, 5.54 y 2.03 % con respecto a la biomasa total ( $B_t$ ). El factor de expansión de biomasa ( $FEB$ ) promedio para  $B_t$  y  $B_f$  fue de 510.09 y 472.56 kg m<sup>-3</sup> en términos de volumen de fuste, y 1.17 kg kg<sup>-1</sup> para conversión de biomasa de fuste a biomasa total. Usando datos de un inventario forestal no se encontraron diferencias estadísticas entre estimar la biomasa aérea a partir de los modelos que estiman la biomasa de manera directa y la estimación mediante factores de expansión y el sistema de cubicación generado.

*Palabras clave:* perfil fustal, sistema compatible, ahusamiento-volumen, funciones alométricas, biomasa foliar, *Eucalyptus urophylla*.

# ABOVEGROUND BIOMASS AND VOLUME ESTIMATION OF *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake PLANTATIONS IN HUIMANGUILLO, TABASCO

M. en C. Jonathan Hernández Ramos

Colegio de Postgraduados: Postgrado en Ciencias Forestales (2016).

## ABSTRACT

The management of commercial forest plantations (CFP) must be supported on reliable silvicultural tools and techniques such that profitability and sustained long-term use is guaranteed. The objective of this research was to estimate commercial volume and aboveground biomass of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake in CFP located at Huimanguillo, Tabasco, Mexico. Data for merchantable and total volume came from 175 clonal trees measured in 2007 (P1) and 93 clonal trees measured in 2014 (P2) ranging from one-to-seven years of age. Another part of the sample came from 459 trees grew from wild seed sources, these were measured in 2007 (P3) at an age ranging from two-to-eleven years. Aboveground biomass measurements were only taken on the 2014 sample. All tree populations were statistically different in terms of taper, total volume and variable commercial volume. The slenderness ratio (height/diameter) was 114, 122 and 118 cm cm<sup>-1</sup> and the average shape factor was 0.45, 0.34 and 0.34 for P1, P2 and P3. The three samples are statistically different in their normal diameter ( $dn$ ), total height ( $H$ ) and volume ( $V$ ). The compatible taper-volume system that better fit the data by the maximum-likelihood estimation, corrected for heteroscedasticity and autocorrelation, is the generalized model of Fang and Bailey (1999) on the three samples. In the 2014 sample (P2) a fifth-order model better describes taper and indicates inflection points at 36, 50 and 73% of  $H$ . Stem ( $B_f$ ), branches ( $B_r$ ) and foliage ( $B_h$ ) biomass, as a proportion of total biomass ( $B_t$ ), are represent to be 91.42, 5.54 and 2.03 % respectively. Average biomass expansion factor ( $FEB$ ) for  $B_t$  and  $B_f$  are 510.09 and 472.56 kg m<sup>-3</sup> in terms of stem volume, and 1.17 kg kg<sup>-1</sup> to convert from  $B_f$  to  $B_t$ . Using data from a current forest inventory, no statistical differences was found between aboveground biomass direct estimation using the fitted biomass models and using the FEB from volume models.

**Key words:** Bole profile, compatible system, taper-volume, allometric functions, foliar biomass, *Eucalyptus urophylla*.

## **Dedico esta tesis:**

A Dios porque en la segunda oportunidad me dio la serenidad de afrontar los retos y las situaciones difíciles en el sendero de la vida, por trazar un camino que me ha permitido tener una apertura intelectual y que siempre me ha llevado a un sinfín de oportunidad y nuevos retos.

*“El ser libre es poder pensar sin ataduras”*

A mis queridos padres Alejandro Hernández Cárdenas y Reyna Ramos Murcia por el tiempo y esfuerzo invertido en mí, los cuales forjaron la sencillez, el respeto, la honestidad y la dedicación en cada una de mis actividades emprendidas, acciones que me orientaron hacía un buen camino con cada consejo y reprimenda que me hicieron. Por todo ello y por el apoyo moral que siempre he tenido de su parte, este logro es dedicado a ustedes con todo el cariño y amor por haber sido parte fundamental en mi anhelo de seguir adelante en el camino del saber.

*“El mundo cambia con el ejemplo, no con la opinión de las personas”*

A mis hermanos Adrián y Alejandro por compartir todos esos momentos felices, tristes e inciertos a lo largo de nuestro crecimiento juntos, por estar hombro a hombro en los trabajos de casa, en los juegos con la familia y por ser el apoyo moral en las situaciones de desconcierto a lo largo de mi vida. Gracias por todo lo que han hecho por mí de forma incondicional.

*“No se queden en un lugar que no puedan florecer, aunque les guste”*

A Alicia S. Chávez García por ir a mi lado siempre en el camino en búsqueda de la felicidad personal, por cada palabra de aliento que recibí en los momentos de debilidad y por el apoyo moral e incondicional que me brindaste para llegar hasta este punto de mi vida. Pero más por enseñarme un horizonte diferente :).

*“Cuando se encuentra algo que nos hace feliz, no debemos preocuparnos por lo que diga la gente, porque es bastante difícil encontrarlo para prestarles atención”*

## **Agradecimientos**

*Ofrezco mis más sinceros agradecimientos;*

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). particularmente al Centro de Investigación Regional Sureste (CIRSE), Campo Experimental Chetumal, Quintana Roo por brindarme la oportunidad ascender un escalón más en mi carrera profesional.

Al Colegio de Postgraduados (COLPOS) en su Campus Montecillo dentro del Programa de Postgrado en Ciencias Forestales, por compartir sus conocimientos y forjar el intelecto en sus aulas que recordaré por siempre debido a los grandes amigos y profesores que nos dedicaron su tiempo y esfuerzo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado, el cual hizo posible la culminación de un peldaño más en la búsqueda de la comprensión de nuestra existencia.

Al Ph. D. Héctor Manuel de los Santos Posadas, por ser el ingeniero que tomó las piezas de un rompecabezas que estaba incompleto y lograr la construcción de una persona con una visión diferente y alocada de la vida. Por la inmejorable disponibilidad de tiempo y esfuerzo que tenía para atender las dudas o platicar un momento de todo y nada a la vez, por nunca limitarse en compartir sus conocimientos, por la oportunidad que me brindó de ser su pupilo durante estos dos años, por todo ello y a que nunca olvidaré sus chácharas, mis más sinceros agradecimientos.

A los Ph. D. José René Valdez Lazalde, Dr. Juan Carlos Tamarit Urias y Ph. D. Gregorio Ángeles Pérez, por compartir sus experiencias personales y profesionales que enriquecieron sustancialmente el aprendizaje dentro de la maestría y por el tiempo que le dedicaron al trabajo realizado.

A la Ph. D. Alicia Pedizzi y al Dr. Omar Carrero, por los consejos y recomendaciones realizadas, además del apoyo brindado y las facilidades en la realización de este trabajo de investigación.

A Proteak en México primeramente por la oportunidad y apoyo depositado en mi persona para realizar la investigación, además del apoyo económico y logístico para el

levantamiento de los datos de campo. Además al COLPOS, Campus Cárdenas Tabasco y al Campo Experimental Huimanguillo, Tabasco del INIFAP, por las facilidades presentadas para el secado de las muestras de campo.

Al Dr. J. Jesús García Magaña, M.C. Xavier García Cuevas y M.C. Leonardo Beltrán Rodríguez por su gran amistad y apoyo en la mejora de los escritos, que han contribuido siempre a madurar la forma de redactar y a hacerme un profesionalista más competitivo.

A mis amigos y compañeros, con los cuales compartir dos años en el COLPOS y que recordaré toda la vida por haberme ayudado a madurar con esas platicas en la madrugada, esas tareas infinitas que no nos dejaban dormir y ni salir al sol (Ustedes saben de quien ☺), o bien por las experiencias compartidas con el cobijo de unas cheves; además por pasar tiempo jugando futbol, viendo series de tv o las tardes en las que comíamos pizza de asbesto, tortas infinitas de pierna, 1000 quesadillas después de jugar a las diez de la noche o tamales por la mañana con los compañeros extranjeros, y por todos los recuerdos que se quedarán para la posteridad y que no volverán, mis agradecimientos más sinceros esperando se vuelvan a repetir y no se olviden nunca. A todas esas personas les deseo lo mejor en su vida personal y profesional, aclarando que se mencionan de forma aleatoria para no herir la susceptibilidad de alguno: Javier Villalba-Paraguay, Rodrigo Huerta (Él Jr.), Leonardo Beltrán Rodríguez, Luis Martínez Ángel, Jeny Vargas Abonce, Cesar A. Robles Gutiérrez, Esteban Torres Vivar, Secundino Torres, Ma. De los Ángeles Soriano, Ramiro Puc Kauil, Julia Martínez López, Efraín Velasco Bautista, Reynol Fierros Mateo, Vicente F. Vásquez Cortéz y Francisco Montoya Reyes.

Y a todos mis amigos que se encuentran lejos, pero sin dejar de apoyar y fortalecer el lazo sentimental que nos une, ¡Gracias!: Azzael Islas Santillán, Manuel Samperio Jiménez, Josué Fabián Pérez H., Ramón Razo Zarate, Armando Hernández V., Enrique Garfis M., Roberto C. Chávez, Helena Aguilera, Griselda Puebla G., Azael Vizcaya Ramos, H. Jesús Muñoz Flores, Trinidad Sáenz, G. Geraldine García E. y Martín Martínez Salvador.



# CONTENIDO

CONTENIDO	<i>ii</i>
ÍNDICE DE CUADROS	<i>iv</i>
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>vii</i>
CAPÍTULO I	
1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 Producción maderable en México.....	1
1.2 Establecimientos de plantaciones forestales maderables y no maderables.....	2
1.3 Cambio climático y captura de carbono.....	2
1.4 Modelación forestal.....	3
1.5 Ahusamiento y volumen.....	5
1.6 Biomasa y carbono.....	7
1.7 Objetivos.....	8
1.8 Literatura citada.....	8
CAPÍTULO II	
2 ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN COMERCIAL EN PLANTACIONES DE <i>Eucalyptus urophylla</i> CON MODELOS DE VOLUMEN TOTAL Y DE RAZÓN.....	12
2.1 Resumen.....	12
2.2 Abstract.....	13
2.3 Introducción.....	14
2.4 Materiales y métodos.....	15
2.5 Resultados y discusión.....	21
2.6 Conclusiones.....	32
2.7 Literatura citada.....	33
CAPÍTULO III	
3 FUNCIONES DE AHUSAMIENTO PARA CLONES DE <i>Eucalyptus urophylla</i> ESTABLECIDO EN PLANTACIONES COMERCIALES EN HUIMANGUILLO, TABASCO, MÉXICO.....	37

3.1	Resumen.....	37
3.2	Abstract.....	38
3.3	Introducción.....	39
3.4	Materiales y métodos.....	40
3.5	Resultados y discusión.....	42
3.6	Conclusiones.....	52
3.7	Literatura citada.....	53
CAPÍTULO IV		
SISTEMA COMPATIBLE DE AHUSAMIENTO Y VOLUMEN		
4	COMERCIAL PARA PLANTACIONES DE <i>Eucalyptus urophylla</i> EN TABASCO, MÉXICO.....	58
4.1	Resumen.....	58
4.2	Abstract.....	59
4.3	Introducción.....	60
4.4	Materiales y métodos.....	61
4.5	Resultados y discusión.....	65
4.6	Conclusiones.....	74
4.7	Literatura citada.....	74
CAPÍTULO V		
BIOMASA AÉREA Y FACTORES DE EXPANSIÓN DE		
5	BIOMASA EN PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES DE <i>Eucalyptus urophylla</i> .....	79
5.1	Resumen.....	79
5.2	Abstract.....	80
5.3	Introducción.....	81
5.4	Materiales y métodos.....	82
5.5	Resultados y discusión.....	87
5.6	Conclusiones.....	98
5.7	Literatura citada.....	98
CAPÍTULO VI		
6	CONCLUSIONES GENERALES.....	103

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	2.1.	Modelos utilizados para estimar $V_t$ de árboles en PFC de <i>E. urophylla</i> .	17
Cuadro	2.2.	Modelos de razón de volumen utilizados en PFC de <i>E. urophylla</i> .	19
Cuadro	2.3.	Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del modelo de $V_t$ de Schumacher-Hall con variables indicadoras en las tres poblaciones de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	22
Cuadro	2.4.	Parámetros estimados y estadísticos de ajuste de los modelos de $V_t$ para las tres poblaciones de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	23
Cuadro	2.5.	Parámetros estimados y estadísticos de ajuste de los modelos de Schumacher-Hall (P1 y P3) y Spurr (P2) corregidos por heterocedasticidad para las tres poblaciones de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	24
Cuadro	2.6.	Parámetros estimados y estadísticos de ajuste de los modelos de razón de volumen que mejor se ajustaron a cada población en PFC de <i>E. urophylla</i> , en Huimanguillo, Tabasco, México.	27
Cuadro	2.7.	Sesgo absoluto ( $E$ ) y diferencia agregada % ( $DA$ %) de los modelos de razón volumétrica en las tres poblaciones.	29
Cuadro	3.1.	Modelos de ahusamiento ( $d$ ) evaluados para modelar el perfil fustal de árboles de <i>E. urophylla</i> de PFC en Tabasco, México.	41
Cuadro	3.2.	Valores de los parámetros de los modelos de ahusamiento para árboles clonales de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	43
Cuadro	3.3.	Estadísticos de bondad de ajuste para los modelos de ahusamiento evaluados para árboles clonales de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	44
Cuadro	3.4.	Estadísticos de bondad de ajuste y valores de los parámetros de los modelos de ahusamiento Polinomial de quinto orden y Cielito 3 corregidos por autocorrelación para árboles de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	45

Cuadro 3.5.	Valores de los estadísticos y parámetros del ajuste simultáneo de ahusamiento y volumen comercial para <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	51
Cuadro 4.1.	Sistemas compatibles ahusamiento-volumen comercial ajustados en los árboles de las tres muestras de poblaciones de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco.	63
Cuadro 4.2.	Estadísticos descriptivos para las variables medidas de las tres muestras de las poblaciones evaluadas de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	66
Cuadro 4.3.	Parámetros, estimadores y error estándar aproximado (Eea) de los parámetros del sistema compatible derivado del modelo generalizado de Fang y Bailey para las muestras de las tres poblaciones de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	69
Cuadro 4.4.	Estadísticos de bondad de ajuste del sistema compatible de ahusamiento ( $d$ ) – Volumen comercial ( $V_c$ ) del modelo generalizado de Fang y Bailey para tres poblaciones de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	70
Cuadro 4.5.	Valores del Sesgo promedio ( $E$ ) para las estimaciones con el sistema compatible de ahusamiento ( $d$ ) – Volumen comercial ( $V_c$ ) generalizado de Fang y Bailey en las muestra de las poblaciones de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	73
Cuadro 4.6.	Prueba de F de Snedecor para igualdad de los tres ajustes del sistema compatible de ahusamiento ( $d$ ) – Volumen comercial ( $V_c$ ) del modelo generalizado de Fang y Bailey.	74
Cuadro 5.1.	Modelos ajustados para estimar la biomasa total y por componente	85
Cuadro 5.2.	Estadísticos básicos de las variables de los árboles muestreados de <i>E. urophylla</i> en plantaciones forestales entre 1 y 7 años de edad en Huimanguillo, Tabasco.	88
Cuadro 5.3.	Distribución porcentual de biomasa por categoría diamétrica de cada componente estructural en árboles de <i>E. urophylla</i> .	89
Cuadro 5.4.	Valores de ajuste simultáneo y parámetros de los modelos de biomasa para árboles clonales de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco.	91

Cuadro 5.5.	Parámetros y estadísticos de ajuste de los modelos al incluir las variables de altura de fuste limpio y sumatoria de los diámetros basales de las ramas por componente estructural de biomasa para <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	93
Cuadro 5.6.	Estadísticos de evaluación de la capacidad predictiva de la biomasa por componente y total <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	94
Cuadro 5.7.	Factores de expansión de biomasa por categoría diamétrica para los datos observados de biomasa aérea ( $\text{kg kg}^{-1}$ ).	95
Cuadro 5.8.	Factores de expansión de biomasa para los datos observados por edad (años) para los datos observados de biomasa aérea ( $\text{kg kg}^{-1}$ ).	96
Cuadro 5.9.	Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros de los modelos (18) y (19) para estimar $B_t$ y $B_f$ en árboles de <i>E. urophylla</i> de PFC en Huimanguillo, Tabasco, México.	97
Cuadro 5.10.	Estimadores con el muestreo simple aleatorio para PFC de <i>E. urophylla</i> de entre uno y siete años de edad establecidas en Huimanguillo, Tabasco, México.	98

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Distribución de residuales de $V_t$ con respecto al diámetro normal ( $dn$ ) de los modelos de mejor ajuste corregidos por heterocedasticidad para las plantaciones P1, P2 y P3 de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	24
Figura 2.2.	Estimación y proyección del $V_t$ con el modelo de Schumacher-Hall para P1 y P3 y Spurr para la población P2 de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	25
Figura 2.3.	Residuales de los mejores modelos de razón volumétrica para árboles de las tres poblaciones de <i>E. urophylla</i> evaluadas en Huimanguillo, Tabasco, México.	28
Figura 2.4.	Volumen comercial ( $V_c$ ) estimado vs $V_c$ predicho para las poblaciones P1, P2 y P3, utilizando los modelos seleccionados.	31
Figura 3.1.	Predicción del perfil de árboles de clones de <i>E. urophylla</i> con los modelos Polinomial de quinto orden y Cielito 3.	46
Figura 3.2.	Diámetro observado vs predicho de los modelos de ahusamiento Polinomial de quinto orden y Cielito 3 ajustados para árboles clonales de <i>E. urophylla</i> .	46
Figura 3.3.	Residuales de los modelos seleccionados para ahusamiento de árboles clonales de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	47
Figura 3.4.	Error porcentual de estimación del $d$ a distintas alturas en el fuste mediante los modelos Polinomial quinto orden y Cielito 3 ajustados para árboles clonales de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	48
Figura 3.5.	Comportamiento entre el $d$ y $hm$ con respecto al $V_c$ (a y b) y grafica de datos observados vs predichos del modelo de $V_c$ (c) para <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	52
Figura 4.1.	Comportamiento del diámetro ( $d$ ) y volumen acumulado ( $V_c$ ) con respecto a la altura del fuste ( $hm$ ) de los árboles de clones E1 (a y d) y E2 (b y e), y semillas E3 (c y f) de <i>E. urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, México.	67
Figura 4.2.	Comportamiento de los residuales de $d$ (a, b y c) y $V_c$ (d, e y f) con el sistema compatible de ahusamiento ( $d$ ) – Volumen comercial ( $V_c$ )	71

del modelo generalizado de Fang y Bailey para cada muestra por población de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

- Figura 4.3. Función de corrección parcial de autocorrelación para  $d$  (a, b y c) y  $V_c$  (d, e y f), para el modelo generalizado de Fang y Bailey en las tres muestras de las poblaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México. 72
- Figura 4.4. Relación entre el  $V_c$  estimado vs  $V_c$  predicho para las poblaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México. 73
- Figura 5.1. Distribución de residuales de los modelos (9), (2), (8) y (10), utilizados para la estimación de biomasa por componente estructural en *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México. 90
- Figura 5.2. Distribución de residuales corregidos por heterocedasticidad de los modelos (9), (2), (8) y (10), utilizados para la estimación de biomasa por componente estructural en *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México. 92
- Figura 5.3. Distribución de residuales al corregir por heterocedasticidad los modelos (8), (20), (21) y (9), ajustados para estimar biomasa por componente estructural en *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México. 94

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

### 1.1. PRODUCCIÓN MADERABLE EN MÉXICO

Los bosques templados y tropicales proporcionan bienes y servicios ambientales, sociales y económicos (SEMARNAT, 2013) que contribuyen al desarrollo de las zonas rurales del país. En el año 2001, el aprovechamiento de los recursos forestales se realizaba de manera no sustentable en la mayoría de las áreas bajo extracción maderable (CONAFOR-SEMARNAT, 2001), por lo cual, el Programa de Desarrollo Forestal (PRODEFOR) hasta el 2012 se enfocó en promover acciones que propiciaran bosques naturales más competitivos y con mayor productividad a través de un buen manejo forestal (CONAFOR, 2012). De igual manera, el Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN) propició el cultivo de especies preciosas y de rápido crecimiento.

A pesar de los esfuerzos realizados, la producción forestal maderable en México ha presentado una disminución del 15.71 % en el año 2012 con respecto a 2003, año en el que se tenía una producción de siete millones de metros cúbicos rollo ( $m^3r$ ) anuales. De los 5.9 millones de  $m^3r$  reportados en la producción maderable en 2012, los principales géneros aprovechados fueron *Pinus*, *Abies* y *Quercus*, mientras que dentro de los grupos de especies aprovechadas se encuentran otras coníferas, latifoliadas, especies tropicales y preciosas (SEMARNAT, 2013).

Dicha producción maderable en 2003 contribuía con cerca de 28,673.0 millones de pesos del Producto Interno Bruto (PIB) nacional, mientras que para 2012 representaba alrededor de 29,307.0 millones de pesos, significando un aumento en la contribución en el PIB de 2.16 %. En 2014 la contribución del sector forestal al PIB se proyectó en 29,412.4 millones de pesos producto de actividades silvícolas (46.6 %) y la industria de celulosa y papel (53.4 %) (Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, 2014).

El establecimiento de plantaciones forestales comerciales (PFC) y el manejo forestal sostenible de los bosques naturales, deberán estar basados en herramientas técnicas y silvícolas confiables para elevar la competitividad y productividad maderable y no maderable del sector forestal en México, situación que contribuirá a la reducción de las importaciones y atenderá de manera significativa la demanda de los productos forestales en el mercado nacional.



## **1.2. ESTABLECIMIENTO DE PLANTACIONES FORESTALES MADERABLES Y NO MADERABLES**

Hasta el año 2013, el establecimiento de PFC representaba el 4.8 % (187 millones de hectáreas) de la superficie forestal total del planeta y los principales géneros que se establecen son *Pinus*, *Eucalyptus*, *Hevea*, *Acacia* y *Tectona*. En México, la tendencia en el establecimiento de PFC es similar, empleando mayormente los géneros *Pinus*, *Eucalyptus*, *Tectona*, *Gmelina*, *Cedrela* y *Swietenia*, que en conjunto con algunas otras latifoliadas representan una superficie aproximada a 253,594 ha (CONAFOR, 2013b).

Las PFC en México están distribuida principalmente en los estados de Campeche, Tabasco y Veracruz (85.2 % de especies maderables y el 14.8 % a especies no maderables). Se pretende que para el año 2025 se hayan establecido cerca de 300 mil hectáreas (CONAFOR, 2011) de las 22 millones de hectáreas potenciales que tiene México (CONAFOR, 2014b). Para la CONAFOR existen 13.9 millones de hectáreas para el establecimiento PFC maderables y no maderables que pueden ser utilizados para la producción de materias primas, industrialización y comercialización (CONAFOR, 2014b).

La industria forestal se abastece principalmente del bosque natural y en menor proporción de las PFC, aunque la industria de celulosa y papel depende fundamentalmente de las importaciones de materia prima (CONAFOR, 2011). Debido a esta situación y con el apoyo de las políticas públicas orientadas a promover el establecimiento de PFC, se les puede considerar como una alternativa económicamente viable para satisfacer las necesidades de la industria forestal en México (CONAFOR, 2011).

El establecimiento de PFC contribuye a la captura y almacenamiento de Carbono de la atmósfera, a reducir los efectos del cambio climático (CONAFOR, 2011) y además proporcionan bienes y servicios que propician el desarrollo del sector forestal.

## **1.3. CAMBIO CLIMÁTICO Y CAPTURA DE CARBONO**

El aumento de las concentraciones de Gases Efecto Invernadero (GEI) en la atmosfera ocasiona el fenómeno del cambio climático global que está propiciando alteraciones significativas en los eventos meteorológicos y climáticos que se presentan a nivel global (CONAFOR, 2014a). Este fenómeno, aunado con el crecimiento de la frontera agrícola y urbana, la sobreexplotación de

los recursos naturales, la contaminación y la introducción de especies exóticas invasoras son las causas principales de la pérdida de ecosistemas forestales (CONAFOR, 2013a).

El cambio climático global es el mayor reto que enfrenta la humanidad en el siglo XXI por los impactos negativos que está causando al planeta (Ordoñez, 2008; ONU, 2011; CONAFOR, 2013a; Sánchez, 2013). El consenso internacional para alinear las políticas públicas orientadas a la reducción de la emisión de GEI aún se ve muy complicado, mientras que los países en los cuales se ha emprendido las acciones para lograrlo, el avance es lento (Sánchez, 2013).

Particularmente México, al ratificar el compromiso de realizar acciones que contribuyan a reducir las emisiones de GEI en el Acuerdo de Cancún en 2010 (ONU, 2011), emprendió acciones, políticas públicas y creó instrumentos jurídicos que apoyan a la reducción de la vulnerabilidad de los ecosistemas ante los cambios climáticos, la deforestación y degradación de las áreas vegetales y la disminución en la liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (CEFP, 2013)

Con la finalidad de reducir el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), que es el GEI antropógeno más importante (IPCC, 2007; Ordoñez, 2008; INECC, 2010), en México el aumento de la infraestructura y la tecnificación en los sistemas productivos, el monitoreo de los recursos, el impulso de mejores prácticas de manejo y aprovechamiento de los recursos, además del establecimiento de PFC, contribuyen de manera significativa a preservar los sumideros de Carbono naturales y a desarrollar nuevos sumideros de este gas (Ordoñez, 2008; CEFP, 2013).

La estimación precisa de la cantidad de CO<sub>2</sub> capturado por los bosques naturales y PFC mediante el entendimiento de su dinámica de crecimiento e incremento es esencial en la administración de los recursos forestales, por lo cual, es indispensable la construcción y aplicación de modelos matemáticos que ayuden a cuantificarlos.

#### **1.4. MODELACIÓN FORESTAL**

Un modelo “...es la representación abstracta de algún aspecto de la realidad. Su estructura está conformada por dos partes, la primera son todos aquellos aspectos que caracterizan la realidad modelizada, y la segunda no son más que las relaciones existentes entre los elementos antes mencionados...” (Regalado *et al.*, 2008). Los modelos matemáticos, por su propiedad de síntesis se pueden considerar herramientas fundamentales para la comprensión del funcionamiento de los sistemas biológicos en cualquiera de sus escalas (Polo, 2013).

En el sector forestal y en general en el área ecológica, la construcción y aplicación de modelos que simulan el crecimiento, las interacciones y el desarrollo de árboles individuales, bosques naturales o plantaciones forestales son cada vez más utilizados en el manejo forestal. Este tipo de modelos pueden describir, predecir o reconstruir la dinámica de crecimiento o rendimiento a lo largo del tiempo y las interacciones de factores internos y externos que afectan el desarrollo y la interacción ecológica entre individuos o poblaciones. Por lo anterior, los modelos forman parte de las herramientas técnicas esenciales para el manejo, conservación y recuperación de los recursos naturales.

#### **1.4.1. TIPOS DE MODELOS**

La modelación forestal requiere un conocimiento amplio del sistema que se pretende estudiar debido a la complejidad de las respuestas que se tienen. Particularmente, los modelos de crecimiento, pueden determinar la dinámica en el tiempo de alguna variable dendrométrica o dasométrica que se refiera al sistema del cual se pretende modelar (Dieguez-Aranda *et al.*, 2009). De manera general y de acuerdo con Dieguez-Aranda *et al.* (2009), los modelos se clasifican de la siguiente manera.

- *Modelos de rodal, clases dimensionales y árbol individual.*

Los modelos de rodal predicen mediante la simulación de la evolución, el crecimiento y el volumen del desarrollo de la masa forestal, mientras que los modelos dimensionales caracterizan y simulan la estructura de los rodales mediante la predicción del crecimiento y los modelos de árboles individuales son los más complejos por que tratan de describir el crecimiento individual de cada árbol con el fin de caracterizar con la suma de la respuesta de todos los individuos, el rodal.

- *Modelos estáticos y dinámicos.*

Los modelos estáticos no incluyen dentro de su estructura las tasas de crecimiento de los rodales o árboles medidos y son obtenidos de un único inventario con sitios temporales de muestreo. Son modelos de estructura matemática, lógica o estadística como las tablas de producción o los guías de densidad. Los modelos dinámicos incluyen en su estructura la tasa de crecimiento de las variables del rodal o árbol, por lo cual, los datos utilizados deberán provenir de parcelas permanentes o árboles con dos o más remediciones.

- *Modelos deterministas y estocásticos.*

Los modelos determinísticos siempre utilizan los mismos datos de entrada y los mismos algoritmos para obtener los mismos resultados, por ejemplo, la relación determinística de la altura-diámetro para estimar un valor en altura determinado para un diámetro definido. En los modelos estocásticos los resultados de las simulaciones siempre son diferentes por la inclusión de un factor aleatorio de alguna variable utilizada dentro del modelo. Esta variable de números aleatorios se introduce como el método de ruido, la cual trata de simular la influencia de los factores externos a las variables de crecimiento utilizadas.

- *Modelos empíricos, basados en procesos e híbridos.*

Los modelos empíricos estiman datos cuantitativos del rodal a partir del uso de una variable de fácil medición, sin tomar en consideración los procesos y mecanismos de crecimiento de la masa forestal. Entre las limitaciones se encuentran el rango de información utilizada y que son específicos a un lugar determinado. En el caso de los modelos basados en procesos son modelos más complejos que incluyen los procesos y mecanismos de crecimiento de la especie, así como la influencia de los factores externos en el desarrollo y evolución. Este tipo de modelos son de más amplia aplicación y con un aporte científico significativo basados en modelos empíricos. Los modelos híbridos incorporan los efectos del ambiente y suelo en la representación del crecimiento y rendimiento empírico predicho, haciendo este tipo de estimaciones de mayor realismo biológico.

El uso de modelos matemáticos en el sector forestal para la predicción del crecimiento y rendimiento de los bosques naturales y PFC ha tenido un repunte significativo en los últimos años en los programas de manejo.

## **1.5. AHUSAMIENTO Y VOLUMEN**

La estimación del volumen es esencial en la planeación del aprovechamiento forestal y base de las futuras actividades económica dentro del bosque o las PFC (Torres y Magaña, 2001; Tamarit, 2013).

La estimación del volumen de un árbol individual o de un rodal de manera precisa es el problema más relevante en la planeación de las actividades de extracción forestal. Sin embargo, la complejidad para obtener el volumen de manera exacta a través de métodos directos que son de forma destructiva mediante la cubicación de secciones hace que las expresiones matemáticas

sean una alternativa confiable en la estimación del volumen (Prodan, 1997; Torres y Magaña, 2001).

La aproximación se puede realizar mediante tarifas de volumen y tablas de cubicación expresadas matemáticamente (Prodan, 1997; Tschieder *et al.*, 2011). Dichas estimaciones se obtienen con variables de fácil medición como el diámetro normal ( $dn$ ) a la altura de 1.3 m, la altura total ( $h$ ), la altura del fuste limpio ( $hl$ ) y en ocasiones algunas expresiones de forma ( $f$ ) (Clutter *et al.*, 1983; Prodan, 1997).

Los modelos de volumen total y comercial como herramientas de planeación en el manejo silvícola son esenciales en la estimación de inventarios, existencias reales y tablas de producción (Pérez y Kanninen, 2003, citados por Honorato-Salazar, 2011). Otra forma de estimar estos volúmenes es la implementación de modelos de ahusamiento, los cuales consideran el factor de forma ( $ff$ ) del árbol, la reducción del diámetro con respecto a la altura (Clutter, 1980; Torres y Magaña, 2001) y la relación entre cierta altura y su diámetro.

Estas funciones nos permiten estimar el volumen del fuste a cualquier altura o diámetro deseado y obtener la distribución de productos de cada árbol o especie (Tapia y Navar, 2011). Sin embargo, al igual que con las ecuaciones de volumen, las funciones de ahusamiento son específicas para las condiciones con las que fueron creadas y para la especie a la cual se ajustó el modelo (Clutter, 1983; Torres y Magaña, 2001).

En años recientes, el ajuste simultáneo de funciones de volumen y ahusamiento ha tenido un uso significativo, debido a que al integrar una función de ahusamiento, la expresión resulta en un modelo de volumen total o comercial. Con este tipo de ajuste se elimina la discrepancia entre las funciones de volumen total, volumen comercial y ahusamiento ajustados de manera separada, haciendo posible una distribución de productos de manera porcentual con respecto al volumen de manera más precisa (Cruz, *et al.*, 2008), además son base para la estimación de biomasa, factor de expansión de biomasa y Carbono en las PFC.

## **1.6. BIOMASA Y CARBONO**

La biomasa se refiere al peso o masa del tejido de una planta viva (Walker *et al.*, 2011) que se generó a partir de procesos fotosintéticos (Nájera, 1999) y se clasifica en biomasa aérea y subterránea (Schlegel *et al.*, 2000; Walker *et al.*, 2011). La estimación más común es el cálculo

de biomasa seca, la cual es el peso del tejido de la planta después de quitar por completo el agua. Aproximadamente, el 50 % de la biomasa seca total es Carbono (Walker *et al.*, 2011).

La estimación de la biomasa y su dinámica de acumulación en el tiempo contribuyen al conocimiento de la evolución del ecosistema, los flujos de energía y nutrientes, permiten determinar el potencial de los sistemas forestales (Dieguez-Aranda *et al.*, 2009) y la cantidad de Carbono capturado por unidad de superficie (Schlegel *et al.*, 2000) ya sea en bosques naturales o PFC.

La biomasa total por árbol y su distribución por componente (hojas, ramas y tallo) es influenciada por los factores climáticos y edáficos, la competencia por luz dentro del rodal o plantación (densidad) y la carga genética por individuo (Villegas-Jiménez *et al.*, 2013). Dicha estimación es expresada en cantidad de materia orgánica (volumen en m<sup>3</sup>) existente en un ecosistema por unidad de superficie (Schlegel *et al.*, 2000; Dieguez-Aranda *et al.*, 2009; Walker *et al.*, 2011).

La modelación de la biomasa y Carbono de los rodales forestales se puede hacer mediante funciones lineales, alométricas, logarítmicas (Dieguez-Aranda *et al.*, 2009; Picar *et al.*, 2012) o exponenciales que incluyen variables independientes como el diámetro a la altura de 1.3 m y la altura total del árbol en la estimación confiable de estas variables dependientes (Velasco *et al.*, 2012) para poder tomarlas en cuenta en la planeación de las actividades de manejo forestal.

La estimación confiable del volumen, biomasa y Carbono por hectárea a través de expresiones matemáticas que toman de referencia mediciones simples de inventarios forestales hace posible estimar la proporción directa de la biomasa total aérea y la biomasa del fuste (Factor de expansión de biomasa – FEB) (Prodan *et al.*, 1997; Schroeder *et al.*, 1997; Rodríguez-Ortiz *et al.*, 2012), factor que varía de acuerdo a la especie, calidad de estación, edad, densidad y características genéticas de los individuos.

Las variables volumen, biomasa, FEB y cantidad de Carbono por hectárea estimados de manera precisa son una herramienta esencial en la planeación del manejo forestal que le permiten al administrador, identificar y considerar factores diversos de crecimiento y rendimiento simultáneamente en el tiempo y espacio para lograr un aprovechamiento sostenido a largo plazo de las PFC establecidas.

## 1.7. OBJETIVOS

### 1.7.1. General

Estimar el volumen comercial y la biomasa aérea de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake en plantaciones forestales comerciales en Huimanguillo, Tabasco, México.

### 1.7.2. Específicos

- i. Ajustar modelos para la estimación de volumen total, ahusamiento y volumen comercial para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.
- ii. Desarrollar modelos para estimar biomasa aérea total y por componente estructural empleando variables dasométricas provenientes del inventario forestal.
- iii. Determinar un factor de expansión de biomasa variable a nivel de árbol para su aplicación con datos del inventario forestal.

## 1.8. LITERATURA CITADA

- CEFP (Centro de Estudios de las Finanzas Públicas). 2013. Estrategia Nacional de Cambio Climático. IESCFP/025/2013. p. 4. <http://www.cefp.gob.mx/indicadores/gaceta/2013/iescefp0252013.pdf> (Consulta: Diciembre, 2015).
- Clutter, J. L. 1980. Development of taper functions from variable-top merchantable volume equations. *Forest Science* 26(1): 117-120.
- Clutter, J. L., J. C. Fortson, J. C. Piennar, L. V. Brister, and R. L. Bailey. 1983. *Timber Management: A Quantitative Approach*. Wiley. New York. 333 p.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2011. Situación Actual y Perspectivas de las Plantaciones Forestales Comerciales en México. <http://www.conafor.gob.mx:8080/biblioteca/descargar.aspx?articulo=434> (Consulta: Diciembre, 2015).
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2012. Logros y perspectivas del desarrollo forestal en México 2007-2012. [http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/LOGROS\\_Y\\_PERSPECTIVAS\\_DEL\\_DESARROLLO\\_FORESTAL\\_EN\\_MEXICO.PDF](http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/LOGROS_Y_PERSPECTIVAS_DEL_DESARROLLO_FORESTAL_EN_MEXICO.PDF) (Consulta: Diciembre, 2015).
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2013a. Bosques, cambio climático y REDD+ en México. Guía básica. Coordinación General de Producción y Productividad de la Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. p. 86.

- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2013b. Superficies de plantaciones forestales comerciales establecidas por año con apoyos de la CONAFOR. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/5/4806Resumen%20de%20Superficies%20establecidas%20por%20a%C3%B1o%20y%20entidad%20federativa.pdf> (Consulta: Diciembre, 2015).
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2014a. Bosques y cambio climático. <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/temas-forestales/cambio-climatico-y-bosques-nv> (Consulta: Diciembre, 2015).
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2014b. Plantaciones forestales. <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/temas-forestales/plantaciones> (Consulta: Diciembre, 2015).
- CONAFOR-SEMARNAT (Comisión Nacional Forestal-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2001. Programa Estratégico Forestal para México 2025. INFORME FINAL Versión 2.1 del 18 de agosto de 2001. [http://era-mx.org/biblio/PEF\\_2025.pdf](http://era-mx.org/biblio/PEF_2025.pdf) (Consulta: Diciembre, 2015).
- Cruz-Cobos, F., H. M. De los Santos-Posadas y J. R. Valdez-Lazalde, 2008. Sistema compatible de ahusamiento volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango México. *Agrociencia* 42: 473-485.
- Diéguez-Aranda, U., Rojo, A. A., Castedo-Dorado, F., Álvarez, G. J. G., Barrio-Anta, F. M., Crecente-Campo, J., González, M., Pérez-Cruzado, G. C., Rodríguez, S. R., López-Sánchez, C. A., Balboa-Murias, M. A., Gorgoso V. J. J. y Sánchez, R. F. 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal en Galicia. Dirección Xeral de Montes. Galicia, España. p. 259.
- Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. 2014. 2do Informe de Gobierno 2013-2014. Anexo Estadístico. Ciudad de México.
- Honorato-Salazar, J. A. 2011. Modelos volumétricos fustales para *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn. en plantaciones agroforestales de la sierra norte de Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2 (6): 55-71.
- INECC. 2010. Potencial de mitigación de gases de efecto invernadero en México al 2020 en el contexto de la cooperación internacional.: <http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/> (Consulta: Diciembre, 2015).
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC WG1 AR4 Final Report.* 996 p.



- Nájera, L. J. A. 1999. Ecuaciones para estimar biomasa, volumen y crecimiento en biomasa y captura de carbono en diez especies típicas de matorral espinoso tamaulipeco del nordeste de México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares Nuevo León, México. 93 p.
- Ordoñez, D., J. A. B. 2008. Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. *Ciencias* 90 (2): 37-42.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2011. Informe de la Conferencia de las Partes sobre su 16º período de sesiones, celebrado en Cancún del 29 de noviembre al 10 de diciembre de 2010. Segunda parte: Medidas adoptadas por la Conferencia de las Partes en su 16º período de sesiones. Cancún, México. 33 p.
- Picard, N., Henry, M., Mortier, F., Trotta, C. and Saint-André, L. 2012. Using Bayesian model averaging to predict tree aboveground biomass. *Forest Science* 58(1): 15–23.
- Polo, V. 2013. Modelos matemáticos en ecología: aplicación al dilema halcón vs. Paloma. *Asociación Ecosistemas: Revista científica de ecología y medio ambiente* 22(3): 6-11.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F. y Real, P. 1997. *Mensura forestal, Serie investigación y educación en desarrollo sostenible*. San José, Costa Rica: IICA.
- Regalado, M., A, E. Peralta R. y C. A. González R. 2008. Cómo hacer un modelo matemático. *Temas de Ciencia y Tecnología* 12(35): 1-18.
- Rodríguez-Ortiz, G., H. M. De Los Santos-Posadas, V. A. González-Hernández, A. Aldrete, A. Gómez-Guerrero y A. M. Fierros-González. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques* 18(1): 25-41.
- Sánchez, R., R. 2013. Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina. ONU-Comisión Económica para América y el Caribe (CEPAL). Santiago de Chile, Chile. 157 p.
- Schlegel, B., J. Gayoso y J. Guerra. 2000. Manual de procedimientos - Muestreos de biomasa forestal. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción de mercado mundial. Proyecto FONDEF D98I1076. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 24 p.
- Schroeder, P. S., Brown, J. M. Birdsey, R. and Cieszewski, C. 1997. Biomass estimation for temperate broadleaf forest of the United States using inventory data. *Science* 43(3): 424-43.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2013. Anuario estadístico de la producción forestal 2012. Primera edición 2013.

[http://web2.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/forestalsuelos/Anuarios/ANUARIO\\_2012.pdf](http://web2.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/forestalsuelos/Anuarios/ANUARIO_2012.pdf) (Consulta: Diciembre, 2015).

- Tamarit, U., J C. 2013. Cubicación, crecimiento y rendimiento maderable e inventario operativo para *Tectona grandis* en el sureste de México. Tesis de Doctorado. COLPOS. Montecillo, Estado de México. 98 p.
- Tapia, J. y J. J. Nívar Ch. 2011. Ajuste de modelos de volumen y funciones de ahusamiento para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en bosques de pino de la Sierra Madre Oriental de Nuevo León, México. Foresta Veracruzana 13(2): 19-28.
- Torres, R, J. M. y O. S. Magaña T. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Editorial Limusa. México, D. F. 472 p.
- Tschieder, F. E., E. Fassola H. E. y M. García C. 2011. Ecuaciones de volumen total para *Populus deltoides* de plantaciones del Bajo Delta del Paraná. R.I.A. 37(2); 172-179.
- Velasco, B. E., E. Romero S., A. González H., F. Moreno S. y R. Pérez M. 2012. Funciones de biomasa y carbono aéreo aplicables a árboles de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en México. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 34: 315-319.
- Villegas-Jiménez, D., G. Rodríguez-Ortíz, V. A. Velasco-Velasco, J. Ruíz-Luna, C. Carrillo-Rodríguez y S. E. Ramírez-Sánchez. 2013. Partición de biomasa aérea en procedencias de *Pinus greggii* plantadas en el sur de México. Revista Fitotecnia Mexicana 36 (4): 421-427.
- Walker, W., A. Baccini, M. Nepstand, N. Horning, D. Knight, E. Braun y A. Bausch. 2011. Guía de campo para la estimación de biomasa y carbono forestal. Versión 1.0. Woods Hole Research Center, Falmouth, Massachusetts, USA. 55 p.

## CAPÍTULO II

### 2. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN COMERCIAL EN PLANTACIONES DE *Eucalyptus urophylla* CON MODELOS DE VOLUMEN TOTAL Y DE RAZÓN

#### 2.1. RESUMEN

Para el manejo técnico y aprovechamiento de plantaciones forestales comerciales (PFC), es fundamental el conocimiento de relaciones funcionales entre el diámetro normal ( $dn$ ) y la altura ( $A$ ) con el volumen total ( $Vt$ ) de un árbol, además de la proporción de distintas alturas ( $Ac$ ) o diámetros ( $dm$ ) a lo largo del fuste con el volumen comercial ( $Vc$ ). Con la hipótesis de que con tales relaciones expresadas matemáticamente es posible realizar estimaciones precisas de  $Vt$  y  $Vc$ , el objetivo fue proponer una herramienta para cuantificar el  $Vt$  y  $Vc$  en PFC de *Eucalyptus urophylla* procedentes de semilla y clones a través de funciones de razón volumétrica ( $r$ ). Con la información dasométrica de 175 árboles de clones medidos en 2007 (P1), 93 en 2014 (P2) y 459 provenientes de semilla y medidos en 2007 (P3), se evaluaron seis modelos de  $Vt$ , ajustados y corregidos por heterocedasticidad ponderando la varianza y diez de razón corrigiendo la autocorrelación con una estructura autoregresiva. El modelo de Schumacher-Hall con inclusión de variables dicotómicas demostró que las poblaciones son diferentes estadísticamente. Los mejores modelos para estimar  $Vt$  fueron el de Schumacher-Hall para P1 y P3 y el de Spurr para P2; en los modelos de  $r$  que consideran el diámetro a distintas alturas, el modelo de Burkhart es el mejor para P1 y P2, y Cao para P3; en los que toman en cuenta la altura en el fuste, el modelo de Zepeda es el adecuado para las tres poblaciones. Con estos modelos de  $Vt$  y  $r$ , por población, se determinó el  $Vc$  a cualquier  $dm$  o  $Ac$  establecido, mismos que explicaron más de 94 % de la variabilidad. El Índice de Esbeltez fue 114, 122 y 118  $\text{cm cm}^{-1}$  y el Factor de Forma fue 0.45, 0.34 y 0.34 para P1, P2 y P3.

**Palabras clave:** Perfil fustal, ahusamiento, plantaciones forestales, distribución de productos, *Eucalyptus urophylla*.

## MERCHANTABLE VOLUME ESTIMATION FOR *Eucalyptus urophylla* BASED ON TOTAL AND RATIO VOLUMEN MODELS

### 2.2. ABSTRACT

The management and harvest of commercial forest plantations (PFC) requires the fundamental understanding of functional relationships between normal diameter ( $dn$ ) and height ( $A$ ) with the tree total volume ( $Vt$ ) as well as the proportion of different stem heights ( $Ac$ ) or diameters ( $dm$ ) along the bole with the commercial volume ( $Vc$ ). The hypothesis is that these relationships can be expressed mathematically to possible estimate  $Vt$  and  $Vc$ . The aim was to propose a mathematical tool to quantify the  $Vt$  and  $Vc$  on *Eucalyptus urophylla* coming from seed and clones in PFC established. Data came from three populations: 175 clonal trees measured in 2007 (P1), 93 clonal trees measured in 2014 (P2), and 459 trees from seed measured in 2007 (P3). Six models for  $Vt$  were evaluated, fitted and corrected by heteroskedasticity. Ten merchantable ratio models ( $r$ ) were fitted with an autoregressive error structure. The Schumacher-Hall model with dichotomous variables for each populations showed that all three populations are statistically different in terms of the diameter and height relationship to total volume. The ratio merchantable volume the Burkhart model is best for P1 and P2, and Cao to P3; for those models that take into account the relative height in the bole, Zepeda model was appropriate for the three populations. The slenderness ratio was 114, 122 and 118  $cm\ cm^{-1}$  and shape factor was 0.45, 0.34 and 0.34 for P1, P2 and P3.

**Key words:** bole profile, taper, forest plantations, product distribution, *Eucalyptus urophylla*.

### 2.3. INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales comerciales (PFC) son una opción para disminuir la sobreexplotación de los bosques naturales de México; su establecimiento en décadas recientes ha incrementado significativamente (CONAFOR, 2014) y han abastecido de productos maderables a la industria (Rodríguez-Juárez *et al.*, 2014). El género *Eucalyptus* es uno de los más utilizados como fuente de germoplasma en PFC (Juárez-Palacios *et al.*, 2013; CONAFOR, 2014), ya que ocupa el segundo lugar nacional por la superficie de 32,452 ha (18.31%), mientras que fueron establecidas entre 2000 y 2014 (CONAFOR, 2015).

La especie *Eucalyptus urophylla* es la más utilizada en los climas tropicales (CONAFOR, 2012) y es plantada ampliamente a nivel mundial por su rápido crecimiento (Rosa *et al.* 2011), su amplio intervalo altitudinal (0 a 1,200 msnm) y requerimientos edáficos mínimos para su establecimiento (Nieto y Rodríguez, 2003); además, se adapta a precipitaciones medias, entre 2,000 y 3,000 mm anuales y a temperaturas promedio entre 24 y 28 °C (Vieira y Bucsán, 1980).

El volumen maderable de las plantaciones se considera como un indicador del potencial productivo de una plantación (Moret *et al.*, 1998) y puede ser dividido en volumen total ( $V_t$ ) y volumen comercial ( $V_c$ ) (Chauchard y Sbrancia, 2005). De acuerdo con Prodan *et al.* (1997), a nivel árbol existen tres metodologías para la estimación del  $V_c$ : i) implementar funciones de  $V_t$  con la restricción de un diámetro o altura límite, en las cuales se omite en la predicción la porción del árbol restante (Gilabert and Paci, 2010). Un ejemplo de ello son las ecuaciones de volumen del fuste limpio ( $V_{tfl}$ ); ii) ajustar funciones que describan el perfil del árbol y posteriormente estimar el  $V_c$  a un diámetro definido o una altura dada (Chauchard y Sbrancia, 2005), para ello se utiliza como base una función de ahusamiento  $y$ ; iii) implementar la razón proporcional entre un volumen predeterminado y el  $V_t$  para distintas clases de árboles (Pece, 1994) a través de funciones de razón volumétrica ( $frv$ ).

El concepto de  $frv$  fue introducido por Honner (1967) y desarrollado por Burkhart (1977), complementado con algunas variantes por Alder (1980), Cao *et al.* (1980), Van Deusen *et al.* (1981) y Parresol *et al.* (1987); su eficiencia fue discutida por Prodan *et al.* (1997) y Gilabert and Paci (2010). Estas funciones porcentuales son un sistema de ecuaciones integrado por una ecuación de  $V_t$  y una ecuación de razón de volumen ( $r$ ), que operan en conjunto para estimar el volumen de productos por árbol ( $V_c$ ) (Chauchard y Sbrancia, 2005; Gilabert and Paci, 2010);  $r$  corresponde al cociente del volumen hasta un índice de utilización o diámetro de punta no

comercial ( $V_i$ ) y el  $V_t$  del fuste ( $V_i/V_t$ ) (Trincado *et al.*, 1997; Barrio *et al.*, 2007; Barrio *et al.*, 2014).

Los modelos que integran un  $frv$  son conceptual y matemáticamente simples, generan resultados consistentes, pueden ser utilizados en la estimación del  $V_c$  en diferentes rangos de diámetro y altura sin implementar métodos numéricos complejos de integración y permiten acoplarse a cualquier tipo de función de  $V_t$  (Chauchard y Sbrancia, 2005). Además, a partir de variables independientes, con una función de razón ( $r$ ) se puede estimar el diámetro mínimo de punta ( $dm$ ) o altura comercial ( $Ac$ ) por tipo de producto (Chauchard y Sbrancia, 2005).

La demanda creciente de productos maderables de alta calidad y los cambiantes estándares de la industria del aserrío, han provocado el remplazo del concepto de volumen total ( $V_t$ ) de madera, como indicador del rendimiento de las PFC, por el volumen de productos ( $V_p$ ) o volumen comercial ( $V_c$ ), conceptos importantes en la planificación, manejo y valoración de este tipo de masas forestales. Por ello y bajo la hipótesis de que a través de la representación matemática de las relaciones funcionales entre las variables de un árbol es posible realizar estimaciones precisas de  $V_t$  y  $V_c$ . El objetivo de este trabajo fue ajustar un sistema conformado por un modelo de volumen total y un modelo de razón de volumen para cuantificar los volúmenes totales y comerciales en plantaciones comerciales provenientes de semilla y de dos fuentes clonales de *E. urophylla* en el sureste mexicano.

## **2.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.4.1. Área de estudio**

Las PFC de *E. urophylla* evaluadas se ubican en el municipio de Huimanguillo, Tabasco, México, donde el clima es cálido húmedo (Am), temperatura media anual de 26 °C y una precipitación de 2,500 mm. Los suelos son Feozem con un relieve de tipo lomerío (INEGI, 2005).

### **2.4.2. Descripción de la muestra y estimación del volumen total**

La muestra medida y analizada provino de 727 árboles de *E. urophylla*, de estos, 175 pertenecen a los clones medidos en 2007 (P1), 93 a clones medidos en 2014 (P2) y 459 a los árboles provenientes de semilla medidos en 2007 (P3). La edad de los clones analizados fluctuó de uno a siete años, mientras que los provenientes de semilla variaron de dos a 11 años.

Los árboles muestra se eligieron considerando su condición morfológica, tratando de cubrir la mayor variabilidad fenotípica posible dentro de las plantaciones. A todos los árboles se les midió el diámetro normal ( $dn$ ) y altura total ( $A$ ); posteriormente fueron derribados y troceados para medir su diámetro y altura a diferentes secciones ( $dm_i$  y  $Ac_i$ ) sobre el fuste a un metro de distancia entre mediciones, iniciando con el diámetro y altura del tocón ( $dt$  y  $ht$ , respectivamente). Para obtener el volumen de cada troza ( $V_{troza}$ ) se utilizó la fórmula de Newton y del cono para la punta ( $V_{punta}$ ). En el caso del volumen total ( $V_t$ ), se calculó con el método de trozas traslapadas propuesto por Bailey (1995).

### 2.4.3. Comparación de árboles entre poblaciones

Con la finalidad de determinar si existen diferencias entre las poblaciones de clones (P1 y P2) con respecto a los árboles provenientes de semilla (P3), se realizó un análisis contrastando P1 vs P2, P1 vs P3 y P2 vs P3 y se probaron las siguientes hipótesis sobre las variables  $dn$  y  $A$ .

- *Hipótesis nula ( $H_0$ )*. Las poblaciones son iguales entre sí.
- *Hipótesis alternativa ( $H_a$ )*. Las poblaciones son diferentes entre sí.

Para verificar si árboles de las tres poblaciones presentan diferencias en  $V_t$  y bajo el supuesto que dos árboles pueden tener el mismo volumen sin presentar forzosamente las mismas dimensiones de  $dn$  y  $A$ , se ajustó el  $V_t$  de los dos tipos de clones y las plantaciones de semilla. Además, para cuantificar el efecto de cada tipo de árbol se insertó una variable indicadora en el modelo de volumen de Schumacher-Hall (Draper and Smith, 1996) (Modelo 1). Los análisis se llevaron a cabo en el paquete SAS 9.2. (Institute Inc. Statistical Analysis System, 2008).

En el modelo de volumen de Schumacher-Hall (1) se introdujeron las variables indicadoras ( $W_n$ ) de acuerdo al contraste realizado para cada población.

$$W_1 = \begin{cases} P1=0 \\ P2=1 \end{cases} \quad W_2 = \begin{cases} P1=1 \\ P2=3 \end{cases} \quad W_3 = \begin{cases} P2=0 \\ P3=1 \end{cases}$$

El modelo se expresa de la forma siguiente;  $V_t = (a_0 + a_{0c}W_n)(dn^{a_1+a_{1c}(W_n)})A^{a_2}$  (1)

Donde,  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$  son los parámetros de regresión a ser estimados, mientras que  $a_{0c}$  y  $a_{1c}$  son los parámetros de adición para las distintas poblaciones.

#### 2.4.4. Estimación del Índice de Esbeltez y Factor de Forma

El cálculo del Índice de Esbeltez (*IE*) se realizó para verificar el grado de estabilidad mecánica de los árboles contra la presencia de vientos o huracanes y se obtiene al dividir el promedio de la *A* entre el promedio del *dn*, tal como lo han reportado Arias (2004 y 2005) y Nájera y Hernández (2008). Para verificar si estos son estadísticamente diferentes entre sí, se realizó un análisis de varianza de un factor (ANOVA) para el *IE* por árbol entre las poblaciones a un nivel de  $p = 0.05$ .

El factor de forma (*ff*) se estimó mediante el cálculo de la pendiente (*p*) del volumen fustal con la variable combinada ( $dn^2A$ ), posteriormente, la estimación del factor con respecto a un cilindro teórico se realizó con la fórmula siguiente;  $ff = \frac{p \times 4}{\pi}$  (2)

#### 2.4.5. Modelos de volumen fustal

Los modelos de volumen total ajustados son reportados en la literatura internacional (Da Cunha y Guimaraes, 2009; Corral-Rivas y Nívar-Cháidez, 2009; Tschieder *et al.*, 2011; Casnati *et al.*, 2014) como de tipo estándar o de doble entrada (Prodan *et al.*, 1997), solo presentando diferencia entre ellos en la forma y el número de parámetros a ser estimados (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Modelos utilizados para estimar  $V_t$  de árboles en PFC de *E. urophylla*.

No.	Modelo	Expresión
(3)	Schumacher – Hall	$V_t = b_0 dn^{b_1} A^{b_2}$
(4)	Thornber	$V_t = b_0 (A/dn)^{b_1} dn^2 A$
(5)	Spurr	$V_t = b_0 (dn^2 A)^{b_1}$
(6)	Meyer	$V_t = b_0 dn^{b_1} (dn^2 A)^{b_2}$
(7)	Honner	$V_t = \frac{dn^2}{b_0 + b_1 \frac{1}{A}}$
(8)	Coefficiente mórfico constante	$V_t = b_0 dn^2 A$

La selección del mejor modelo se basó en el mayor valor del Coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros ( $R^2_{aj.}$ ) y los menores valores en la Suma de Cuadrados del Error (*SCE*) y la Raíz del Cuadrado Medio del Error (*RCME*), así como la mejor distribución gráfica de residuales. El modelo que cumpliera con lo antes descrito y para evitar que aumente



la varianza a mayor diámetro (heterocedasticidad), se utilizó una regresión ponderada (Caillez, 1980; Tschieder *et al.*, 2011) en la que se utilizaron las variables de ponderación:  $1/dn$ ,  $1/dn^2$ ,  $1/dnA$  y  $1/d^2A$ . Las estimaciones de volumen fustal para las tres poblaciones se hicieron con los modelos corregidos respectivamente.

#### **2.4.6. Modelos de razón volumétrica**

La razón volumétrica ( $r$ ) se calculó como el cociente del  $V_t$  entre el volumen a distintas alturas y diámetros ( $V_i/V_t$ ). Para ello, se han utilizado modelos de razón de volumen que usan al  $dn$ ,  $dm$ ,  $A$  y  $Ac$  como variables independientes y que han sido utilizados con éxito en otros estudios semejantes (Pece, 1994; Chauchard y Sbrancia, 2005; Barrio *et al.*, 2007; Gilabert and Paci, 2010; Barrio *et al.*, 2014) (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2. Modelos de razón de volumen utilizados en PFC de *E. urophylla*.

No.	Modelo	Expresión
(9)	Van Deusen <i>et al.</i> (1981)	$R_d = \exp(b_0(\frac{dm}{dn})^{b_1})$
(10)	Van Deusen <i>et al.</i> (1981) modificado	$R_d = \exp(b_0((\frac{dm}{dn})A)^{b_1})$
(11)	Burkhart (1977)	$R_d = 1 + b_0(\frac{dm^{b_1}}{dn^{b_2}})$
(12)	Burkhart (1977) modificado	$R_d = b_0 + d_1(\frac{dm^{b_1}}{dn^{b_2}})$
(13)	Burkhart (1977) modificado	$R_d = 1 + b_0(dm^{b_1}dn^{b_2})$
(14)	Parresol <i>et al.</i> (1987)	$R_d = \exp(b_0(\frac{dm^{b_1}}{dn^{b_2}}))$
(15)	Cao <i>et al.</i> (1980)	$R_d = 1 + b_0(\frac{dm}{dn}) + b_1(\frac{dm}{dn})^2 + b_2(\frac{dm}{dn})^3 + b_3(\frac{dm}{dn})^4 + b_4(\frac{dm}{dn})^5 + b_5(\frac{dm}{dn})^6$
(16)	Cao <i>et al.</i> (1980)	$R_h = 1 + b_0(A - Ac)$
(17)	Cao <i>et al.</i> (1980)	$R_h = 1 + b_0(A - Ac)^{b_1} A^{b_2}$
(18)	Honner (1967)	$R_d = b_0 + b_1(\frac{dm}{dn}) + b_3(\frac{dm}{dn})^2$
(19)	Honner (1967) modificado	$R_d = b_0 + b_1(\frac{dm}{dn})^2 + b_3(\frac{dm}{dn})^4$
(20)	Mattney y Sullivan (1982)	$R_d = b_0 + b_1(\frac{dm}{dn}) + b_2(\frac{dm}{dn})^2 A$
(21)	Zepeda, Estrada y Esparza (1990) citado por Prodan <i>et al.</i> , 1997.	$R_h = b_0(\frac{Ac}{A}) + b_1(\frac{Ac}{A})^2$

$R_d$ : Razón de volumen que utiliza como variables independientes el diámetro normal ( $dn$ ) y diámetro a distintas alturas ( $dm$ ).  $R_h$ : Razón que incluye en el modelo la altura total ( $A$ ) y la altura a diferentes partes en el fuste ( $Ac$ ); y  $b$ 's, son los parámetros a estimar.

En el ajuste de este tipo de modelos se utilizaron 1,958, 2,113 y 6,060 pares de datos de  $dm$  y  $Ac$ , de las poblaciones P1, P2 y P3, respectivamente. Como primera fase, los modelos de razón de volumen se ajustaron sin incluir el término del error con el propósito de verificar las

tendencias de los residuales y el valor del estadístico de autocorrelación de Durbin-Watson ( $DW$ ), tal como lo indica Barrios *et al.* (2014).

Para ajustar este tipo de modelos se calcula el volumen a diferentes alturas y diámetros, para así obtener una razón volumétrica, por lo que es inevitable la estructura longitudinal de la información utilizada donde las diferentes medidas a lo largo del fuste están estrechamente correlacionadas por ser del mismo individuo. Debido a ello, se utilizó un modelo de tipo autoregresivo en tiempo continuo (CAR) para corregir la estructura de los errores (Zimmerman and Nuñez-Antón, 2001), la expresión del modelo es;

$$Y_{ij} = f(X_{ij}, B) + e_{ij} \quad (22) \text{ y } e_{ij} = \sum_{k=1}^{k=X} I_k p_k^{h_{ij}-h_{ij-k}} e_{ij-k} + \varepsilon_{ij} \quad (23)$$

Donde,  $Y_{ij}$  es el vector de la variable dependiente;  $X_{ij}$  la matriz de las variables independientes;  $B$  es el vector de los parámetros a estimar;  $e_{ij}$  es el  $j$ -ésimo residuo del árbol  $i$ ;  $I_k = 1$  para  $j > k$  y es 0 para  $j \leq k$ ;  $p_k$  es el parámetro autoregresivo de orden  $k$  a estimar;  $h_{ij}-h_{ij-k}$  es la distancia que separa la altura de medición  $j$ -ésima de la altura de medición  $j$ -ésimo- $k$  en cada árbol ( $h_{ij} > h_{ij-k}$ ) y;  $\varepsilon_{ij}$  es el error aleatorio (Barrio *et al.*, 2014). El número de retardos aplicados en el modelo CAR( $X$ ) se establecerá al evaluar el estadístico  $DW$ , que tendrá que ser cercano a 2 como lo menciona Verbeek (2004).

#### 2.4.7. Ajuste de modelos y criterios de evaluación

El ajuste estadístico de los modelos de  $Vt$  y de  $r$ , se realizó con el procedimiento MODEL en SAS 9.2 y la técnica de máxima verosimilitud (FIML) (Institute Inc. Statistical Analysis System, 2008).

La evaluación y selección del mejor modelo se realizó utilizando el mayor valor de  $R^2_{aj}$  y los menores valores en la  $SCE$  y  $RCME$ . Además de las pruebas de independencia ( $DW$ ) y normalidad de la frecuencia de los residuos (Da Cunha y Guimaraes, 2009). La homogeneidad de varianza se evaluó de forma gráfica (Tschieder *et al.*, 2011).

#### **2.4.8. Determinación de volumen comercial ( $V_c$ )**

Para la estimación del volumen comercial a cualquier índice de utilización (diámetro o altura comercial establecida), se conformó un sistema de cubicación compuesto por el mejor modelo de  $V_t$  y  $r$ , para cada una de las poblaciones. Con el  $V_t$  del árbol y aplicando el modelo de razón volumétrica, se tiene que el volumen comercial es el producto de la multiplicación de los resultados de las dos ecuaciones (Chauchard y Sbrancia, 2005). La evaluación de la precisión de las estimaciones se realizó con un gráfico de tendencia lineal de predichos contra los valores observados, como lo sugiere Pece (1994).

### **2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **2.5.1. Comparación de $V_t$ , $dn$ y $A$ de árboles entre poblaciones**

El ajuste del modelo Schumacher-Hall fue aceptable (Cuadro 2.3) y los valores de los parámetros en la variable indicadora  $W_n$  son significativas ( $p \leq 0.05$ ) por lo cual, se ratifica que las tres poblaciones son diferentes en sus variables  $dn$  y  $A$ , además del  $V_t$  entre sí, con velocidades de crecimiento distintas. Esta diferencia entre los clones de 2007 y 2014, se debe a que la selección para reproducir estos últimos, se realizó en base en las mayores dimensiones de  $dn$  y  $A$ , sin tomar en cuenta el  $V_t$  o el factor de forma.

Cuadro 2.3. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste del modelo de *Vt* de Schumacher-Hall con variables indicadoras en las tres poblaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Comparación	<i>SCE</i>	<i>RCME</i>	$R^2_{aj.}$	Parámetros	Estimación	<i>Eea</i>	Valor t	P < t
W1 P1 vs P2	0.138	0.023	0.982	$a_0$	0.1020	$2.6 \times 10^{-2}$	3.85	0.0001
				$a_{0c}$	-0.0620	$1.7 \times 10^{-2}$	-3.59	0.0004
				$a_1$	1.8130	$6.3 \times 10^{-2}$	28.92	<.0001
				$a_{1c}$	-0.5190	$5.9 \times 10^{-2}$	-8.77	<.0001
				$a_2$	1.3070	$6.0 \times 10^{-2}$	21.69	<.0001
W2 P1 vs P3	0.944	0.042	0.968	$a_0$	0.1406	$2.17 \times 10^{-2}$	6.48	<.0001
				$a_{0c}$	-0.0543	$9.9 \times 10^{-3}$	-5.48	<.0001
				$a_1$	1.7011	$2.55 \times 10^{-2}$	66.61	<.0001
				$a_{1c}$	-0.2904	$5.63 \times 10^{-2}$	-5.16	<.0001
				$a_2$	1.1253	$4.0 \times 10^{-2}$	28.13	<.0001
W3 P2 vs P3	0.868	0.037	0.972	$a_0$	0.1716	$2.43 \times 10^{-2}$	7.07	<.0001
				$a_{0c}$	0.0911	$4.05 \times 10^{-2}$	2.25	0.025
				$a_1$	1.7212	$2.31 \times 10^{-2}$	74.53	<.0001
				$a_{1c}$	0.2298	$8.45 \times 10^{-2}$	2.72	0.0067
				$a_2$	1.0720	$3.67 \times 10^{-2}$	29.24	<.0001

*SCE*: Suma de Cuadrados del Error. *RCME*: Raíz del Cuadrado Medio del Error.  $R^2_{aj.}$ : Coeficiente de determinación ajustado. *Eea*: Error estándar aproximado.  $a_n$ : Parámetros a estimar.

### 2.5.2. Estimación del índice de esbeltez, factor de forma y volumen total

Una vez identificado que las tres poblaciones se deben analizar de forma separada, se realizó el cálculo del *IE*. Los valores encontrados fueron 114, 122 y 118 cm/cm para las poblaciones P1, P2 y P3, respectivamente, situación que sugiere que los clones medidos en 2007 fueron seleccionados más por su crecimiento en diámetro que a su crecimiento en altura. En la prueba de ANOVA para el *IE* se observa que las medias de esbeltez entre las poblaciones son estadísticamente diferentes (P1 = 122.571, P2 = 112.168 y P3 = 93.804), debido a que el valor de probabilidad de error es muy bajo ( $Pr > F = < 0.0001$ ).

Estos índices son semejantes a los reportados para especies tropicales de rápido crecimiento como en *E. nitens* donde se obtuvo un *IE* de 124 (Díaz *et al.*, 2012) y en *Hieronyma alchorneoides* y *Terminalia amazonia* con *IE* iguales a 111 y 106, respectivamente (Arias,

2005). No obstante, debido a que el  $IE$  es superior a la relación de crecimiento 1:1 entre el  $dn$  y  $A$  sugiere que los árboles son más delgados y se deberá tener cuidado al aplicar intensidades de aclareo fuertes (Arias, 2005; Díaz *et al.* 2012), debido a la susceptibilidad de que se produzcan daños mecánicos por efecto de los vientos en las PFC (Wilson and Oliver, 2000).

Con respecto al  $ff$ , se obtuvo que la forma de las poblaciones P2 y P3 son iguales, de tipo cónico con un valor de 0.34, mientras la población P1 es diferente, con el valor en el  $ff = 0.45$ , lo que indica mayor semejanza a una forma paraboloides en los árboles.

Por los estadísticos de ajuste de los mejores modelos de  $Vt$ , determinados por los mayores valores en  $R^2_{aj}$ , los menores valores en la  $SCE$ ,  $RCME$  y la significancia del valor de los parámetros ( $P < t$ ), se tiene que para P1 y P3 el modelo de mejor ajuste a los datos es el de Schumacher-Hall, y para P2 fue el modelo de Spurr (Cuadro 2.4).

Cuadro 2.4. Parámetros estimados y estadísticos de ajuste de los modelos de  $Vt$  para las tres poblaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Población	No.	$SCE$	$RCME$	$R^2_{aj}$	Parámetros	Estimación	$Eea$	Valor t	$P < t$
P1	(3)	0.024	0.012	0.985	$b_0$	0.5480	0.122	4.50	<.0001
					$b_1$	2.0603	0.042	49.59	<.0001
					$b_2$	0.8911	0.054	16.67	<.0001
P2	(5)	0.151	0.041	0.967	$b_0$	0.3305	0.007	45.71	<.0001
					$b_1$	0.8258	0.022	37.33	<.0001
P3	(3)	0.807	0.042	0.968	$b_0$	0.1759	0.014	12.31	<.0001
					$b_1$	1.7246	0.011	154.61	<.0001
					$b_2$	1.0662	0.023	46.01	<.0001

$SCE$ : Suma de Cuadrados del Error.  $RCME$ : Raíz del Cuadrado Medio del Error.  $R^2_{aj}$ : Coeficiente de determinación ajustado.  $Eea$ : Error estándar aproximado.  $b_n$ : Parámetros estimados.

En los tres ajustes, todos los parámetros obtenidos fueron significativos a un nivel de confiabilidad del 95 %, la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk presentó valores superiores de  $W = 0.92$  y un nivel de  $Pr < W = 0.0001$ , mientras que las gráficas de residuales presentaron tendencia hacia una línea recta y con forma de campana de Gauss, situación que indica normalidad de los datos. Sin embargo, en la prueba de homogeneidad de residuales se observaron tendencias muy marcadas, por lo que se asumen problemas de heterocedasticidad y al corregirla, la variable de ponderación que mejor resultados arrojó fue  $1/dn^2A$ , es con la cual,

se logra una distribución deseable en la gráfica de frecuencia de residuales. La estimación de los parámetros y los indicadores de ajuste de las ecuaciones de volumen fustal para las poblaciones P1, P2 y P3 se muestran en el Cuadro 2.5, mientras que la corrección gráfica se observa en la Figura 2.1.

Cuadro 2.5. Parámetros estimados y estadísticos de ajuste de los modelos de Schumacher-Hall (P1 y P3) y Spurr (P2) corregidos por heterocedasticidad para las tres poblaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Modelo	Población	SCE	RCME	$R^2_{aj}$	Parámetros	Estimación	Eea	Valor de t	$P < t$
(3)	P1	0.001	0.985	0.985	$b_0$	0.5466	0.085	6.44	<.0001
					$b_1$	2.0143	0.032	62.67	<.0001
					$b_2$	0.8639	0.037	23.50	<.0001
(5)	P2	0.097	0.033	0.978	$b_0$	0.3261	0.004	81.13	<.0001
					$b_1$	0.8682	0.014	63.13	<.0001
(3)	P3	0.609	0.037	0.981	$b_0$	0.1744	0.025	7.09	<.0001
					$b_1$	1.7161	0.021	80.34	<.0001
					$b_2$	1.0647	0.037	28.91	<.0001

SCE: Suma de Cuadrados del Error. RCME: Raíz del Cuadrado Medio del Error.  $R^2_{aj}$ : Coeficiente de determinación ajustado. Eea: Error estándar aproximado.  $b_n$ : Parámetros estimados.

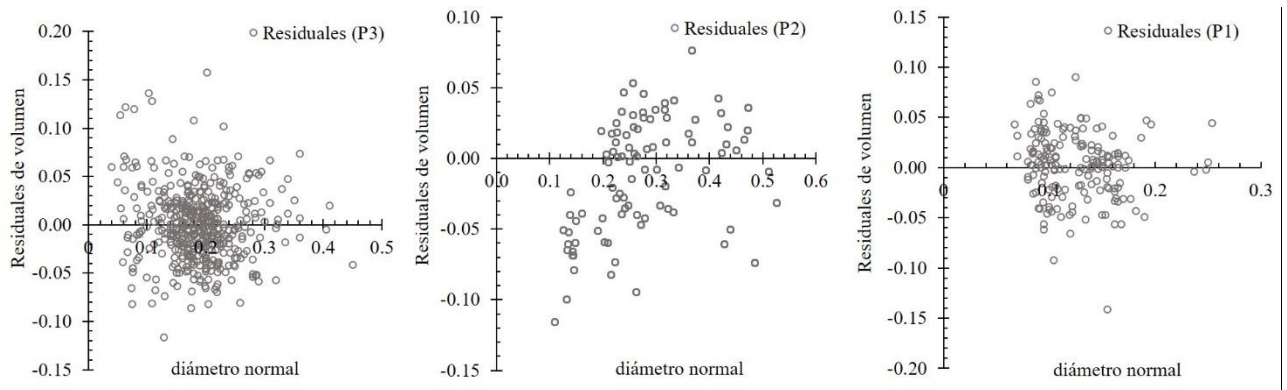


Figura 2.1. Distribución de residuales de  $Vt$  con respecto al diámetro normal ( $dn$ ) de los modelos de mejor ajuste corregidos por heterocedasticidad para las plantaciones P1, P2 y P3 de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

En las estimaciones realizadas con los modelos corregidos, así como sus proyecciones tomando en consideración el  $IE$  promedio en el cálculo de la altura para cada una de las poblaciones, se puede ver que la selección del material vegetativo para producir los clones medidos en 2014, se realizó tomando las muestras de los mayores  $dn$  y  $A$ , sin tener en

consideración el  $V_t$ , haciendo los árboles más esbeltos y con menor cantidad de volumen, en comparación con los clones de 2007 y los árboles provenientes de semillas (Figura 2.2).

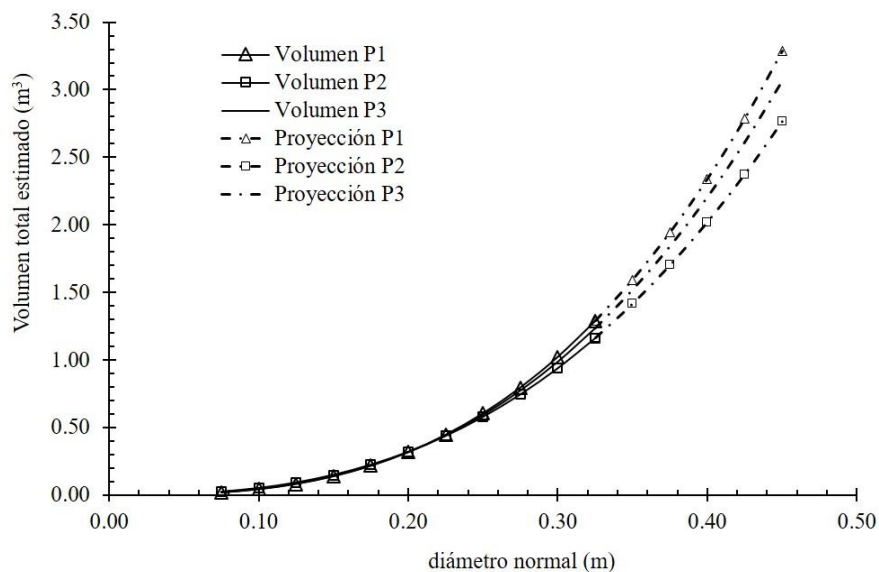


Figura 2.2. Estimación y proyección del  $V_t$  con el modelo de Schumacher-Hall para P1 y P3 y Spurr para la población P2 de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Tomando como referencia las plantaciones de clones de 2007, las cuales tienen mayor cantidad de  $V_t$  en comparación con las demás, se observó que hasta la categoría diamétrica de 30 cm que en promedio es la máxima en las tres poblaciones analizadas, las plantaciones de 2014 tienen un 3.60 % menos de  $V_t$  con respecto a las cultivadas en 2007, mientras que los árboles provenientes de semilla un 1.47 % (Figura 2.2). Las proyecciones fuera de la muestra hasta los 45 cm de diámetro indican que las diferencias de la población P2 aumentan a 11.35 % y de P3 en 4.72 %, con respecto al  $V_t$  proyectado de P1.

### 2.5.3. Modelos de razón volumétrica

Al realizar un primer ajuste los valores de los parámetros y los estadísticos resultantes fueron adecuados, sin embargo se observó que los residuales presentaron una tendencia no deseable y el valor de  $DW$  para P1 varió de 0.59 a 1.03, en P2 de 0.13 a 0.82 y en P3 entre 0.44 a 1.09, lo que demuestra la existencia de correlación entre los datos. Debido a esta situación en las tres poblaciones y tras el análisis gráfico de la función de autocorrelación (ACF), se empleó una estructura autoregresiva para corregir los errores del orden que fuera necesario en cada uno de ellos (CAR(X)). Al corregir la autocorrelación se obtiene distribuciones deseables en la función de autocorrelación parcial (PACF) y valores adecuados en  $DW$ .



Para el modelo de  $R_d$  (13) de la P2, después de haber corregido la autocorrelación y sin ser tan rigurosos en el valor de  $DW$ , se decidió que este fuera el mejor con base en lo propuesto por Fuentes *et al.* (2001a y 2001b) sobre la ausencia de correlación para valores en el estadístico superiores e iguales a 1 y a las estimaciones más precisas que genera este modelo con respecto a los demás. Esto se debe a que los datos de ajuste en el valor de  $DW$  evidencian la presencia de una correlación serial del tipo autoregresiva CAR(1) que se debe a la existencia de secciones con diámetros en el fuste a una altura dada, que se relacionan con el diámetro similar o igual a una distinta  $Ac$  (Pérez, 1996; Pérez, 1998).

Al aplicar un retardo más a los errores y mejorar este valor, se observó que se perdía ajuste al presentar parámetros no significativos, esto es,  $R^2_{aj}$  inferiores o estimaciones sesgadas con respecto a los datos observados. Esta situación podría ser similar a la mencionada por Fuentes *et al.* (2001a y 2001b), donde un valor semejante a lo reportado de  $DW = 1.4$  implica que los errores del modelo están dados por variables no incluidas dentro del mismo, pero que afectan directamente a una de sus variables independientes.

En las tres poblaciones analizadas, se eligió un modelo de razón de volumen de tipo  $R_d$  y uno de  $R_h$ , con la finalidad de poder utilizar cualquiera de estas dos variantes en la estimación del  $V_c$ . Esta selección se hizo con base a los mayores valores de  $R^2_{aj}$ , y los menores estadísticos en la  $SCE$  y  $RCME$ , tal como lo reportan Trincado *et al.* (1997) y Barrio *et al.* (2007).

El ajuste de los mejores modelos arrojó resultados adecuados y los valores de sus parámetros todos significativamente diferentes de cero ( $p < 0.05$ ) (Cuadro 2.6). Cabe mencionar que en algunos modelos se aplicaron pruebas de ajuste fijando uno de sus parámetros donde se obtuvieron mejores valores en los estadísticos considerados que los presentados a continuación; sin embargo, al verificar de forma gráfica las estimaciones de estos modelos con respecto a los observados, las predicciones fueron sesgadas.

Cuadro 2.6. Parámetros estimados y estadísticos de ajuste de los modelos de razón de volumen que mejor se ajustaron a cada población en PFC de *E. urophylla*, en Huimanguillo, Tabasco, México.

Población	Modelo	SCE	RCME	$R^2_{aj}$	Parámetros	Estimación	Eea	Valor t	P < t	DW	
P1	(11)	3.370	0.046	0.965	$d0$	-1.7776	0.032	-55.47	<.0001	1.7	
					$d1$	2.9809	0.026	114.72	<.0001		
					$d2$	2.5464	0.026	98.55	<.0001		
					$p1r$	0.4588	0.021	22.25	<.0001		
	(21)	1.117	0.025	0.990	$d0$	2.3628	0.005	438.60	<.0001	1.5	
					$d1$	-1.3747	0.006	-213.40	<.0001		
					$p1r$	0.8367	0.017	49.61	<.0001		
					$p2r$	0.7359	0.023	32.77	<.0001		
	P2	(11)	10.198	0.073	0.935	$b0$	-1.0741	0.019	-56.89	<.0001	1.4
						$d1$	1.8237	0.015	124.85	<.0001	
						$d2$	1.5361	0.018	87.56	<.0001	
						$p1r$	0.6122	0.015	39.94	<.0001	
(21)		0.397	0.014	0.998	$d0$	2.3156	0.008	294.57	<.0001	1.5	
					$d1$	-1.3356	0.010	-131.74	<.0001		
					$p1r$	1.2792	0.015	85.83	<.0001		
					$p2r$	1.0277	0.011	91.12	<.0001		
P3		(15)	17.811	0.054	0.970	$d1$	-1.3130	0.093	-14.07	<.0001	1.6
						$d2$	8.7902	0.398	22.07	<.0001	
						$d3$	-20.7495	0.646	-32.15	<.0001	
						$d4$	18.8408	0.497	37.95	<.0001	
	$d5$					-7.4121	0.182	-40.76	<.0001		
	$d6$					1.0641	0.026	41.78	<.0001		
	$p1r$					0.6295	0.007	89.39	<.0001		
	(21)					2.382	0.020	0.996	$d0$	2.3123	
$d1$		-1.3182	0.003	-378.45	<.0001						
$p1r$		0.9745	0.004	219.04	<.0001						
$p2r$		0.8335	0.004	203.22	<.0001						

SCE: Suma de Cuadrados del Error. RCME: Raíz del Cuadrado Medio del Error.  $R^2_{aj}$ : Coeficiente de determinación ajustado. Eea: Error estándar aproximado.  $d_n$ : Parámetros estimados.  $p1r$ ,  $p2r$  y  $p3r$  indican el número de retardos aplicados en el modelo tipo CAR(X) aplicado.

Al verificar la distribución de los residuales (Figura 2.3) para los modelos  $R_d$  en las poblaciones P1 y P3, los resultados concuerdan con los mencionados por Barrio *et al.* (2014) en *E. grandis*, donde la distribución de estos es homocedástica (a y c). No obstante, en P2 se tiene una ligera presencia de heterocedasticidad sin ser preocupante en las estimaciones realizadas con este modelo, ya que al calcular la razón de volumen con modelos de mejor distribución, el error absoluto fue menor en este modelo seleccionado (b). Los modelos  $R_h$  en ninguno de los casos muestran una tendencia (e, f y g), lo que concuerda con lo expuesto por Pece (1994) al utilizar este tipo de modelos en *E. pellita*.

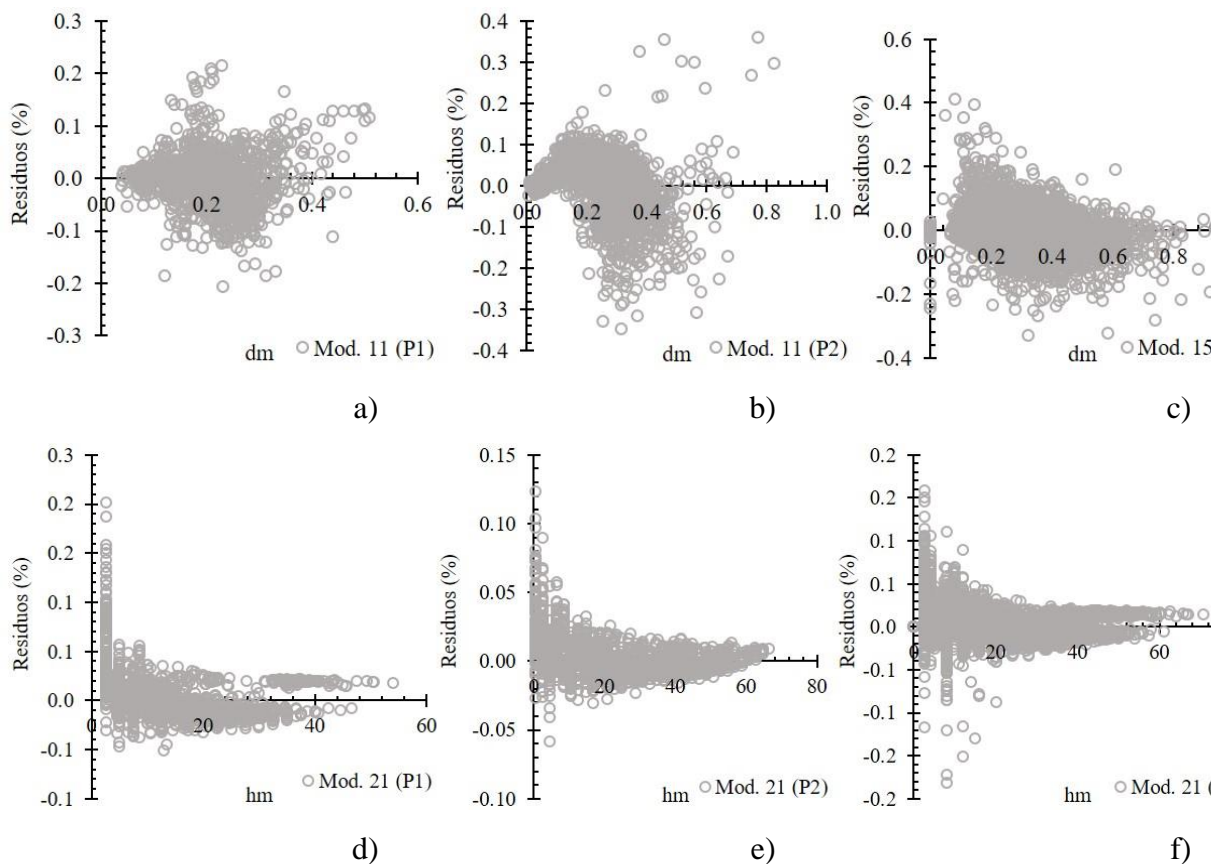


Figura 2.3. Residuales de los mejores modelos de razón volumétrica para árboles de las tres poblaciones de *E. urophylla* evaluadas en Huimanguillo, Tabasco, México.

Al estimar el sesgo absoluto ( $\bar{E}$ ) y la desviación agregada ( $DA \%$ ) para cada población, y con la finalidad de verificar la precisión de las estimaciones con los modelos de tipo  $R_d$  y  $R_h$ , respectivamente, se observa que los valores de estos estadísticos de precisión, los cuales son bajos para las tres poblaciones, sin ser superior para el caso de  $DA$  en ninguna situación al 1.29 % (Cuadro 2.7).

Cuadro 2.7. Sesgo absoluto ( $\bar{E}$ ) y diferencia agregada % ( $DA \%$ ) de los modelos de razón volumétrica en las tres poblaciones.

Población	Modelo	Sesgo ( $\bar{E}$ )	Diferencia Agregada %
P1	<i>Rd</i> (11)	$1.5 \times 10^{-3}$	0.214
	<i>Rh</i> (21)	$2.0 \times 10^{-4}$	0.026
P2	<i>Rd</i> (11)	$1.1 \times 10^{-3}$	0.157
	<i>Rh</i> (21)	$7.7 \times 10^{-3}$	-1.129
P3	<i>Rd</i> (15)	$3.0 \times 10^{-4}$	-0.041
	<i>Rh</i> (21)	$5.8 \times 10^{-3}$	0.914

#### 2.5.4. Estimación de volumen comercial de árboles ( $V_c$ , $m^3$ )

Los modelos ajustados permiten encontrar la razón de cómo se acumula el volumen a medida que se llega a la altura total partiendo de la altura de tocón, además, la relación entre el volumen total y el volumen correspondiente a un diámetro o altura límite de utilización. Las expresiones para obtener el  $V_c$  de árboles individuales en cada una de las poblaciones están integradas por un modelo de  $V_t$  y  $r$ , que al multiplicarlos tendrán como resultado el  $V_c$  al índice de utilización definido. Las ecuaciones resultantes se presentan a continuación.

Ecuaciones de  $V_c$  para la población P1, medidas en 2007.

$$V_c = 0.546618 \times dn^{2.014329} A^{0.863912} \times 1 - 1.77764 \times dm^{2.980938} / dn^{2.546364} \quad (24)$$

$$V_c = 0.546618 \times dn^{2.014329} A^{0.863912} \times 2.362756 \times (Ac/A) - 1.37474 \times (Ac/A)^2 \quad (25)$$

Ecuaciones de  $V_c$  para la población P2, evaluadas en 2014.

$$V_c = 0.326089 (dn^2 A)^{0.868193} \times 1 - 1.07409 \times dm^{1.823664} / dn^{1.536125} \quad (26)$$

$$V_c = 0.326089 (dn^2 A)^{0.868193} \times 2.315619 (Ac/A) - 1.3356 (Ac/A)^2 \quad (27)$$

Ecuaciones de  $V_c$  para la población P3, medida en 2007.

$$V_c = 0.175949 (dn^{1.72463}) (A^{1.066234}) \times \left[ 1 - 1.31297 (dm/dn) + 8.790249 (dm/dn)^2 - 20.7495 (dm/dn)^3 + 18.84078 (dm/dn)^4 - 7.41206 (dm/dn)^5 + 1.064083 (dm/dn)^6 \right] \quad (28)$$

$$Vc = 0.175949(dn^{1.72463})(A^{1.066234}) \times 2.312281(Ac/A) - 1.31821(Ac/A)^2 \quad (29)$$

Al comparar de forma gráfica las predicciones de  $Vc$  obtenidas con el método de razón de volumen contra el volumen acumulado se aprecia que el resultado es cercano a una línea recta (Figura 2.4), situación que indica que al utilizar los modelos de tipo  $Rd$  se tiene una estimación de la muestra mayor al 94 % y al emplear los modelos de tipo  $Rh$  de 96 %. Además, al aplicar una regresión lineal a estos datos, se verifica que la precisión y el sesgo absoluto para los modelos  $Rd$  es de 3.0, 5.4 y 5.5 % en las poblaciones P1, P2 y P3, respectivamente; mientras que en los modelos de tipo  $Rh$  es de 1.1, 3.1 y 2.6 % (Figura 2.4). La tendencia encontrada y los valores de los ajustes entre los valores predichos y los observados concuerdan con lo indicado en estudios semejantes realizados por Pece en *Eucalyptus pellita* (1994), Chauchard y Sbrancia, (2005) en *Pinus radiata*; y Barrio *et al.* (2014) en *E. grandis*.

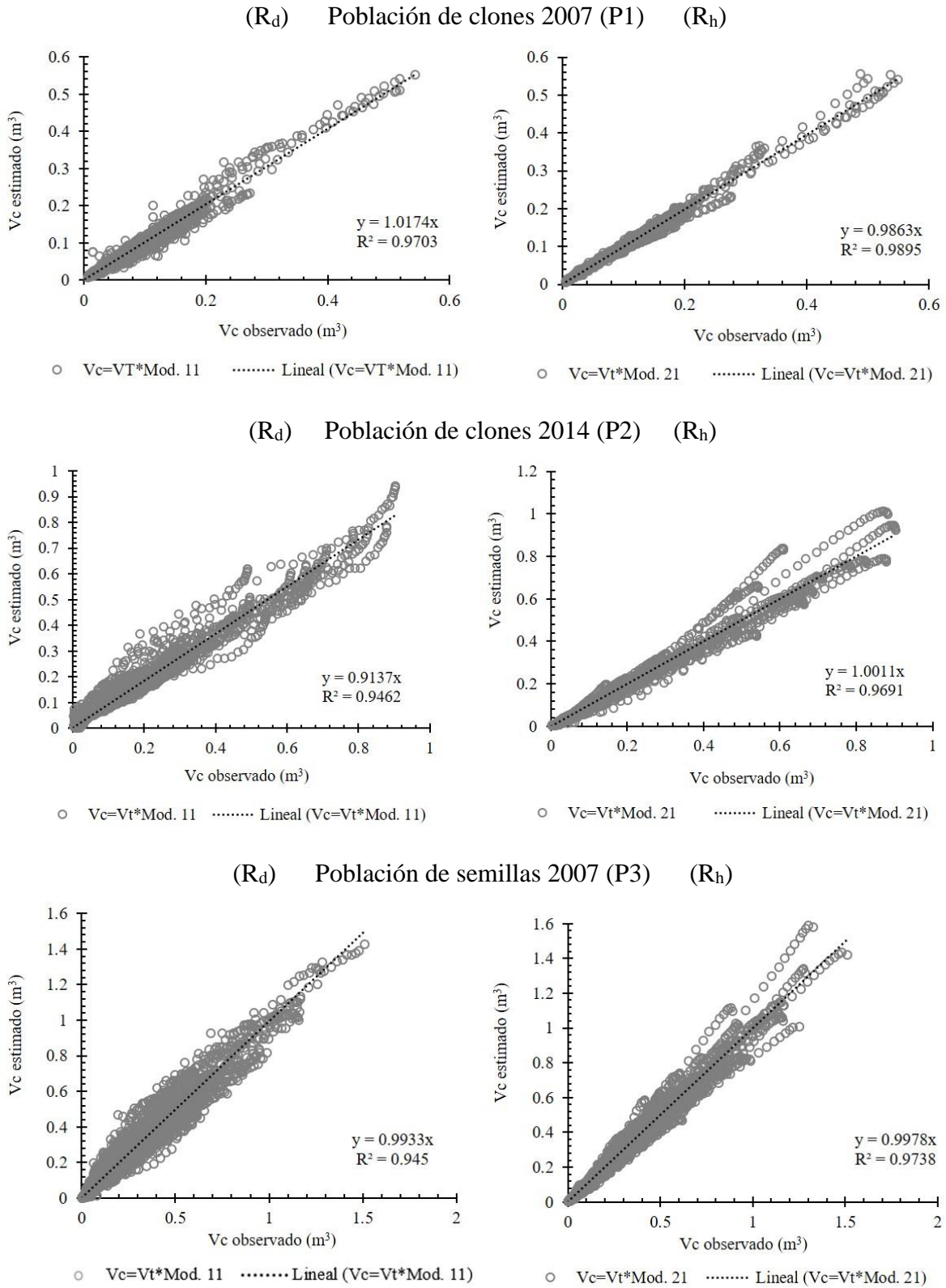


Figura 2.4. Volumen comercial ( $V_c$ ) estimado vs  $V_c$  predicho para las poblaciones P1, P2 y P3, utilizando los modelos seleccionados.

Para estimar algún diámetro comercial en punta del fuste a una determinada altura comercial, para las poblaciones P1 y P2, se despeja  $dm$  de la ecuación (11) y se reemplaza  $R_d$  por  $R_h$

(Ecuación 30), de acuerdo al procedimiento propuesto por Trincado *et al.* (1997), utilizando los parámetros estimados para cada modelo y sustituyéndolos en la ecuación resultante. En el caso de que se quiera el proceso inverso; es decir, estimar  $Ac$  para un diámetro comercial en punta específico, en las tres poblaciones, se procede despejando  $Ac$  de la ecuación (21) y sustituyendo  $R_h$  por  $R_d$  (ecuación 31).

$$dm = \left( \frac{dn^{d_2}(R_h - 1)}{d_0} \right)^{\frac{1}{d_1}} \quad (30) \quad \text{y} \quad Ac = \frac{R_d A}{d_0 + d_1} \quad (31).$$

Para el caso de la P3, en el modelo 15 de  $R_d$  la solución para estimar el  $dm$  a cualquier altura dada se realiza mediante una aproximación numérica con la herramienta SOLVER de Excel, debido a que al despejar esta variable de la ecuación existen raíces que matemáticamente pueden reducirse hasta desaparecer.

Los modelos seleccionados muestran consistencia en la determinación volumétrica total y comercial, no presenta entrecruzamiento de valores, además permiten estimar de forma directa el diámetro del fuste a una altura establecida, o bien, la altura del fuste a un diámetro límite de utilización. Estos modelos en conjunto son altamente confiables y permiten realizar estimaciones de distribución de productos, tablas de volúmenes comerciales con índices de aprovechamiento específicos o cálculos de valoración económica de las plantaciones. Usar los modelos generados con datos de inventarios y de cosecha operativa sería la última prueba de validación.

## 2.6. CONCLUSIONES

Las relaciones funcionales entre las variables del árbol son confiables en la estimación del volumen total y comercial, además, el ajuste de sus expresiones matemáticas sugiere que si la intención de los dueños o inversionistas es maximizar el volumen a obtener en las plantaciones de clones de *Eucalyptus urophylla*, la selección de árboles con fines de reproducción clonal deberá contemplar un análisis del volumen total del árbol, más que de las dimensiones de diámetro normal y altura total. De igual manera en este tipo de plantaciones de rápido crecimiento es necesario mantener la actualización de estos modelos al mismo ritmo del replazo del material vegetativo usado y de las prácticas culturales aplicadas, pues se observó que en un lapso de tiempo relativamente corto (7 años) se tienen cambios estadísticamente significativos en las poblaciones, por lo tanto en la confiabilidad de los modelos para estimar la cosecha maderable potencial y el valor de la inversión forestal.

## 2.7. LITERATURA CITADA

- Alder D., 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Vol. 22/2.- Predicción del rendimiento. Ed. FAO, Montes, 189 p.
- Arias, D. 2004. Estudio de las relaciones altura-diámetro para seis especies maderables utilizadas en programas de reforestación en la zona sur de Costa Rica. Revista Forestal Kurú 1:1-11.
- Arias, D. 2005. Morfometría del árbol en plantaciones forestales tropicales. Revista Forestal Kurú 2:2-11.
- Barrio, M., H. Sixto, I. Cañellas, y F. González. 2007. Sistema de cubicación con clasificación de productos para plantaciones de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv. 'I-214' en la meseta norte y centro de España. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales 16: 65-75.
- Barrio, A., A. M. López y V. Nieto. 2014. Predicción de volúmenes comerciales de *Eucalyptus grandis* a través de modelos de volumen total y de razón. Colombia Forestal 17: 137-149.
- Bailey, R. L. 1995. Upper-stem volumes from stem-analysis data: An overlapping bolt method. Canadian Journal of Forest Research 25: 170-173.
- Burkhart, H. E. 1977. Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit. Southern Journal of Applied Forestry 1: 7-9.
- Cailliez, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos: estimación del volumen. Vol. 22/1. Estudio FAO: Montes, Roma, Italia. 92 p.
- Cao, Q., H. Burkhart and T. Max. 1980. Evaluation of two methods for cubic volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. Forest Science 26: 71-80.
- Casnati C., R., G. Mason E., R. Woollons and F. Resquin. 2014. Volume and taper equations for *P. tadea* (L.) and *E. grandis* (Hill ex. Maiden). Agrocienza 18:47-60.
- Chauchard L. y R. Sbrancia. 2005. Funciones de razón para la estimación de los volúmenes maderables de *Pino radiata* en el País Vasco. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales. 14:185-194.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2014. Boletín 77. CONAFOR. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/5752M%C3%A9xico%20cuenta>



[%20con%20270%20mil%20hect%C3%A1reas%20de%20%20Plantaciones%20Forestales%20Comerciales.pdf](#). (Consulta: Diciembre, 2015).

CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2015. Principales especies maderables establecidas en PFC por año (2000 – 2014) y Principales especies maderables establecidas en PFC por Entidad Federativa (2000 – 2014). <http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/plantaciones-forestales/> (Consulta: Diciembre, 2015).

Corral-Rivas S. y J. de J. Návar-Cháidez. 2009. Comparación de técnicas de estimación de volumen fustal total para cinco especies de pino de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15: 5-13.

Da Cunha T. y C. A. Guimaraes F. 2009. Modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza de árboles de *Pinus tadea* L. en el sur de Brasil. *Revista Forestal Kurú*: 2-15.

Díaz B., S., M. Espinosa. L. Valenzuela, J. Cancino y J. P. Lasserre. 2012. Efecto del raleo en el crecimiento y algunas propiedades de la madera de *Eucalyptus nitens* en una plantación de 15 años. *Madera, Ciencia y Tecnología* 14: 373-388.

Draper N., R. and H. Smith. 1966. *Applied Regression Analysis*. John Wiley & Sons New York. USA. 407 p.

Fuentes E. D., J. J. Troncoso y C. A. Bonilla. 2001a. Operaciones forestales y concentración de sedimentos en cauces naturales I: Formulación de un modelo matemático. *Bosques* 22: 15-24.

Fuentes E. D., J. J. Troncoso y C. A. Bonilla. 2001b. Operaciones forestales y concentración de sedimentos en cauces naturales II: Análisis de sensibilidad y comparación con otros modelos. *Bosques* 22: 25-27.

Gilabert H. and C. Paci. 2010. An assessment of volume-ratio functions for *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in Chile. *Ciencia e Investigación Agraria* 37:5-15.

Honner, T. G. 1967. Standard volume tables and merchantable conversion factors for the commercial tree species of central and eastern Canada. Information Report FMR-X-5. Forest Management Research and Service Institute, 162 p.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2005. Marco Geoestadístico Municipal 2005, versión 3.1. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/27/27008.pdf> (Consulta: Diciembre, 2015).

Institute Inc. Statistical Analysis System. 2008. SAS/STAT® 9.2 User's Guide Second Edition. SAS Institute Inc. Raleigh, NC USA. s/p.

- <https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statugmcmc/63125/PDF/default/statugmcmc.pdf> (Consulta: Diciembre, 2015).
- Juárez-Palacios, J. C., J. A. Honorato-Salazar, L. Vázquez-Silva y J. F. C. Parraguirre-Lezama. 2013. Patogenicidad de *Crysoporthe cubensis* en clones de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en el sureste de México. *Madera y Bosques* 19: 17-36.
- Matney, T. G. and D. Sullivan A. 1982. Variable top volume and height predictors for slash pine trees. *Forest Science* 22: 283-289
- Moret A. Y., M. Jerez y A. Mora. 1998. Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) en la unidad experimental de la reserva forestal Caparo, estado de Barinas-Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 42: 41-50
- Nájera L., J. A. y E. Hernández H. 2008. Relaciones morfométricas de un bosque coetáneo de la región del Salto, Durango. *Ra-Ximhai* 4: 69-81.
- Nieto, V. M y J. Rodríguez. 2003. Tropical Tree Seed Manual: *Eucalyptus urophylla*. In: Vozzo, Manual de Semillas JA Árbol Tropical. Parte II. Especies descripciones. Washington, DC: USDA Forest Service. p. 473.
- Parresol, B. R., J. E. Hotvedt and Q.V. Cao. 1987. A volume and taper prediction system for bald cypress. *Canadian Journal of Forest Research* 17: 250-259.
- Pece R., M. 1994. Tabla de volumen comercial para *Eucalyptus pellita* utilizando el método de la razón volumétrica. *Quebracho* 2: 54-63.
- Pérez, C. 1996. Econometría y análisis estadístico multivariable con Statgraphics. Técnicas avanzadas. Ed. Rama. Madrid, España, 745 p.
- Pérez, C. 1998. Métodos estadísticos con Statgraphics para Windows. Técnicas básicas. Ed. Rama. Madrid, España, 705 p.
- Prodan, M., R. Peters, F. Cox y P. Real. 1997. Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación de Desarrollo Sostenible. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/BMZ/GTZ. San José, Costa Rica. 561 p.
- Trincado, G., K. Von Gadow and V. Sandoval. 1997. Estimación de volumen comercial en latifoliadas. *Bosque* 18: 39-44.
- Tschieder E., F., E. Fassola H. y M. García C. 2011. Ecuaciones de volumen total para *Populus deltoides* de plantaciones del Bajo Delta del Paraná. *Revista de Investigaciones Agropecuaria* 37: 172-179.
- Rodríguez-Juárez M. I., A. Velázquez-Martínez, A. Gómez-Guerrero, A. Aldrete y M. Domínguez-Domínguez. 2014. Fertilización con boro en plantaciones de *Eucalyptus*

- urophylla* S. T. Blake en Tabasco. Revista Chapingo: Serie de Ciencias Forestales 20: 204-213.
- Rosa F., G., C. Morel P., R. Montanari., J. Motta S., G. Machado S. y E. Casarin Z. 2011. Variabilidad3 espacial de propiedades dendrométricas do eucalipto e de atributos físicos de um Latossolo Vermelho. *Bragantia*, Campinas 70: 439-446.
- Van Deusen, P., A. Sullivan and T. Matney.1981. A prediction system for cubic foot volume of loblolly pine applicable through much of its range. *Southern Journal of Applied Forestry* 5: 186-189.
- Verbeek, M. 2004. A guide to modern econometrics. Second edition. West Sussex: John Wiley & Sons. 429 p.
- Vieira, F. S. y Bucsan. 1980. Ocurrência natural de *Eucalyptus urophylla* en Indonesia. *Silvicultura* 3: 359-361.
- Wilson, J. S. and C. Oliver. 2000. Stability and density management in Douglas-fir plantations. *Canadian Journal of Forrest Research* 30: 910-920.
- Zimmerman, D., L. and V. Núñez-Antón. 2001. Parametric modelling of growth curve data: An overview (with discussion). *Test* 10:1-73.

## CAPÍTULO III

### 3. FUNCIONES DE AHUSAMIENTO PARA CLONES DE *Eucalyptus urophylla* ESTABLECIDO EN PLANTACIONES COMERCIALES EN HUIMANGUILLO, TABASCO, MÉXICO

#### 3.1. RESUMEN

Las funciones de ahusamiento además de modelar el perfil fustal, permiten estimar las dimensiones y el volumen maderable de cualquier sección del árbol y con ello predecir la distribución del volumen por tipo de producto para planear el abastecimiento forestal. Con la hipótesis de que el volumen total y comercial está estrechamente relacionado con la forma del árbol, se planteó el objetivo de determinar una función de ahusamiento que permita modelar el perfil fustal de árboles clonales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake establecidos con fines comerciales en Huimanguillo, Tabasco, México. Con información de 93 árboles (2,133 pares de datos), se ajustaron diez modelos de ahusamiento con el método de máxima verosimilitud. El mejor modelo se seleccionó de acuerdo a los menores valores en los estadísticos del Cuadrado Medio del Error (*CME*), la Raíz del *CME*, el Coeficiente de Variación, el Sesgo, además del mayor Coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{aj.}$ ), resultando ser el mejor el modelo polinomial de quinto orden, el cual considera la proporción relativa de la altura a diferentes secciones contra la altura total. Se corrigió la autocorrelación al incluir en el ajuste una estructura de autocorrelación de tipo CAR(X). La gráfica de las estimaciones del modelo con respecto a los observados, mostró una tendencia de una línea recta, que indica un ajuste y predicción adecuada. Con el modelo se puede describir la forma paraboloides de los árboles de clones, que resultó ser semejante a los individuos provenientes de semilla, pero con diferencias en la altura total. El modelo polinomial es confiable para estimar vía una solución numérica, el diámetro y la altura a cualquier dimensión establecida para árboles provenientes de plantaciones comerciales de clones de *E. urophylla*.

**Palabras clave:** perfil fustal, volumen comercial, clones de eucalipto, aprovechamiento forestal, *Eucalyptus urophylla*.

## TAPER FUNCTIONS FOR CLONAL *Eucalyptus urophylla* PLANTATIONS AT HUIMANGUILLO, TABASCO, MEXICO.

### 3.2. ABSTRACT

Taper functions in addition to describe bole profile, allow us to estimate the size and merchantable timber volume of any section of the tree and thus predict potential product distribution to better plan forest supply. The main hypothesis is that total and merchantable volume are closely related to a shape factor. To determine a taper function that better describe bole profile of clonal trees *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake established in Huimanguillo, Tabasco, Mexico data from 93 clonal trees (2,133 data pairs) and ten taper models with maximum likelihood method were fitted. The best model was selected according to the statistical mean square error (*MSE*), *MSE* root, coefficient of variation, bias and the adjusted coefficient of determination ( $R^2_{aj}$ ). The best ranked models was a polynomial model of fifth order which considers the relative ratio of the height to different sections against the total height. Autocorrelation was corrected by including in CAR type structure. This model can describe the paraboloid shape of cloned trees, which is similar to individuals coming from seed, but with differences in overall height. The polynomial model is reliable to estimate via a numerical solution, the diameter and height for any dimension established to trees coming from commercial plantations of *E. urophylla* clones. The model when integrated also has a closed form solution for total and merchantable volume equations.

**Key words:** bole profile, commercial volume, eucalyptus clones, logging forest, *Eucalyptus urophylla*.

### 3.3. INTRODUCCIÓN

En el mundo existen 264 millones de hectáreas de plantaciones forestales, de las cuales, en el 25 % se emplean especies introducidas (FAO, 2010). En México, país que ocupa el quinto lugar de bosques plantados en América (INEGI, 2014), se destaca el uso de especies de rápido crecimiento (Overbeerk *et al.*, 2012), el *Eucalyptus* es el segundo género más utilizado para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales (PFC) (SEMARNAT-CONAFOR, 2014) y *E. urophylla* la especie más plantadas en climas tropicales (CONAFOR, 2012).

La estimación del volumen y la distribución de productos maderables de bosques naturales y plantaciones es una necesidad en el manejo forestal. Las ecuaciones que describen el perfil del fuste o las funciones de ahusamiento, son una opción factible para el cálculo preciso de las dimensiones y volúmenes de cualquier parte del fuste en el árbol (Maldonado-Ayala y Navar, 2000; Cancino, 2006) o de la distribución de productos (Barreto-Medel *et al.*, 2012). Además, son un componente esencial en los sistemas de rendimiento y en la simulación de troceo (Gezan *et al.*, 2009).

Este tipo de funciones, describen la tasa de disminución del diámetro en cualquier parte del fuste a medida que se aproxima a la altura total del árbol (Prodan *et al.*, 1997; Torres y Magaña, 2001) y varían de acuerdo a la especie, edad, tamaño de los árboles, factores asociados al manejo, condiciones de sitio o densidad (Cancino, 2006). De igual manera, es posible evaluar la influencia de estos factores sobre la producción (Barreto-Medel *et al.*, 2012) y proponer actividades de manejo técnico que modifiquen la forma del árbol para conseguir los objetivos planteados en el manejo forestal (Sterba, 1980).

Debido a la dificultad para describir el perfil de un árbol, los modelos toman como base la forma de algunos cuerpos geométricos regulares, mientras que otros son empíricos, pero ello no significa que unos sean mejor que otros (Cancino, 2006). Los modelos pueden ser de tipo polinómico, trigonométrico, de exponente variable, segmentados o compatibles con funciones de volumen total (Gezan *et al.*, 2009) y las técnicas más utilizadas en sus ajustes estadísticos son mediante ecuaciones aparentemente no relacionadas (SUR) y máxima verosimilitud con información completa (FIML) debido a que hacen que los estimadores de los parámetros sean consistentes y asintóticamente eficiente, situación que no sucede con el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), ya que se ignoran los errores que ocurren en el diámetro a lo largo del fuste. La mayor dificultad en la estimación de cualquiera de ellos se presenta en la base y

punta del árbol (Cancino, 2006), por lo anterior, autores como Cruz-Cobos *et al.* (2008) han modelado este tipo de información bajo el enfoque de efectos mixtos.

México cuenta con una superficie de 32,452 ha de plantaciones de eucaliptos (CONAFOR, 2015), lo que implica la necesidad de conocer la forma, distribución de productos y rendimiento de los árboles, todo ello con la finalidad de poder utilizar esta información como herramienta de apoyo en la elaboración de programas de manejo forestal, realizar valoraciones económicas de las existencias para un mercado diferenciado de productos y planear las actividades de aprovechamiento y extracción de estos recursos. Aunado a que esta especie es de rápido crecimiento y las ecuaciones para evaluar lo antes descrito deben de estar en constante actualización, se planteó la hipótesis de que el volumen total y comercial está estrechamente relacionado con la forma del árbol y el objetivo fue determinar una función de ahusamiento que permita modelar el perfil fustal de árboles clonales de *E. urophylla* S. T. Blake establecidos con fines comerciales en Huimanguillo, Tabasco, México.

### **3.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

El trabajo se realizó en plantaciones forestales comerciales de clones de *E. urophylla* de uno a siete años de edad establecidas en el municipio de Huimanguillo, Tabasco. El clima local es cálido húmedo (Am), con temperatura media anual de 26 °C y una precipitación media de 2,500 mm. La unidad de suelo predominante es de tipo Feozem (INEGI, 2005).

La muestra constó de 93 árboles derribados, de donde se obtuvieron 2,133 pares de datos distribuidos a lo largo del fuste. A cada árbol seleccionado por su dominancia dentro del rodal, se le midió el diámetro con corteza ( $d$ ) y su altura ( $hm$ ) en secciones de un metro de separación, se inició con el diámetro de tocón ( $dt$ ) y la altura del mismo ( $ht$ ) hasta llegar a la altura total ( $H$ ), además, se incluyó la dimensión del diámetro normal ( $dn$ ).

Los modelos de ahusamiento ajustados y evaluados al conjunto de datos fueron seleccionados de la literatura internacional ya que se han utilizado con éxito en diversos estudios (Cuadro 3.1). El ajuste estadístico de los modelos, se realizó en el paquete SAS 9.2, con el procedimiento MODEL y la técnica de máxima verosimilitud (FILM por sus siglas en inglés) (Institute Inc. Statistical Analysis System. 2008). La evaluación y selección del mejor modelo se realizó con base al mayor valor del Coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros ( $R^2_{aj.}$ ) y los menores valores en la Suma de Cuadrados del Error ( $SCE$ ),

Cuadrado Medio del Error (*CME*), la Raíz del *CME* (*RCME*), el Coeficiente de Variación (*CV*) y el Sesgo (*E*).

Cuadro 3.1. Modelos de ahusamiento (*d*) evaluados para modelar el perfil fustal de árboles de *E. urophylla* de PFC en Tabasco, México.

No.	Modelo	Expresión	Donde
(1)	Demaerchalk	$d = dn \sqrt{\beta_1 \left( \frac{1}{dn^2 H} \right) \times X^{\beta_2} + \beta_3 \times X^{\beta_4}}$	$X = (H - hm) / H$
(2)	Kozak	$d = dn \sqrt{\beta_1 (X - 1) + \beta_2 (X^2 - 1)}$	$X = (H - hm) / H$
(3)	Forslund	$d = dn (1 - X^{\beta_1})^{\frac{1}{\beta_2}}$	$X = hm / H$
(4)	Clutter	$d = \beta_1 dn^{\beta_2} H^{\beta_3} (H - hm)^{\beta_4}$	_____
(5)	Cielito 1	$d = dn \sqrt{\beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3}$	$X = (H - hm) / H$
(6)	Cielito 2	$d = dn \sqrt{\beta_1 + \beta_2 X + \beta_3 X^2 + \beta_4 X^3 + \beta_5 X^4}$	$X = hm / H$
(7)	Cielito 3	$d = dn \sqrt{\beta_1 X + \beta_2 X^{\beta_3}}$	$X = (H - hm) / H$
(8)	Polinomial	$d = dn(\beta_1 + \beta_2 X + \beta_3 X^2 + \beta_4 X^3 + \beta_5 X^4 + \beta_6 X^5)$	$X = hm / H$
(9)	Newnham	$d = dn \beta_1 X^{\beta_2}$	$X = (H - hm) /$ $(H - 1.3)$
(10)	Rustagi y Loveless	$d = \beta_1 + \beta_2 dn X^{\beta_2}$	$X = (H - hm) /$ $(H - 1.3)$

*dn*: Diámetro normal. *H*: Altura total. *hm*: Altura a distintos diámetros a lo largo del fuste.  $\beta'$ : Parámetros a estimar.

Se usó un criterio jerárquico para facilitar la selección del mejor modelo, para ello, se integraron los estadísticos de bondad de ajuste (*SCE*, *CME*, *RCME*,  $R^2_{aj}$ , *CV* y *E*), en donde se calificaron según lo referido por Sakici *et al.* (2008), con la asignación de valores consecutivos del uno al diez en función de su importancia para cada uno de los estadísticos empleados; el uno es el mayor índice y diez el menor. Posteriormente para cada modelo, se sumaron los valores de calificación de los estadísticos para obtener un total, en donde el modelo con la menor calificación fue seleccionado como el mejor.

La autocorrelación de los errores en los modelos se detectó con la prueba de Durbin-Watson (Augusto *et al.*, 2009). En el mejor modelo de ahusamiento seleccionado para corregir los



problemas de autocorrelación se aplicó un modelo autoregresivo en tiempo continuo (CAR) (Lara, 2011). El ajuste se realizó con la estructura que se indica a continuación (Zimmerman & Nuñez-Antón, 2001):

$$Y_{ij} = f(X_{ij}, B) + e_{ij} \quad \text{Donde } e_{ij} = \sum_{k=1}^{k=X} I_k p_k^{h_{ij}-h_{ij-k}} e_{ij-k} + \varepsilon_{ij} \quad (11)$$

Donde  $Y_{ij}$  es el vector de la variable dependiente,  $X_{ij}$  la matriz de las variables independientes,  $B$  es el vector de los parámetros a estimar,  $e_{ij}$  es el  $j$ -ésimo residuo del árbol  $i$ ,  $I_k = 1$  para  $j > k$  y es 0 para  $j \leq k$ ,  $p_k$  es el parámetro autoregresivo de orden  $k$  a estimar,  $h_{ij}-h_{ij-k}$  es la distancia que separa la altura de medición  $j$ -ésima de la altura de medición  $j$ -ésimo- $k$  en cada árbol ( $h_{ij} > h_{ij-k}$ ) y  $\varepsilon_{ij}$  es el error aleatorio (Álvarez *et al.*, 2005; Barrio *et al.*, 2014).

El número de retardos aplicados en el modelo CAR(X) se definió después de evaluar el estadístico de Durbin-Watson ( $DW$ ) definiéndose un valor que fuera mayor a 1.5 y cercano a 2 (Verbeek, 2004). De forma análoga, se analizaron gráficamente los residuales para verificar problemas de heterocedasticidad, que de acuerdo a Kozak (1997), son los inconvenientes más importantes en este tipo de estudios y que violan los supuestos de la regresión.

El volumen total ( $Vt$ ) se estimó a partir de la ecuación de ahusamiento seleccionada, mediante la integración del diámetro  $d$  a lo largo del fuste con respecto a  $hm$  como un sólido en revolución utilizando la expresión siguiente:

$$Vt = k \int_{h_1}^{h_2} d^2 dm \quad (12)$$

Donde  $k = \frac{\pi}{4}$  es la constante volumétrica y  $dm$  es el diferencial sobre la altura del fuste, mientras que  $h_1$  y  $h_2$  son las alturas que definen la integral y que pueden variar de  $h_1 = 0$  hasta  $h_2 = H$  (altura total).

El modelo de ahusamiento elegido, se utilizó para estimar  $hm$  a cualquier diámetro comercial de interés, previo despeje de la variable de la expresión matemática utilizada. Por otro lado, el volumen comercial ( $Vc$ ) se estimó con la ecuación correspondiente al modelo de ahusamiento propuesto, definiendo un intervalo de  $h_1 = 0$  hasta  $h_2 = h_m$ .

### 3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La totalidad de los valores de los parámetros correspondientes a cada modelo ajustado, fueron significativos a un nivel de confiabilidad mayor del 95 % (Cuadro 3.2). Los estadísticos de ajuste en los diez modelos de ahusamiento y la calificación final del sistema empleado, se presentan en el Cuadro 3.3.

Cuadro 3.2. Valores de los parámetros de los modelos de ahusamiento para árboles clonales de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Modelo	Parámetros	Estimación	Error Estándar	Valor de t	Pr >  t
(1)	$\beta_1$	0.3345	0.0090	37.22	<.0001
	$\beta_2$	44.1618	3.9580	11.16	<.0001
	$\beta_3$	0.0001	0.0000	192.31	<.0001
	$\beta_4$	1.4947	0.0156	95.71	<.0001
(2)	$\beta_1$	-2.1846	0.0040	-550.50	<.0001
	$\beta_2$	1.0005	0.0015	688.04	<.0001
(3)	$\beta_1$	0.9682	0.0234	41.35	<.0001
	$\beta_2$	1.3249	0.0291	45.61	<.0001
(4)	$\beta_1$	0.3870	0.0300	12.90	<.0001
	$\beta_2$	0.6696	0.0150	44.74	<.0001
	$\beta_3$	0.8105	0.0089	91.45	<.0001
	$\beta_4$	-0.6593	0.0198	-33.36	<.0001
(5)	$\beta_1$	0.6171	0.0313	19.74	<.0001
	$\beta_2$	-0.6144	0.0968	-6.35	<.0001
	$\beta_3$	1.2550	0.0712	17.62	<.0001
(6)	$\beta_1$	1.4268	0.0067	214.61	<.0001
	$\beta_2$	-6.2136	0.0948	-65.57	<.0001
	$\beta_3$	14.7676	0.3654	40.41	<.0001
	$\beta_4$	-16.6882	0.5047	-33.06	<.0001
	$\beta_5$	6.7078	0.2289	29.30	<.0001
(7)	$\beta_1$	0.6916	0.0053	131.31	<.0001
	$\beta_2$	0.9627	0.0105	91.51	<.0001
	$\beta_3$	15.7811	0.5157	30.60	<.0001
(8)	$\beta_1$	1.2729	0.0030	431.75	<.0001
	$\beta_2$	-5.5526	0.1032	-53.83	<.0001
	$\beta_3$	4.8763	0.0832	58.60	<.0001
	$\beta_4$	-3.7086	0.0575	-64.54	<.0001
	$\beta_5$	-2.6549	0.0386	-68.75	<.0001
	$\beta_6$	-1.7863	0.0244	-73.17	<.0001
(9)	$\beta_1$	1.0099	0.0022	451.58	<.0001
	$\beta_2$	0.8179	0.0091	89.95	<.0001
(10)	$\beta_1$	0.0198	0.0012	17.05	<.0001
	$\beta_2$	0.9263	0.0051	180.90	<.0001
	$\beta_3$	1.0048	0.0141	71.27	<.0001

Cuadro 3.3. Estadísticos de bondad de ajuste para los modelos de ahusamiento evaluados para árboles clonales de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Modelo	<i>SCE</i>	<i>CME</i>	<i>RCME</i>	$R^2_{aj}$	<i>CV</i>	<i>E</i>	Cal. total
(1)	0.628	$2.95 \times 10^{-4}$	$1.72 \times 10^{-2}$	0.938	15.15	$1.5 \times 10^{-3}$	21
(2)	0.797	$3.74 \times 10^{-4}$	$1.93 \times 10^{-2}$	0.922	17.13	$2.8 \times 10^{-3}$	43
(3)	0.977	$4.6 \times 10^{-4}$	$2.14 \times 10^{-2}$	0.901	18.62	$4.8 \times 10^{-3}$	50
(4)	0.663	$3.12 \times 10^{-4}$	$1.77 \times 10^{-2}$	0.935	15.51	$0.4 \times 10^{-3}$	23
(5)	0.699	$3.29 \times 10^{-4}$	$1.81 \times 10^{-2}$	0.932	15.87	$1.5 \times 10^{-3}$	30
(6)	0.539	$2.54 \times 10^{-4}$	$1.59 \times 10^{-2}$	0.947	13.88	$2.2 \times 10^{-3}$	15
(7)	0.544	$2.56 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-2}$	0.947	14.12	$0.3 \times 10^{-3}$	13
(8)	0.449	$2.11 \times 10^{-4}$	$1.45 \times 10^{-2}$	0.956	12.89	$1.7 \times 10^{-3}$	10
(9)	0.787	$3.86 \times 10^{-4}$	$1.96 \times 10^{-2}$	0.913	16.18	$2.7 \times 10^{-3}$	42
(10)	0.689	$3.38 \times 10^{-4}$	$1.84 \times 10^{-2}$	0.924	15.55	$0.3 \times 10^{-3}$	28

*SCE*: Suma de Cuadrados del Error. *CME*: Cuadrado Medio del Error. *RCME*: Raíz del *CME*.  $R^2_{aj}$ : Coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros. *CV*: Coeficiente de Variación. *E*: Sesgo. Cal. total: Calificación total de los estadísticos.

Los modelos Cielito 3 y Polinomial de quinto orden fueron identificados como los mejores al aplicar los criterios propuestos por Trincado y Leal (2006) y Augusto *et al.* (2009) de acuerdo con los valores de  $R^2_{aj}$ , *RCME* y *CV*, además del sistema de calificación utilizado por Sakici *et al.* (2008) e implementado por Tamarit *et al.* (2013). El ajuste estadístico es semejante a lo encontrado por Lara (2011) para plantaciones de teca, quien también determinó que un modelo polinomial fue mejor para describir el perfil fustal por los numerosos puntos de inflexión que puede describir.

Las diferencias entre los datos observados y la estimación de los modelos Cielito 3 y Polinomial de quinto orden fueron inferiores al 15 %, porcentaje aceptable en este tipo de estudios, además los valores concuerdan con los reportados por Gezar *et al.* (2009) al utilizar los modelos simples de Bruce *et al.* (1968) y Kozak (1988) que ajustaron adecuadamente a la población evaluada por estos autores. Kozak *et al.* (1969) y Kozak (1997) indican que el uso de este tipo de modelos simples presenta sesgos considerables principalmente en la parte basal del árbol y en la estimación del diámetro final para converger en cero, sin embargo estudios que han empleado modelos de ahusamiento de tipo segmentado o ajustados bajo el enfoque de efectos mixtos han mostrado reducciones en este tipo de errores en las partes mencionadas.

El valor de la prueba de *DW* para las diez funciones utilizadas varió entre 1.15 y 0.54, lo que demuestra que en todos los casos existe presencia de autocorrelación de los errores (Institute Inc. Statistical Analysis System. 2008). Por esta situación, a los modelos Polinomial de quinto grado y Cielito 3, que fueron los de mejor valor del sistema de calificación y ajuste, se les

corrigieron los problemas de autocorrelación al aplicar un retardo en los residuales (*lar1*) con la estructura CAR(X). Los valores de bondad de ajuste son adecuados y los parámetros de los modelos finales propuestos son significativos, además de que la corrección generó valores en el estadístico *DW* de 1.82 y 1.75, respectivamente, lo que indica que el problema fue corregido (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Estadísticos de bondad de ajuste y valores de los parámetros de los modelos de ahusamiento Polinomial de quinto orden y Cielito 3 corregidos por autocorrelación para árboles de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Modelo	<i>SCE</i>	<i>RCME</i>	$R^2_{aj}$	<i>DW</i>	Parámetros	Estimación	<i>EEA</i>	Valor de <i>t</i>	<i>Pr &gt;  t </i>
7	0.374	0.0133	0.963	1.75	$\beta_1$	0.6953	$8.02 \times 10^{-3}$	86.66	<.0001
					$\beta_2$	1.0812	$1.07 \times 10^{-2}$	100.92	<.0001
					$\beta_3$	17.4023	$58.32 \times 10^{-2}$	29.84	<.0001
8	0.332	0.0125	0.967	1.82	$\beta_1$	1.3130	$2.56 \times 10^{-3}$	512.10	<.0001
					$\beta_2$	-6.0812	$12.19 \times 10^{-2}$	-49.87	<.0001
					$\beta_3$	5.1035	$9.89 \times 10^{-2}$	51.59	<.0001
					$\beta_4$	-3.8067	$6.9 \times 10^{-2}$	-55.16	<.0001
					$\beta_5$	-2.6987	$4.66 \times 10^{-2}$	-57.91	<.0001
					$\beta_6$	-1.8051	$2.95 \times 10^{-2}$	-61.18	<.0001

*SCE*: Suma de Cuadrados del Error. *RCME*: Raíz del Cuadrado medio del error.  $R^2_{aj}$ : Coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros. *DW*: Prueba de Durbin-Watson. *EEA*: Error estándar aproximado.

El comportamiento gráfico del ahusamiento estimado con los modelos seleccionados es semejante a lo reportado por otros autores como Pompa *et al.* (2009), Pompa-García *et al.* (2009) y Tapia y Návar (2011), en donde se observa que la tendencia de disminución del diámetro en el fuste disminuye a medida que la altura en el fuste se acerca a la altura total es adecuada para describir el perfil del árbol de estas plantaciones (Figura 3.1).

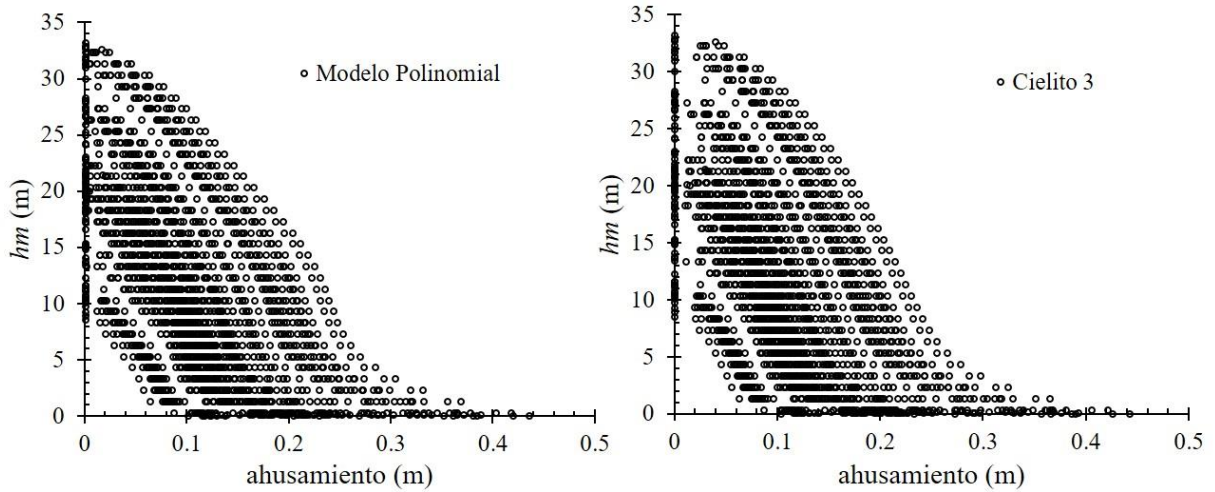


Figura 3.1. Predicción del perfil de árboles de clones de *E. urophylla* con los modelos Polinomial de quinto orden y Cielito 3 en Huimanguillo, Tabasco, México.

El comparativo de valores de diámetro observado *versus* diámetro predicho, deja ver su similitud (Figura 3.2) y la tendencia congruente con lo encontrado en los modelos de Ormerod, Forslund, Kozak y González en valores altos de *d* (Lara, 2011).

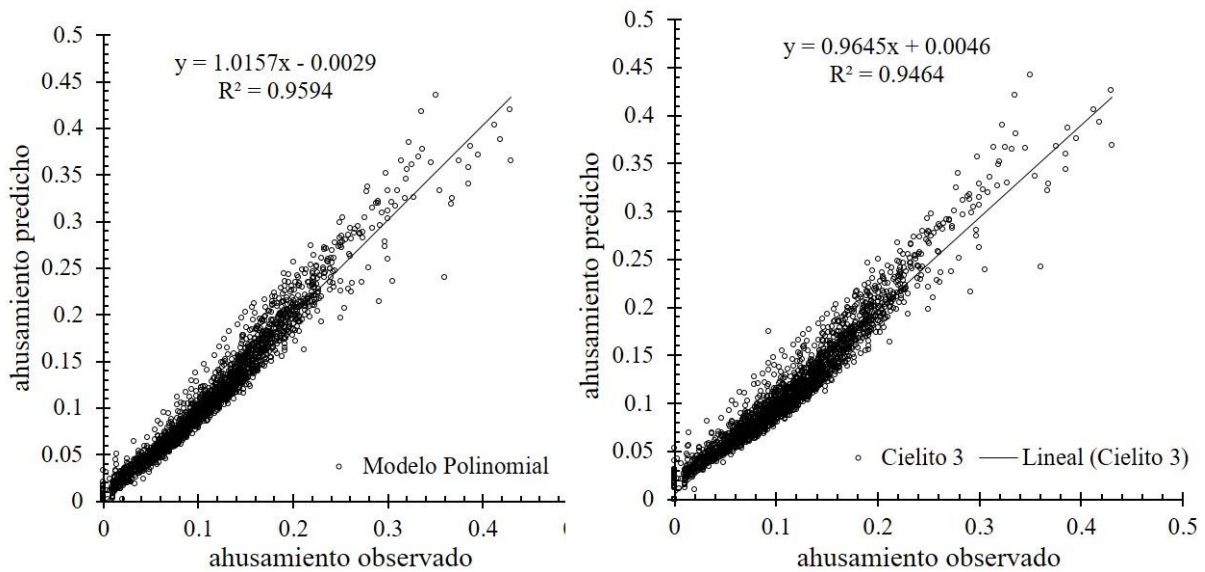


Figura 3.2. Diámetro observado vs predicho de los modelos de ahusamiento Polinomial de quinto orden y Cielito 3 ajustados para árboles clonales de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

En el análisis gráfico de los residuales de los modelos Polinomial de quinto orden y Cielito 3, no indica problemas de heterocedasticidad de la varianza (Figura 3.3), resultado que coincide a lo reportado por Fassola *et al.* (2007) al analizar el modelo de ahusamiento de Bi en *E. grandis*

y Lara (2011) para *Tectona grandis*, donde se analizaron los modelos de Forslund, González, Kozak, Ormerod y Polinomial de quinto orden.

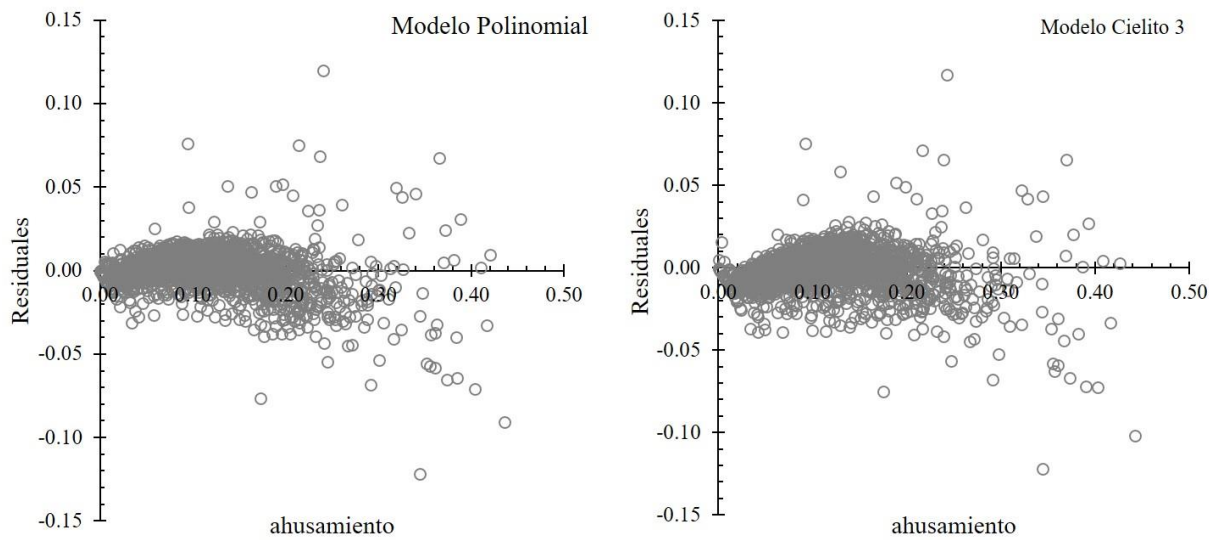


Figura 3.3. Residuales de los modelos seleccionados para ahusamiento de árboles clonales de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Al verificar los errores porcentuales de la estimación del ahusamiento a diferentes alturas del fuste en los modelos corregidos, se observa que la desviación de las estimaciones en los dos modelos seleccionados está por debajo del 12 % en la parte del árbol que corresponde desde la base hasta el diámetro normal, en el resto los errores de las predicciones son menores al 2 % (Figura 3.4). La distribución de los errores porcentuales a lo largo del fuste se distribuyen de forma semejante a lo reportado por Fassola *et al.* (2007) al ajustar modelos de ahusamiento de forma variable en *E. grandis*, donde concuerda que la mayor proporción de ellos se encuentra en las partes inferiores a la altura del diámetro normal.

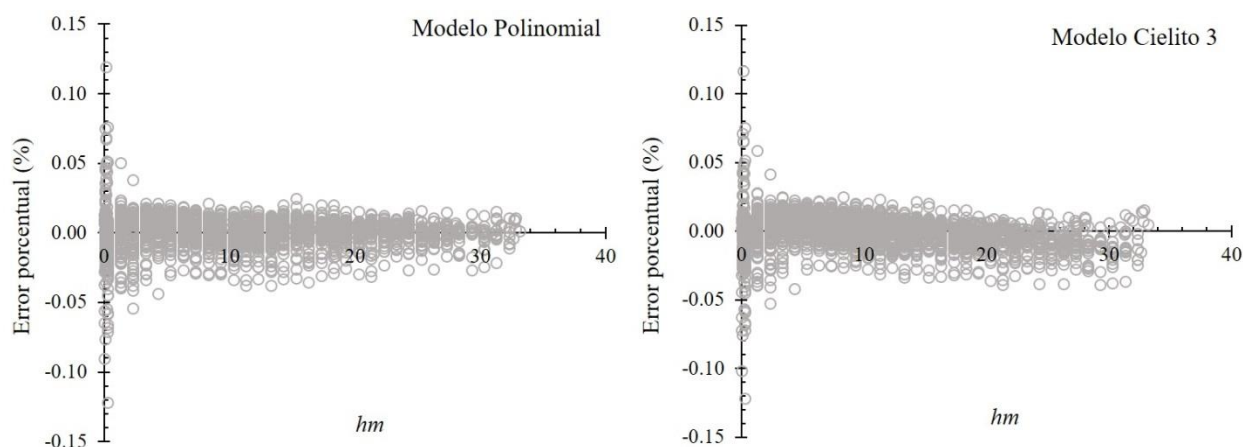


Figura 3.4. Error porcentual de estimación del  $d$  a distintas alturas en el fuste mediante los modelos Polinomial quinto orden y Cielito 3 ajustados para árboles clonales de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Considerando los menores valores en la  $SCE$ , el  $CME$ , la  $RCME$  y  $CV$ , los mayores estadísticos de  $R^2_{aj}$  y  $DW$ , además de no presentar problemas aparentes de heterocedasticidad y desviaciones en la estimación, se eligió como el mejor al modelo Polinomial de quinto orden (modelo 8, Cuadro 3.1) para la descripción del perfil fustal de árboles clonales de *E. urophylla* en condiciones de plantación.

El modelo seleccionado ha demostrado ser confiable en la descripción del perfil del árbol. Lara (2011) y Orfano *et al.* (2006) encontraron buenos resultados para teca en Brasil al usar diversos tipos de modelos polinomiales, mientras que en Argentina, Fassola *et al.* (2007) y Crechi *et al.* (2008) obtuvieron buenos ajustes para *E. grandis* y *Grevillea robusta*, respectivamente.

Para estimar la altura comercial a cualquier diámetro de interés en punta del fuste con el modelo propuesto, la ecuación que estima  $hm$  presenta en su solución raíces imaginarias que pueden ser reducidas algebraicamente hasta ser eliminadas.

Por ello, la solución se obtuvo en dos formas, la primera de ellas es implementando el cálculo a través de una aproximación numérica para alturas a diferentes secciones, donde  $d = d_c$ , en el cual el valor de la celda  $hm$  es cambiante y arroja la solución con el uso de la herramienta SOLVER del paquete Excel. La expresión utilizada es la siguiente:

$$0 = d_c - [dn(\beta_1 + \beta_2 X + \beta_3 X^2 + \beta_4 X^3 + \beta_5 X^4 + \beta_6 X^5)] \quad (13)$$

Donde  $X_i$  = Aproximación de SOLVER a cero y  $d_c$  = Diámetro comercial establecido.

La segunda forma para obtener la  $hm$  a cualquier diámetro límite de utilización es la que proponen Cruz-Cobos *et al.* (2008), en donde se recomienda emplear el método iterativo proponiendo una solución parcial y redundante en  $X$ . La aproximación al valor buscado es el producto de la multiplicación del valor de dicha solución parcial ( $X_j$ ) y la altura total ( $H$ ), con la cual se define este valor parcial cuando la diferencia absoluta estimada entre una solución previa y la utilizada, sea constante o la menor posible posterior al realizar las iteraciones necesarias. La expresión para este modelo es la siguiente.

$$X_j = \frac{\frac{d_c}{dn} - \beta_1}{(\beta_2 + \beta_3 X + \beta_4 X^2 + \beta_5 X^3 + \beta_6 X^4)} \quad (14)$$

Donde  $X_j$  = Es la aproximación iterativa y solución parcial para  $hm$ .

Al verificar en los dos procedimientos la convergencia cuando  $d = dn$ , se obtuvo que  $hm$  es igual a la altura de 1.3 m y con respecto a  $H$  la desviación en promedio es menor al 1 %, situación deseable para estimar la altura a cualquier diámetro establecido o calcular el  $V_c$  con las dimensiones dadas.

Para determinar el cambio de forma dendrométrica del fuste en porcentaje con respecto a la altura total, se utilizaron los valores estimados de los parámetros y la segunda derivada ( $\partial^2$ ) con respecto a  $X$  del modelo polinomial de quinto orden, donde se obtuvo una solución y el valor resultante se sustituyó en la ecuación original para conocer los puntos de inflexión. Se determinó que los árboles de *E. urophylla* tienen tres puntos de cambio y cuatro forma definidas, estos puntos ocurren en promedio al 36, 50 y 73 % de la  $H$ . De tal manera que, el árbol desde el suelo hasta el primer punto de inflexión es de forma neiloide, seguido de una parte del fuste cilíndrica y posterior una forma de paraboloides, mientras que la punta tiene una forma de cono.

Al integrar  $d$  con respecto a  $hm$  de la expresión (12) y obtener  $V_t$  desde el tocón a la punta (15), donde los parámetros  $\beta_n$  son los valores a estimar, se obtiene que la función para estimar el  $V_t$  tiene la forma:

$$V_t = dn^2 \left( \begin{aligned} & \beta_1 hm + \frac{\beta_2 hm^{11}}{H^{10}} + \frac{\beta_3 hm^{10}}{H^9} + \frac{\beta_4 hm^9}{H^8} + \frac{\beta_5 hm^8}{H^7} + \frac{\beta_6 hm^7}{H^6} \\ & + \frac{\beta_7 hm^6}{H^5} + \frac{\beta_8 hm^5}{H^4} + \frac{\beta_9 hm^4}{H^3} + \frac{\beta_{10} hm^3}{H^2} + \frac{\beta_{11} hm^2}{H} \end{aligned} \right) \quad (15)$$



Al incluir los parámetros del modelo de ahusamiento para su simplificación, se obtuvo un modelo de tipo factor de forma constante donde  $V_t=0.32204dn^2H$ , que puede ser utilizado para la estimación del volumen total en árboles de esta especie en las PFC referidas.

Para complementar la descripción del perfil del árbol y realizar estimaciones precisas de volumen comercial a diferentes alturas del fuste o determinar la distribución de productos, se obtuvo el modelo de  $V_c$  compatible con la función de ahusamiento. Este modelo es el resultado de la integración matemática el modelo polinomial de quinto orden con respecto a  $hm$  definiendo los límites entre la altura total y la altura del tocón ( $H_t$ ) de la expresión (12). La forma final posterior a una simplificación matemática de la ecuación de volumen comercial ( $V_c$ ), es la que se indica a continuación:

$$V_c = \frac{\pi \times dn^2}{4} \frac{1}{H^{10}} \left[ \begin{array}{l} \left( \beta_1^2 H^{10} hm + \frac{2\beta_1\beta_3 + \beta_2^2}{3} H^8 hm^3 + \frac{2\beta_1\beta_5 + 2\beta_2\beta_4 + \beta_3^2}{5} H^6 hm^5 + \right. \\ \left. \frac{\beta_1\beta_6 + \beta_2\beta_5 + \beta_3\beta_4}{3} H^5 hm^6 + \frac{\beta_1\beta_4 + \beta_2\beta_3}{2} H^7 hm^4 + \beta_1\beta_2 H^9 hm^2 + \right. \\ \left. \frac{2\beta_2\beta_6 + 2\beta_3\beta_5 + \beta_4^2}{7} H^4 hm^7 + \frac{\beta_3\beta_6 + \beta_4\beta_5}{4} H^3 hm^8 + \right. \\ \left. \frac{2\beta_4\beta_6 + \beta_5^2}{9} H^2 hm^9 + \frac{\beta_5\beta_6}{5} H hm^{10} + \frac{\beta_6^2}{11} hm^{11} \right) \end{array} \right] \quad (16)$$

El ajuste de la ecuación de volumen comercial resultante de la integración del modelo polinomial de quinto orden, por si sola, tiende a presentar parámetros no significativos, sin embargo, la inclusión en un sistema simultáneo de las expresiones (8) y (16), no presenta este inconveniente debido a que se rompe la colinealidad entre sus parámetros. Lo anterior, hace posible estimar de forma confiable el volumen comercial a un diámetro o altura dada; la expresión concuerda con lo obtenido por Orfanó *et al.* (2006) y Lara (2011) para este modelo.

Al ajustar de forma simultánea el sistema compatible de ahusamiento-volumen comercial utilizando la técnica de máxima verosimilitud, se observan problemas de autocorrelación y heterocedasticidad, por lo cual, se decidió agregar un retardo ( $lar(1)$ ) tanto al  $d$  como al  $V_c$  para corregir el problema, además de ponderar los residuales de este último para reducir el problema de residuales. Diéguez-Aranda *et al.* (2009) señalan que cuando se estiman todos los parámetros del sistema de manera simultánea, se optimiza la suma de cuadrados de los errores. Con ello, se logra minimizar los errores en la predicción tanto del diámetro a diferentes alturas, como del volumen. Los valores de los parámetros son significativos y los estadísticos del ajuste

simultáneo del sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial son adecuados (Cuadro 3.5)

Los estadísticos de ajuste tanto para  $d$  como  $V_c$  indican una descripción de los datos superior al 96 %, siendo significativos todos sus parámetros, esta situación es indicativo de un buen ajuste estadístico a los datos utilizados. Por otro lado y con la decisión de corregir la autocorrelación en  $d$  el valor de la prueba de  $DW$  resulto igual a 1.83 situación que indica la inexistencia de estos problemas de acuerdo a lo que indican Barrios *et al.* (2014) al acercarse el valor a 2 en la prueba de Durbin-Watson. Sin embargo, en este tipo de ajustes, se deberá examinar de forma gráfica el contraste entre las variables observadas y las predichas.

Cuadro 3.5. Valores de los estadísticos y parámetros del ajuste simultaneo de ahusamiento y volumen comercial para *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Modelo	<i>SCE</i>	<i>RCME</i>	$R^2_{ajustada}$	Parámetros	Estimación	<i>EEA</i>	Valor de <i>t</i>	<i>Pr &gt;  t </i>
$d$	0.274	0.012	0.966	$\beta_1$	1.0399	0.0047	221.85	<.0001
$V_c$	1.779	0.030	0.979	$\beta_2$	-1.1466	0.0304	-37.70	<.0001
				$\beta_3$	-0.2389	0.0384	-6.23	<.0001
				$\beta_4$	0.8769	0.0666	13.17	<.0001
				$\beta_5$	0.6111	0.1145	5.34	<.0001
				$\beta_6$	-0.9743	0.0126	-77.44	<.0001
				$p1d$	0.5823	0.0073	80.30	<.0001

*SCE*: Suma de Cuadrados del Error. *RCME*: Raíz del Cuadrado Medio del Error.  $R^2_{aj}$ : Coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros. *EEA*: Error estándar aproximado.

En la Figura 3.5 (a y b), se muestra la tendencia de las estimaciones del volumen acumulado ( $V_c$  acumulado) con respecto al  $d$  y  $hm$ , las cuales, son semejantes a las reportadas por Tamarit *et al.* (2013) para la estimación con el modelo de  $V_c$ , además, se comparó los datos observados contra los predichos del modelo (Figura 5c).

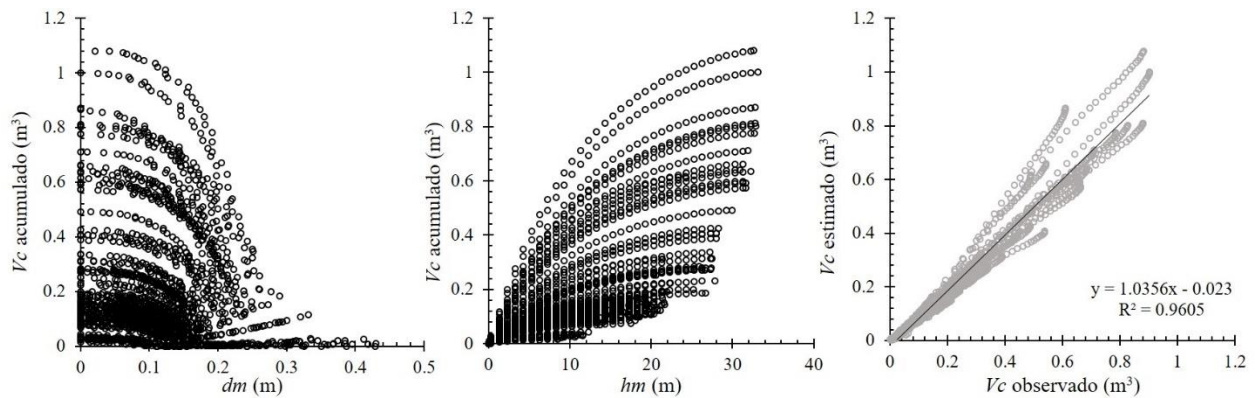


Figura 3.5. Comportamiento entre el  $d$  y  $hm$  con respecto al  $V_c$  (a y b) y grafica de datos observados vs predichos del modelo de  $V_c$  (c) para *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Las estimaciones de  $V_c$  con la función generada a partir del modelo polinomial de quinto orden son buenas ya que el sesgo promedio es de apenas el 4.41 %, puede presentar el inconveniente de que el sesgo aumente y el  $V_c$  se sobreestime en árboles grandes con volúmenes comerciales superiores a  $0.4 \text{ m}^3$ , situación que se asume es debida que se tuvo poca información para ese tipo de árboles en la muestra. En el caso del ahusamiento, para la modelación del perfil fustal se deberán de utilizar los valores de los parámetros obtenidos al ajustar el modelo polinomial de quinto orden y no los obtenidos del ajuste del sistema compatible.

### 3.6. CONCLUSIONES

El modelo de ahusamiento de tipo polinomial de quinto orden fue consistente en el ajuste estadístico y en la estimación de los diámetros a cualquier altura del árbol, además de que identifica la existencia de tres puntos de inflexión y cuatro formas dendrométricas características en el fuste, por lo que fue seleccionado como el mejor para modelar el perfil fustal y el volumen total y comercial de cada árbol de clones en las plantaciones de *E. urophylla*.

La función de perfil del árbol propuesta, puede ser utilizada para describir el ahusamiento y determinar la altura a cualquier diámetro establecido, situación que permite estimar la distribución de productos o el volumen comercial en los arboles de las plantaciones forestales comerciales existentes. Sin embargo, por ser una especie de rápido crecimiento y de constante mejoramiento genético (clones), la actualización continua de este tipo de herramientas silvícolas es esencial para cálculos más precisos en el tiempo de establecimiento, crecimiento y desarrollo de PFC con nuevos clones.

La ecuación de forma variable derivada del modelo (15) para estimar el volumen total puede ser utilizada de forma confiable, sin embargo, la expresión compatible ajustada de forma simultánea para el calcular el volumen comercial (Modelo 16) aunque tiene buenos valores estadísticos, tienen a presentar sesgos, adicionalmente, para modelar el ahusamiento se sugiere utilizar los parámetros obtenidos del ajuste en el modelo polinomial de quinto orden o bien probar en su ajuste la inclusión de efectos aleatorios que permitan evaluar el efecto de la variabilidad de la base genética y el perfil cambiante de los árboles.

### 3.7. LITERATURA CITADA

- Álvarez, J. G., M. Barrio, F. Castedo-Dorado, U. Diéguez-Aranda, y A. D. Ruiz-González. 2005. Modelos para la gestión forestal: una revisión de las metodologías de construcción de modelos de masa. 5° Congreso Forestal Nacional, Portugal. 13 p.
- Augusto, C. T., J. O. Vargas M. y M. Escalier H. 2009. Ajuste y selección de modelos de regresión para estimar el volumen total de árboles. Documento Técnico No. 5. Escuela de Ciencia Forestales de la Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia. 27 p.
- Barrio, A., A. M. López y V. Nieto. 2014. Predicción de volúmenes comerciales de *Eucalyptus grandis* a través de modelos de volumen total y de razón. Colombia Forestal 17:137-149.
- Barreto-Medel, H., D. Álvarez-Lazo e Y. Alonso-Torrens. 2013. Modelos del perfil de fuste para *Pinus caribea* var. *Caribea* en la provincia Pinar del Río. Revista Científica Avances 14:259-268.
- Bruce, D., R. Curtis, y G. Vancoevering. 1968. Development of a system of taper and volume tables for red alder. Forest Science 14: 656-658.
- Cancino C., J. O. 2006. Dendrometría básica. Concepción: Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento e manejo de Bosques y Medio Ambiente. <http://repositorio.udec.cl/xmlui/handle/123456789/407> (Consulta: Diciembre, 2015).
- Castedo, D. F. y J. G. Álvarez G. 2000. Construcción de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Pinus radiata* D. Don en Galicia basada en una función de perfil del tronco. Investigación Agraria; Sistema de Recursos Forestales 9: 253-268.

- Cellini, J. M., M. Galarza, S. L. Burns, G. J. Martínez-Pastur and M. V. Lencinas. 2012. Equations of bark thickness and volume profiles at different heights with easy-measurement variables. *Forestry Systems* 21:23-30.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2012. Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. México: Comisión Nacional Forestal. Disponible en <http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/plantaciones-forestales/> (Consulta: Diciembre, 2015).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2015. <http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/plantaciones-forestales/> (Consulta: Diciembre, 2015).
- Corral R., S., J. J. Nívar C. y F. Fernández S. 1999. Ajuste de funciones de ahusamiento a los perfiles fustales de cinco Pináceas de la región de El Salto, Durango. *Madera y Bosques* 5:53-65.
- Crechi, E., A. Keller y H. Fassola. 2008. Desarrollo de una ecuación de forma-volumen relativo para la estimación de diferentes volúmenes de *Grevillea robusta* A. en Misiones, Argentina. XIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM-EEA Montecarlo, INTA. [http://inta.gob.ar/documentos/desarrollo-de-una-ecuacion-de-forma-para-la-estimacion-de-diametros-volumenes-a-diferentes-alturas-en-grevillea-robusta-a-cultivado-en-misiones-argentina/at\\_multi\\_download/file/INTA-ecuacion-diametro-volumenes-grevillea.pdf](http://inta.gob.ar/documentos/desarrollo-de-una-ecuacion-de-forma-para-la-estimacion-de-diametros-volumenes-a-diferentes-alturas-en-grevillea-robusta-a-cultivado-en-misiones-argentina/at_multi_download/file/INTA-ecuacion-diametro-volumenes-grevillea.pdf) (Consulta: Diciembre, 2015).
- Cruz-Cobos, F., H. M. De los Santos-Posadas y J. R. Valdez-Lazalde. 2008. Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia* 42: 473-485.
- Diéguez-Aranda, U., A. Alboreca R, F. Castedo-Dorado, J. G. Álvarez-González, M. Barrianta, F. Crecente-Campo, J. M. González-González, C. Pérez-Cruzado, R. Rodríguez-Soalleiro, C. A. López-Sánchez, M. A. Balboa-Murias, J. J. Gorgoso-Varela y F. Sánchez Rodríguez. 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Xunta de Galicia. Lugo, España. 259 p.
- Gezan, A. S., P. C. Moreno M. y A. Ortega. 2009. Modelos fustales para renovales de roble, raulí y coigüe en Chile. *Bosques* 30: 61-69.

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2010. Principales resultados: Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. FAO. Roma, Italia. 12 p.
- Fassola, H. E., E. Crechi, A. Keller y S. Barth. 2007. Funciones de forma de exponente variable para estimación de diámetros a distintas alturas en *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden., cultivadas en la Mesopotamia, Argentina. Revista de Investigaciones Agropecuarias 36:109-128.
- Institute Inc. Statistical Analysis System. 2008. SAS/STAT® 9.2 User's Guide Second Edition. SAS Institute Inc. Raleigh, NC USA. s/p. <https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statugmcmc/63125/PDF/default/statugmcmc.pdf> (Consulta: Diciembre, 2015).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía-México). 2005. Marco Geoestadístico Municipal 2005, versión 3.1. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/27/27008.pdf> (Consulta: Diciembre, 2015).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía-México). 2014. México en el mundo 2014. INEGI. Aguascalientes, México. 619 p.
- Kozak, A. 1997. Effects of multicollinearity and autocorrelation on the variable-exponent taper functions. Canadian Journal of Forest Research 27: 619-629.
- Kozak, A., D. Munro, y J. Smith. 1969. Taper functions and their application in forest inventory. The Forestry Chronicle 45: 1-6.
- Kozak, A. 1988. A variable-exponent taper equation. Canadian Journal of Forest Research. 18: 1363-1368.
- Lara, V., C. E. 2011. Aplicación de ecuaciones de conicidad para teca (*Tectona grandis* L.F.) en la zona costera ecuatorial. Ciencia y Tecnología 4:19-27.
- Maldonado-Ayala, D. y J. J. Návar Ch. 2000. Ajuste de funcionales de ahusamiento de cinco especies de pino en plantaciones en la Región del Salto, Durango. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 6: 159-164.
- Orfanó, F. E., J. R. Soares S. y A. Donizette O. 2006. Seleção de modelos polinomiais para representar o perfil e volume do fuste de *Tectona grandis* L.f. Acta Amazonica 36:165-482.

- Overbeek, W., M. Kröger y F. Gerber J. 2012. Una panorámica de las plantaciones industriales de árboles en los países del Sur. Conflictos, tendencias y luchas de resistencia. Informe de Environmental Justice Organizations, Liabilities and Trade n° 3, 104 p.
- Pompa-García, M., C. Hernández, J. A. Prieto-Ruíz y R. Dávalos S. 2009. Modelación del volumen fustal de *Pinus duranguensis* en Guachochi, Chihuahua, México. *Madera y Bosques* 15:61-73.
- Pompa G., M., J. J. Corral R, M. A. Díaz V. y M. Martínez S. 2009. Función de ahusamiento y volumen compatible para *Pinus arizonica* Engelm., en el Suroeste de Chihuahua. *Revista Ciencia Forestal en México* 34:119-136.
- Prodan, M., R. Peters, F. Cox, y P. Real. 1997. *Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación de Desarrollo Sostenible.* Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/BMZ/GTZ. San José, Costa Rica. 561 p.
- Sakici, O. E., N. Misira, H. Yavuz and M. Misira. 2008. Stem taper functions for *Abies nordmanniana* subsp. *bornmulleriana* in Turkey. *Scandinavian Journal of Forest Research* 23: 522-533.
- SEMARNAT-CONAFOR (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional Forestal). 2014. Boletín 77. CONAFOR. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/5752M%C3%A9xico%20cuenta%20con%20270%20mil%20hect%C3%A1reas%20de%20%20Plantaciones%20Forestales%20Comerciales.pdf> (Consulta: Diciembre, 2015).
- Sterba, H. 1980. Stem curves: a review of the literature. *Forestry Abstracts* 41(4): 141-145
- Tamarit, U., J. C., H. M. De los Santos P., A. Aldrete, J. R. Valdez-Lazalde, H. Ramírez M. y V. Guerra C. 2013. Sistema de cubicación para árboles individuales de *Tectona grandis* L. f. mediante funciones compatibles de ahusamiento – volumen. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5: 58-74.
- Tapia, J. y J. J. Nívar Ch. 2011. Ajuste de modelos de volumen y funciones de ahusamiento para *Pinus pseudostrobus* Lindl., en Bosques de pino de la Sierra Madre Oriental de Nuevo León, México. *Foresta Veracruzana* 13:19-28.
- Torres, R. J. M. y O.S. Magaña, T. 2001. *Evaluación de Plantaciones Forestales.* Editorial Limusa. D.F., México. 472 p.

- Trincado, G. y C. Leal D. 2006. Ecuaciones locales y generalizadas de altura-diámetro para pino radiata (*Pinus radiata*). *Bosque* 27:23-34.
- Verbeek, M. 2004. A guide to modern econometrics, 2 ed. West Sussex: John Wiley & Sons. 429 p.
- Zimmerman, D., L. and V. Núñez-Antón. 2001. Parametric modelling of growth curve data: An overview (with discussion). *Test* 10:1-73.



## CAPÍTULO IV

### 4. SISTEMA COMPATIBLE DE AHUSAMIENTO Y VOLUMEN COMERCIAL PARA PLANTACIONES DE *Eucalyptus urophylla* EN TABASCO, MÉXICO

#### 4.1. RESUMEN

El uso de funciones que describan el perfil de un árbol y su distribución de productos en plantaciones forestales es esencial para cuantificar y valorar las existencias maderables. Con la hipótesis de que las plantaciones forestales comerciales de esta región han cambiado en forma y volumen con el empleo de material vegetativo diferente, el objetivo fue ajustar un sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial ( $d-Vc$ ) para tres fuentes genotípicas de *Eucalyptus urophylla* cultivadas en Tabasco, México. Con información de 175 árboles de clones medidos en 2007 (E1), 93 clones diferentes evaluados en 2014 (E2), y 459 árboles provenientes de semilla medidos en 2007 (E3), se verificaron las diferencias de las variables de diámetro normal, altura y volumen de las muestras en las tres poblaciones. Al estimar los parámetros estadísticos simultáneamente con el método de máxima verosimilitud e información completa, el modelo generalizado de Fang y Bailey, ajustado con una muestra de cada población, presentó la mejor calidad de ajuste para estimar el ahusamiento y volumen comercial. Los problemas de heterocedasticidad y autocorrelación se corrigieron con una ponderación en  $Vc$  dentro de los residuales y la inclusión de una estructura autoregresiva (CAR(X)) dentro del modelo. El modelo ajustado mostró una descripción en  $d$  y  $Vc$  mayor del 96 %, sesgos bajos y diferencias agregadas en las estimaciones menores al 5 % en  $Vc$ . Al comparar estadísticamente la homogeneidad del modelo utilizado, resultó que los tres ajustes son diferentes, lo que sugiere que la forma del perfil de los árboles ha cambiado con el paso del tiempo, posiblemente debido a los criterios de selección del material vegetativo, al origen de la semilla y a las prácticas silviculturales empleadas.

**Palabras clave:** Perfil del fuste, distribución de productos, estimación simultánea, máxima verosimilitud, *Eucalyptus urophylla*.

## COMPATIBLE TAPER AND VOLUME SYSTEM FOR COMMERCIAL PLANTATIONS OF *Eucalyptus urophylla* IN TABASCO, MEXICO

### 4.2. ABSTRACT

The use of taper functions to describe tree profile and its product distribution in forest plantations is essential to quantify and value timber stocks. In this study we use as a main hypothesis that commercial forest plantations in the region have changed taper and volume due to the constant change of vegetative material. Data was obtained for three genotypic sources of *Eucalyptus urophylla* growing in Tabasco, Mexico. With information of 175 cloned trees measured in 2007 (E1), 93 different clones evaluated in 2014 (E2), and 459 trees coming from non-selected seed measured in 2007 (E3). By estimating the statistical parameters simultaneously with the maximum likelihood method, the generalized model of Fang and Bailey, fitted by each sample presented the best fit quality to estimate the taper and commercial volume. Heterocedasticity and autocorrelation problems were corrected with a weighting in  $V_c$  within the residuals and the inclusion of an autoregressive structure (CAR (X)) in the model. Statistically significant differences among sources were detected.

**Key words:** Bole profile, product distribution, simultaneous estimation, maximum likelihood, *Eucalyptus urophylla*.

### 4.3. INTRODUCCIÓN

La estimación precisa de las existencias volumétricas es esencial en la planeación del manejo y aprovechamiento forestal maderable (Casnati *et al.*, 2014; Martínez-López y Acosta-Ramos, 2014), además es una fuente de información básica en los inventarios (Corral-Rivas y Nívar-Chaidez, 2009) de bosques naturales o plantaciones forestales comerciales (PFC). Particularmente, las PFC deben contar con un sistema confiable de cuantificación del volumen total ( $V_t$ ) y volumen comercial ( $V_c$ ) de los árboles individuales en pie para su valoración económica (Tamarit *et al.*, 2013) y gestión mediante simulación matemática (Tapia y Nívar, 2011).

El cálculo del  $V_t$  generalmente se realiza a través de funciones matemáticas de doble entrada (Prodan *et al.*, 1997; Tamarit *et al.*, 2013). El cálculo del  $V_c$  se puede hacer mediante funciones de ahusamiento ( $d$ ) o modelos de razón de volumen ( $r$ ) (Prodan *et al.*, 1997), ambas metodologías describen el perfil del árbol en base al diámetro y facilitan la estimación del  $V_c$  a cualquier altura del fuste o tamaño en diámetro comercial específico, así como la distribución de productos (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009; Quiñonez-Barraza *et al.*, 2014).

Los modelos de ahusamiento, se clasifican de acuerdo a su complejidad matemática y a la cantidad de coeficientes y variables incluidas (Quiñonez-Barraza *et al.*, 2014). Entre estos se encuentran los modelos simples (Ormerod, 1973), de exponente variable (Kozak, 1988), modelos segmentados (Cao *et al.*, 1980) y los que incorporan principios geométricos y trigonométricos (Parresol y Tomas, 1996; Zhang *et al.*, 2002). Cualquiera que sea su estructura matemática, este tipo de modelos pueden hacerse compatibles con una función de  $V_t$  o de volumen parcial ( $V_p$ ), mediante su integración matemática (Cruz-Cobos *et al.*, 2008). Si se desea evitar la integración, se puede ajustar directamente un modelo de  $V_c$  y utilizarse en la cubicación y en la estimación de la distribución de productos del arbolado en pie, ya que dentro de los modelos de  $V_c$  existe una función de ahusamiento intrínseca (Clutter, 1980), de la cual podemos obtener mediante la integración una ecuación de  $V_t$  compatible (Pompa y Solís, 2008), si se desea describir por completo con el mismo modelo el perfil del fuste.

Si se define una ecuación de volumen comercial y una de ahusamiento que utilicen los mismos parámetros y una estructura geométrica y matemática común, es posible ajustarlas de forma simultánea como un sistema compatible de ahusamiento-volumen (Demaerschalk, 1972; Cruz-Cobos *et al.*, 2008; Tamarit *et al.*, 2013). El ajuste de este par de ecuaciones por el método

de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) ocasiona que los errores de ambas funciones estén correlacionados y los estimadores teóricos sean robustos, sin embargo se ignoran en  $V_c$  y  $d$  los errores simultáneos que suceden a lo largo del fuste (Hernández *et al.*, 2013), por lo tanto, el ajuste mediante las técnicas de ecuaciones aparentemente no relacionadas (SUR) y máxima verosimilitud con información completa (FIML), son las opciones donde es compatible totalmente el sistema y los estimadores de los parámetros son consistentes y asintóticamente eficientes (Fang *et al.*, 2000; Cruz-Cobos *et al.*, 2008; Hernández *et al.*, 2013).

Con la hipótesis de que las plantaciones forestales comerciales de esta región han cambiado en forma y volumen con el empleo de material vegetativo diferente, el objetivo del estudio fue ajustar un sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para tres fuentes genotípicas de plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake cultivadas en Huimanguillo, Tabasco, México. Estos sistemas son una herramienta de utilidad práctica para los administradores forestales en la toma de decisiones, particularmente en la estimación del inventario volumétrico de forma precisa y en la optimización del cálculo de la distribución de productos maderables del arbolado, previo al aprovechamiento e industrialización de la materia prima existente en las PFC con esta especie.

#### **4.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

El estudio se realizó en Huimanguillo, Tabasco, México en PFC establecidas en terrenos con relieve de tipo lomerío no mayor a 5 % de pendiente y unidad de suelo Feozem. La precipitación promedio anual es de 2,500 mm y temperatura media anual de 26 °C, que en conjunto son condiciones características de un clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Am) (INEGI, 2005).

La base de datos utilizada proviene de la medición realizada en el año 2007 de 175 árboles de clones (E1), de la medición en 2014 de 93 árboles de clones diferentes (E2) y de 459 árboles provenientes de semilla medidos en 2007 (E3). En las dos primeras muestras de las poblaciones (E1 y E2), la edad tuvo un rango de uno a siete años y la muestra de la población E3 varió entre dos a 11 años. Los 727 árboles que conformó la muestra total se eligieron considerando su condición silvícola dominante dentro de cada población, tratando de cubrir la mayor variabilidad fenotípica posible (Torres y Magaña, 2001).

Mediante un muestreo destructivo se midieron las siguientes variables en cada individuo seleccionado: diámetro normal a la altura de 1.3 m ( $dn$ ), diámetro a diferentes alturas ( $d$ ),

partiendo de la base del tocón hasta donde  $hm$  sea igual a la altura total ( $h$ ), diámetro de tocón ( $dt$ ), altura a distintos diámetros ( $hm$ ) hasta llegar a donde  $d$  fuera igual a cero, altura total ( $h$ ) iniciando de la base y concluyendo donde  $d$  sea igual a cero y concuerde con  $h$  y la altura del tocón ( $ht$ ) siendo esta variable de acuerdo a la técnica de corte empleada, todas las mediciones se registraron en metros y se realizaron incluyendo la corteza con una separación entre secciones de un metro de longitud ( $l$ ) hasta llegar a la punta del árbol. En cada troza se midieron los diámetros en los extremos y en la parte media, así como su longitud, todo ello en metros. Para obtener el volumen de cada troza ( $V_{troza}$ ), se utilizó la fórmula de Newton y la del cono para la punta ( $V_{punta}$ ). El volumen total ( $Vt$ ), se calculó con el método de trozas traslapadas propuesto por Bailey (1995).

En total, de la muestra de cada población (E1, E2 y E3) se obtuvieron 1,958; 2,113 y 6,060 pares de datos de  $d$  y  $hm$ . Para comprobar si las poblaciones son estadísticamente diferentes en las variables de diámetro normal, altura total y volumen, se contrastaron las hipótesis siguientes de igualdad de medias.

$H_0 = u_1 = u_2 = \dots u_k$ . Las muestras son iguales a partir de los parámetros que definen su ahusamiento-volumen, no rechazando la hipótesis nula.

$H_1 =$  Al menos dos muestras son distintas y se rechaza la hipótesis nula.

Al contrastar la hipótesis de igualdad de medias ( $u_k$ ), las reglas de decisión que se aplicaron con base a la significancia de  $F$  en la prueba de Duncan ( $Pd$ ) agrupando la muestra de cada población con un nivel de confiabilidad del 95 %.

Los sistemas compatibles de ahusamiento-volumen que se ajustaron y evaluaron en la predicción del  $Vc$  de los árboles muestra de las tres poblaciones de *E. urophylla* a través de la descripción del perfil del fuste (Cuadro 4.1), cumplen con la restricción de que  $hm = h$  cuando  $d = 0$ , condición que hace posible su uso para predecir el  $d$  a cualquier altura del fuste requerida.

Cuadro 4.1. Sistemas compatibles ahusamiento-volumen comercial ajustados en los árboles de las tres muestras de poblaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco.

No.	Modelo	Expresión
(1)	Clutter	$V_c = \exp\left(c_0 dn^{c_1} h^{c_2} \left(1 - \beta_0 d^{\beta_1} dn^{\beta_2}\right)\right)$ $d = \left[ \frac{k(h-hm)}{\beta_0 c_0 dn^{c_1} h^{c_2}} \left(1 - \frac{2}{\beta_1}\right) \right]^{\frac{1}{\beta_1 - 2}}$
(2)	Demaerchalk	$V_c = \frac{kdn^2 \beta_0}{\beta_1 + 1} h \frac{(h-hm)^{\beta_1+1}}{hm^{\beta_1}}$ $d = \sqrt{\beta_0 dn^2 \left(\frac{h-hm}{h}\right)^{\beta_1}}$
(3)	Fang y Bailey caso 1-a	$V_c = \exp\left(c_0 dn^{c_1} h^{c_2} - \beta_0 d^2 (h-hm)\right)$ $d = \sqrt{\frac{c_0}{\beta_0} dn^{c_1} h^{c_2} \frac{k}{\beta_0} \frac{(k-\beta_0)}{(h-hm) \beta_0}}$
(4)	Generalizado de Fang y Bailey	$V_c = \exp\left(c_0 dn^{c_1} h^{c_2} - \beta_0 d^{\beta_1} (h-hm)^{\beta_2}\right)$ $d = \left\{ \frac{(\beta_1 - 2)k}{(\beta_1 - 2\beta_2)\beta_0} \left[ (h-hm)^{1-2\beta_2/\beta_1} - h^{1-2\beta_2/\beta_1} \right] \right\}^{\frac{1}{\beta_1 - 2}} \times (h-hm)^{\beta_2/\beta_1}$ $V_c = \frac{1}{3} kdn^2 \frac{\beta_1}{h^2} hm^3 + \frac{1}{2} kdn^2 \frac{\beta_0}{h \times hm^2} + kdn^2 - \beta_0 - \beta_1 hm$
(5)	Kozak	$d = dn \sqrt{\beta_0 \left(\frac{hm}{h} - 1\right) + \left(\left(\frac{hm}{h}\right)^2 - 1\right)}$
(6)	Lenhart	$V_c = \exp\left(c_0 dn^{c_1} h^{c_2}\right) \beta_0 \times \frac{d^{\beta_1}}{dn^{\beta_1 - 2}} (h - 1.3)$ $d = dn \times \frac{h - hm}{h - 1.3}^{\frac{1}{\beta_1 - 2}}$

$dn$ : Diámetro normal.  $d$ : Ahusamiento.  $h$ : Altura total.  $hm$ : Altura a distintas secciones en el fuste.  $V_c$ : Volumen comercial.  $k$ : Constante métrica cuando el diámetro y la altura están dados en metros ( $\pi/4$ ).  $\beta_n$  y  $c_n$ : Parámetros a ser estimados.

El ajuste simultáneo de los sistemas de ahusamiento-volumen se realizó por tres metodologías donde se emplearon Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), máxima verosimilitud con información completa (FIML) y regresión de ecuaciones aparentemente no relacionadas (SUR). Estos últimos tienen la ventaja de generar estimadores consistentes en los

sistemas y considera los errores simultáneos que ocurren en  $d$  y  $Vc$  a lo largo del fuste. Se utilizó el paquete estadístico SAS 9.2 y el procedimiento MODEL (Institute Inc. Statistical Analysis System, 2008). Para facilitar el ajuste y la obtención de los parámetros en las ecuaciones de forma simultánea, cuando  $hm = h$ , es decir,  $d = 0$ . Se utilizó un valor en este punto de 0.01 y 0.0001 metros, además de una variable indicadora para evitar que tomara el valor de cero a esta altura y así evitar problemas de convergencia y pérdida de datos como lo mencionan Fang *et al.* (2000).

En este tipo de ajustes se asumen que la varianza es distribuida de forma normal y los errores son independientes, además que la media es igual a cero (Gujatari, 2004), sin embargo esto no sucede, ya que se presentan problemas de homogeneidad de varianza, y presencia de autocorrelación y colinealidad, situación que ocasionan que los parámetros resulten ineficientes y que los errores estándar no sean mínimos (Pompa *et al.*, 2009; Hernández *et al.*, 2013).

El problema de heterocedasticidad se corrigió con una función que pondera la varianza de los residuales (Cailliez, 1980; Crecente *et al.*, 2009) por medio de una función exponencial de acuerdo a la metodología sugerida por Harvey (1975). Para corregir el problema de autocorrelación se utilizó un modelo de tipo autoregresivo en tiempo continuo CAR( $X$ ) (Zimmerman y Nuñez-Antón, 2001), decidiendo el retardo aplicado conforme al análisis gráfico de los problemas de autocorrelación de los errores y al evaluar el estadístico de Durbin-Watson ( $DW$ ) que debe ser cercano a 2 (Verbeek, 2004; Barrio *et al.*, 2007 y Barrio *et al.*, 2014) mediante las siguientes expresiones.

$$Y_{ij} = f(X_{ij}, B) + e_{ij} \quad (7)$$

$$e_{ij} = \sum_{k=1}^{k=X} I_k p_k^{h_{ij}-h_{ij-k}} e_{ij-k} + \varepsilon_{ij} \quad (8)$$

Donde,  $Y_{ij}$  es el vector de la variable dependiente;  $X_{ij}$  la matriz de las variables independientes;  $B$  es el vector de los parámetros a estimar;  $e_{ij}$  es el  $j$ -ésimo residuo del árbol  $i$ ;  $I_k = 1$  para  $j > k$  y es 0 para  $j \leq k$ ;  $p_k$  es el parámetro autoregresivo de orden  $k$  a estimar;  $h_{ij}-h_{ij-k}$  es la distancia que separa la altura de medición  $j$ -ésima de la altura de medición  $j$ -ésimo- $k$  en cada árbol ( $h_{ij} > h_{ij-k}$ ) y;  $\varepsilon_{ij}$  es el error aleatorio (Barrio *et al.*, 2014).

La evaluación y selección del mejor modelo se decidió acorde al mayor valor del Coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros ( $R^2_{aj.}$ ) y los menores valores de la Suma

de Cuadrados del Error (*SCE*), Cuadrado Medio del Error (*CME*), la Raíz del *CME* (*RCME*), el Sesgo ( $\bar{E}$ ) y Desviación Agregada en % (*DA %*). Además se evaluó el valor del estadístico Durbin-Watson (*DW*) tal como lo reportan Corral *et al.* (1999) en cinco especies de *Pinus*, Lara (2011) para teca y Barreto-Medel *et al.* (2012) en *Pinus caribea*. Todos estos estadísticos se integraron en un sistema de calificación como lo proponen Sakici *et al.* (2008), asignando valores de uno al seis de forma ascendente en función de la importancia para cada uno de los estadísticos, siendo uno el valor del sistema estadístico y seis el de menor, para que al final la menor sumatoria corresponda al del mejor modelo ajustado.

#### **4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los estadísticos descriptivos básicos de las variables utilizadas expresados en metros muestran que en promedio los árboles de la población E2 son los más altos, con un diámetro normal semejante a los de E3, sin embargo con menor volumen que estos últimos (Cuadro 4.2). El comportamiento de diámetro y volumen comercial con respecto a la altura de los árboles para las tres poblaciones de *E. urophylla* fue adecuado, sin presentar individuos fuera de la forma del fuste promedio (Figura 4.1).



Cuadro 4.2. Estadísticos descriptivos para las variables medidas de las tres muestras de las poblaciones evaluadas de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Muestra	Variable	Media	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
E1 (n = 175 árboles)	<i>dn</i>	0.139	0.254	0.067	0.036
	<i>h</i>	16.598	26.940	6.100	4.810
	<i>d</i>	0.096	0.310	0.010	0.050
	<i>hm</i>	7.255	26.940	0.010	5.315
	<i>Vt</i>	0.138	0.555	0.016	0.104
E2 (n = 93 árboles)	<i>dn</i>	0.188	0.332	0.078	0.059
	<i>h</i>	23.155	33.300	8.540	6.698
	<i>d</i>	0.113	0.430	0.010	0.069
	<i>hm</i>	11.378	33.170	0.010	8.168
	<i>Vt</i>	0.327	0.903	0.020	0.240
E3 (n = 459 árboles)	<i>dn</i>	0.208	0.450	0.025	0.061
	<i>h</i>	22.323	35.300	4.500	5.394
	<i>d</i>	0.137	0.470	0.010	0.072
	<i>hm</i>	9.552	35.300	0.010	7.042
	<i>Vt</i>	0.369	1.511	0.002	0.263

n: Número de árboles muestra. *dn*: Diámetro normal (m). *h*: Altura total (m). *d*: Ahusamiento. *hm*: Altura a diferentes secciones en el fuste (m). *Vt*: Volumen total (m<sup>3</sup>).

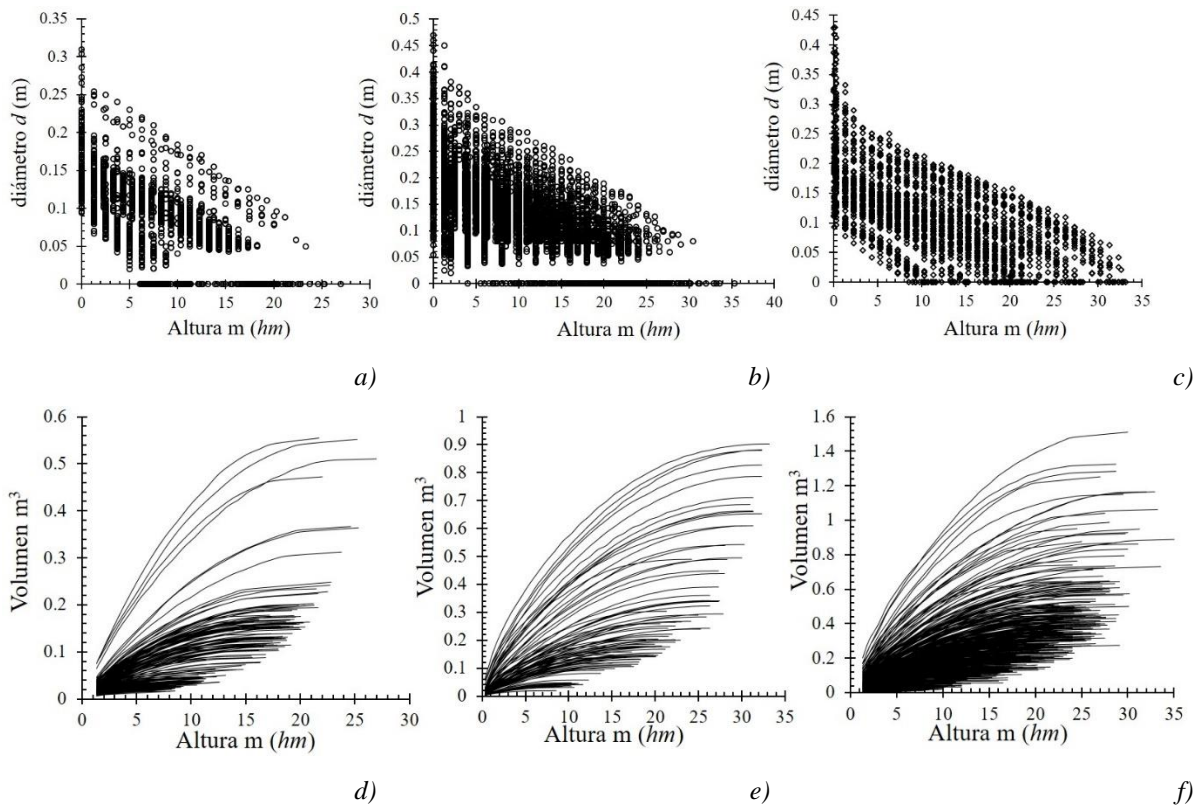


Figura 4.1. Comportamiento del diámetro ( $d$ ) y volumen acumulado ( $Vc$ ) con respecto a la altura del fuste ( $hm$ ) de los árboles de clones E1 (a y d) y E2 (b y e), y semillas E3 (c y f) de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Se realizó un primer ajuste donde los mejores resultados se obtienen al ajustar de forma simultánea las ecuaciones compatibles de  $d$  y  $Vc$  con el método de máxima verosimilitud con información completa (FIML). Esta técnica fue superior a SUR y ha sido utilizada con éxito en otros trabajos (Tamarit *et al.*, 2013; Hernández *et al.*, 2013), debido a que optimiza de mejor forma los parámetros de ahusamiento y volumen comercial, minimiza y homogeneiza los errores estándar y hace que las dos ecuaciones sean completamente compatibles (Borders, 1989; Fang *et al.* 2000).

En este ajuste, todos los parámetros de los seis sistemas compatibles para las muestras de las tres poblaciones evaluadas fueron significativos a un nivel de confiabilidad del 95 %, el Coeficiente de determinación ajustado fue superior a 0.9 y se presentó normalidad en los datos. Sin embargo, se observaron problemas en la distribución de los residuales ya que a medida que aumentó la altura del árbol, se presentó un aumento de la varianza (heterocedasticidad) y el valor de la prueba  $DW$  se mantuvo inferior a 0.9 en todos los casos. Además, en las gráficas de la función de autocorrelación (ACF), se detectan problemas en las dos variables ajustadas.

Los problemas de heterocedasticidad se corrigieron aplicando una función de ponderación a los residuales basada en la variable combinada ( $Residual/((dn^2h)^\phi)^{0.5}$ ). Lo anterior mejoró la distribución de los residuales en todos los sistemas analizados como lo señalan varios autores (Harvey, 1975; Crecente-Campo *et al.*, 2009), donde el valor del parámetro  $\phi$  proviene de la regresión lineal del logaritmo natural ( $\ln$ ) de los residuales del  $Vc$  en función del  $\ln$  de  $dn^2h$ .

Una vez minimizados los errores, hasta donde fuera posible, los problemas de heterocedasticidad y autocorrelación y sin caer en el sobre ajuste estadístico y la pérdida de precisión en las estimaciones, se incluyeron los valores de ajuste en un sistema de clasificación semejante a lo propuesto por Sakici *et al.* (2008) e implementado por Tamarit *et al.* (2013).

Como resultado del sistema de calificación implementado para seleccionar al mejor sistema, se determinó que en las muestras obtenidas de las poblaciones E2 y E3, el modelo generalizado de Fang y Bailey fue el que presentó el menor valor en el sistema de calificación aplicado para el promedio de las variables de  $Vt$  y  $d$ , mientras que en E1 el modelo de Fang y Bailey caso-1 fue el de menor valor, seguido del modelo generalizado de Fang y Bailey, el cual fue seleccionado como el mejor debido a que en el primero la precisión de estimaciones de ahusamiento es inferior y que no se corrige completamente la autocorrelación dentro del modelo.

Los valores de los parámetros los cuales en todos los casos fueron significativos, señalan un ajuste adecuado, además de que sus respectivos errores estándar aproximados ( $Eea$ ) son muy pequeños para las tres poblaciones de *E. urophylla* (Cuadro 4.3). En los  $Eea$  se observó que al realizar las correcciones por autocorrelación aplicando retardos dentro de los modelos, estos se hacen más pequeños, mientras que los valores de  $t$  y la prueba de  $DW$  incrementan.

Cuadro 4.3. Parámetros, estimadores y error estándar aproximado (*Eea*) de los parámetros del sistema compatible derivado del modelo generalizado de Fang y Bailey para las muestras de las tres poblaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Muestra	VARIABLES	Parámetros	Estimadores	<i>Eea</i>	Valor de t	Pr >  t
<i>E1</i> (n = 175 árboles)	<i>Vc</i>	<i>c</i> <sub>0</sub>	0.1275	0.0065	19.46	<.0001
		<i>c</i> <sub>1</sub>	1.6144	0.0115	140.26	<.0001
		<i>c</i> <sub>2</sub>	1.1148	0.0123	90.79	<.0001
	<i>d</i>	<i>B</i> <sub>0</sub>	0.0294	0.0017	17.04	<.0001
		<i>B</i> <sub>1</sub>	1.3564	0.0139	97.61	<.0001
		<i>B</i> <sub>2</sub>	1.3983	0.0131	107.07	<.0001
		<i>p</i> <sub>1</sub>	1.1210	0.0035	317.31	<.0001
		<i>p</i> <sub>2</sub>	0.9796	0.0049	199.54	<.0001
		<i>p</i> <sub>3</sub>	0.7830	0.0064	123.03	<.0001
<i>E2</i> (n = 93 árboles)	<i>Vc</i>	<i>c</i> <sub>0</sub>	0.0074	0.0007	10.54	<.0001
		<i>c</i> <sub>1</sub>	0.9354	0.0132	71.1	<.0001
		<i>c</i> <sub>2</sub>	1.6492	0.0232	71.16	<.0001
	<i>d</i>	<i>B</i> <sub>0</sub>	0.0011	0.00007	15.26	<.0001
		<i>B</i> <sub>1</sub>	0.5195	0.0093	56.1	<.0001
		<i>B</i> <sub>2</sub>	2.0155	0.0168	119.69	<.0001
		<i>p</i> <sub>1</sub>	0.5549	0.0070	79.67	<.0001
		<i>p</i> <sub>3</sub>	0.1318	0.0037	35.54	<.0001
<i>E3</i> (n = 459 árboles)	<i>Vc</i>	<i>c</i> <sub>1</sub>	1.5361	0.0041	374.21	<.0001
		<i>c</i> <sub>2</sub>	1.0711	0.0076	140.9	<.0001
		<i>B</i> <sub>0</sub>	0.0448	0.0022	20.6	<.0001
	<i>d</i>	<i>B</i> <sub>1</sub>	1.3865	0.0078	177.08	<.0001
		<i>B</i> <sub>2</sub>	1.2824	0.0129	99.27	<.0001
		<i>p</i> <sub>1</sub>	0.8210	0.0048	170.43	<.0001
		<i>p</i> <sub>2</sub>	0.8449	0.0036	235.86	<.0001
		<i>p</i> <sub>3</sub>	0.7719	0.0042	183.03	<.0001

*d*: Ahusamiento. *Vc*: Volumen comercial. n: Número de árboles muestra. *c*<sub>0</sub>, *c*<sub>1</sub>, *c*<sub>2</sub>, *B*<sub>1</sub>, *B*<sub>2</sub> y *B*<sub>3</sub>: Parámetros estimados del sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial. *p*<sub>1</sub>, *p*<sub>2</sub> y *p*<sub>3</sub>: Número de retardos aplicados a ambos modelos para corregir la autocorrelación.

En los estadísticos de bondad de ajuste y la prueba de *DW* de los tres sistemas compatibles obtenidos con el modelo generalizado de Fang y Bailey se puede observar que el ajuste y descripción de la muestra por población tanto para *Vc* como para *d* fue superior al 96 % y los valores de *SCE* y *RCME* fueron pequeños (Cuadro 4.4), mientras que la corrección por autocorrelación solo se hizo en una de las variables, eligiendo para ello la que sobrepasara el valor de 1.5 en *DW* con el menor número de retardos posibles y no presentara parámetros no significativos, *R*<sup>2</sup><sub>aj</sub> pequeñas o incrementara el Sesgo de las estimaciones.

Cuadro 4.4. Estadísticos de bondad de ajuste del sistema compatible de ahusamiento ( $d$ ) – Volumen comercial ( $V_c$ ) del modelo generalizado de Fang y Bailey para tres poblaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Muestra	Variable	<i>SCE</i>	<i>CME</i>	<i>RCME</i>	$R^2_{aj.}$	<i>DW</i>
<i>E1</i> (n = 175 árboles)	<i>Vc</i>	0.0535	$0.30 \times 10^{-4}$	0.0055	0.9958	1.64
	<i>d</i>	0.1336	$0.75 \times 10^{-4}$	0.0087	0.9636	0.41
<i>E2</i> (n = 93 árboles)	<i>Vc</i>	1.0177	$5.08 \times 10^{-4}$	0.0225	0.9881	0.28
	<i>d</i>	0.2218	$1.11 \times 10^{-4}$	0.0105	0.9724	1.79
<i>E3</i> (n = 459 árboles)	<i>Vc</i>	2.4056	$4.30 \times 10^{-4}$	0.0207	0.9912	0.78
	<i>d</i>	0.8896	$1.59 \times 10^{-4}$	0.0126	0.9629	1.57

n: Número de árboles muestra. *SCE*: Suma de Cuadrados del Error. *CME*: Cuadrado Medio del Error. *RCME*: Raíz del CME.  $R^2_{aj.}$ : Coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros. *DW*: Prueba de Durbin-Watson.

Para evaluar la normalidad de los datos, se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov (cuando  $N \geq 2,000$ ) y Shapiro-Wilk (cuando  $N \leq 2,000$ ) (Zaragoza *et al.*, 2014), donde el conjunto de datos observados y analizados es normal ya que su distribución tiene una forma de campana de Gauss como lo menciona Infante y Zarate (2012) a un nivel de confiabilidad del 95 %.

La corrección por heterocedasticidad fue adecuada en el modelo para las muestras de las tres poblaciones de *E. urophylla*, mejorando la distribución inicial de los residuales y haciendo más homogénea y con menor amplitud la estimación. Los residuales de los sistemas derivados del modelo generalizado de Fang y Bailey, ajustados de manera simultánea para el  $d$  (a, b y c) y del  $V_c$  (d, e y f), respectivamente, muestra una distribución adecuada (Figura 4.2). Esta distribución es semejante a lo reportado para este tipo de correcciones realizadas por Barrio *et al.* (2007) al utilizar una modificación del modelo de  $V_c$  de Van Deusen *et al.* (1981); y Crechi *et al.* (2008) que utilizan un sistema compatible de  $d$ - $V_c$  con base en el modelo de Bi de tipo trigonométrico.

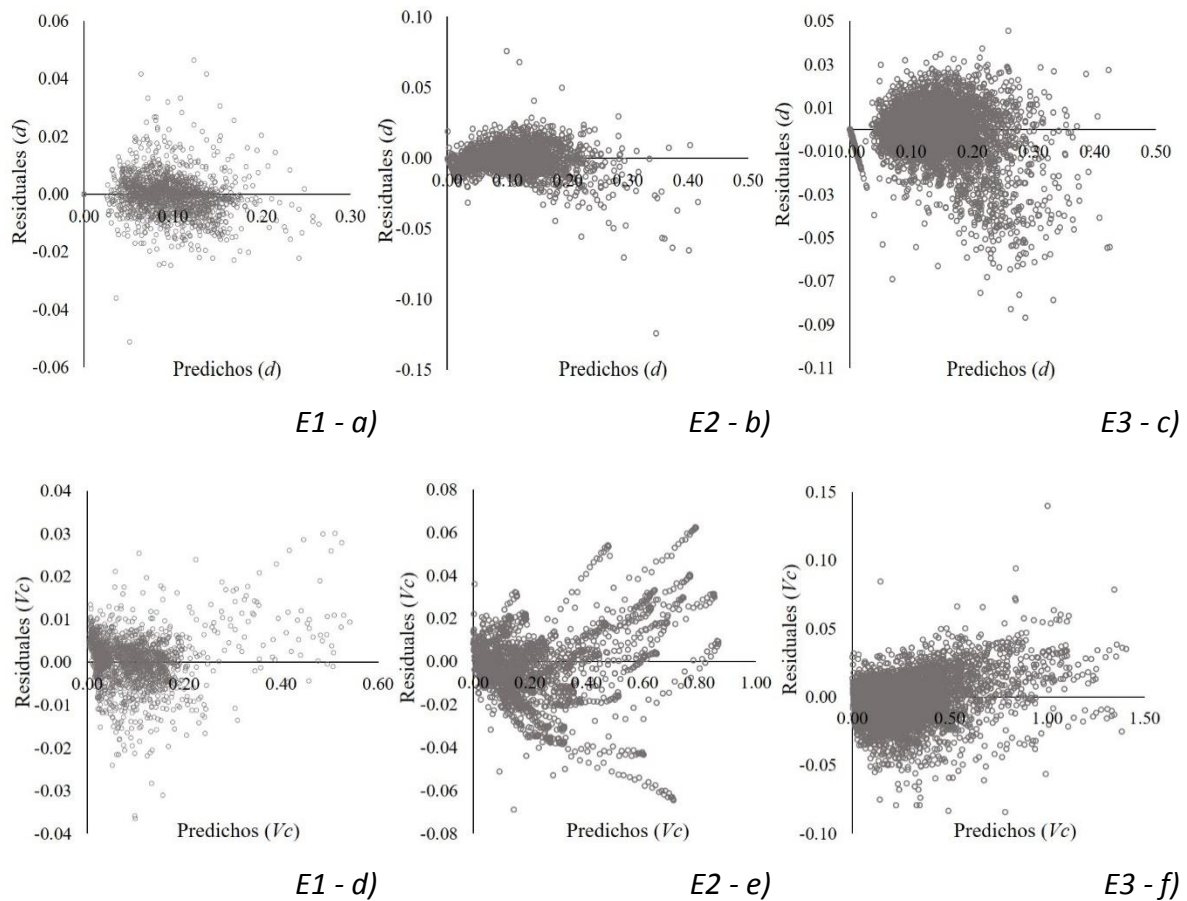


Figura 4.2. Comportamiento de los residuales de  $d$  (a, b y c) y  $V_c$  (d, e y f) con el sistema compatible de ahusamiento ( $d$ ) – Volumen comercial ( $V_c$ ) del modelo generalizado de Fang y Bailey para cada muestra por población de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

El diagnóstico de la función de autocorrelación ( $ACF$ ) en  $d$  y en  $V_c$  mostró los problemas de autocorrelación mencionados, por ello, al aplicar el modelo de autoregresivo del orden que fuera necesario, se tiene que los errores en cada modelo se corrigen para cada ecuación seleccionada generando la gráfica de función de autocorrelación parcial ( $PACF$ ) corregida en  $d$  (a, b y c) y en  $V_c$  (d, e y f) con el modelo completo y la estructura  $CAR(X)$  correspondiente dentro del sistema compatible para cada muestra de *E. urophylla* (Figura 4.3).

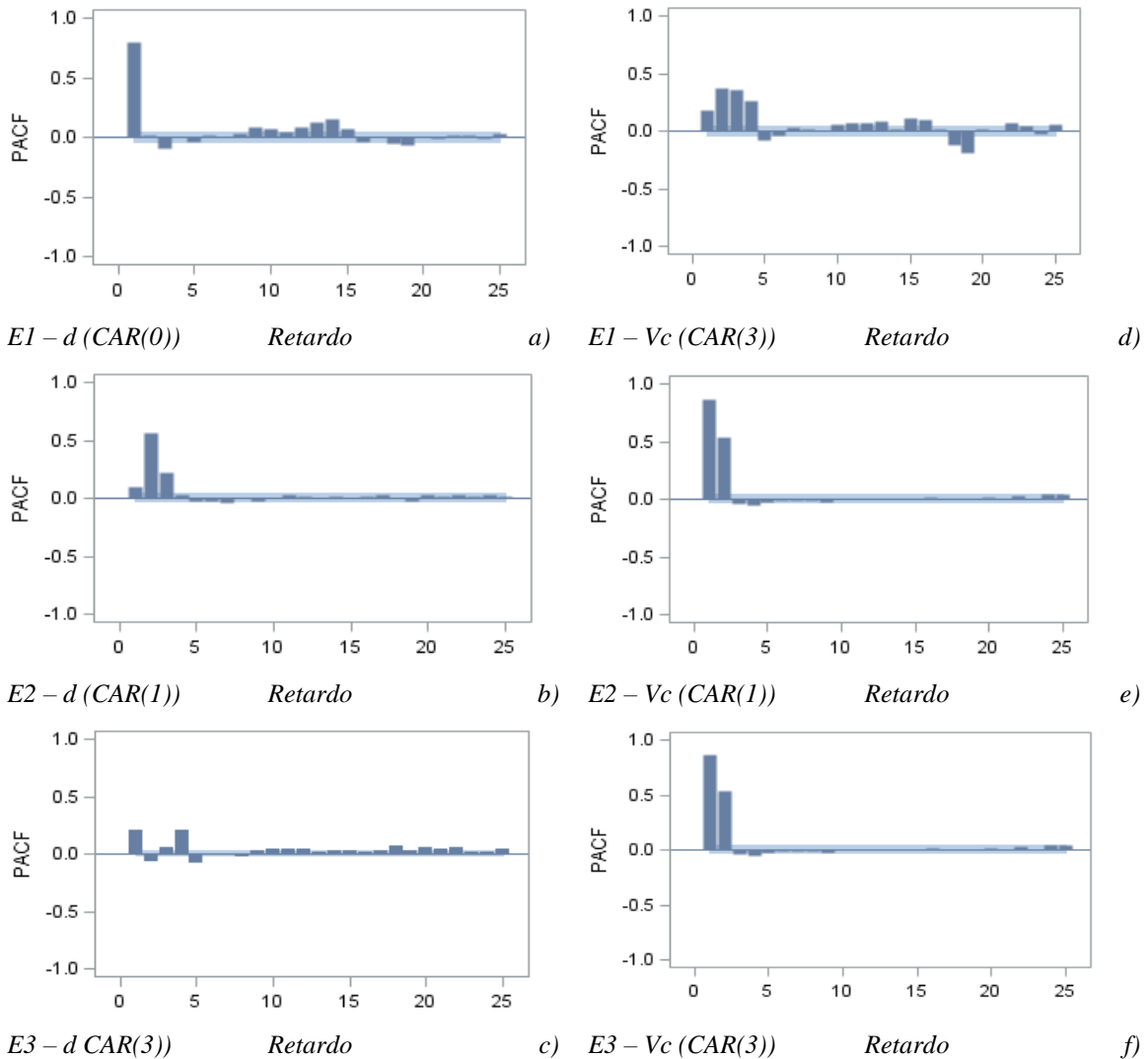


Figura 4.3. Función de corrección parcial de autocorrelación para  $d$  (a, b y c) y  $Vc$  (d, e y f), para el modelo generalizado de Fang y Bailey en las tres muestras de las poblaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Estas correcciones concuerdan con lo reportado por Rodríguez y Molina (2003) al corregir la autocorrelación en funciones de perfil para tres clones de *Populus x euramericana*, y por Quiñonez-Barraza *et al.* (2014) al ajustar un sistema compatible de  $d-Vc$  para cinco especies de Pino. Además, con esto se mejora la distribución de los residuales de los modelos y va acorde con lo referido por Barrio *et al.* (2007) al implementar un sistema de cubicación y clasificación de productos para *Populus x euramericana* y Barrio *et al.* (2014) al estimar el  $Vc$  para *Eucalyptus grandis* a través de modelos de volumen total y de razón.

Al verificar la precisión en las estimaciones del modelo en cada muestra se tiene que los valores del Sesgo son muy bajos y que solamente en la estimación del  $Vc$  para la E3 se tiende

una ligera sobreestimación (Cuadro 4.5). Además, al evaluar de forma gráfica la precisión de las estimaciones comparando los valores predichos contra los observados, se tiene una tendencia hacia una línea recta con pendiente de 45° en los tres casos, situación que hace confiable las estimaciones del  $V_c$  (Figura 4.4).

Cuadro 4.5. Valores del Sesgo promedio ( $\bar{E}$ ) para las estimaciones con el sistema compatible de ahusamiento ( $d$ ) – Volumen comercial ( $V_c$ ) generalizado de Fang y Bailey en la muestra de las poblaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Sistema compatible	Muestra	Variable	$\bar{E}$
	E1 (n = 175 árboles)	$V_c$	$2.879 \times 10^{-3}$
		$d$	$1.642 \times 10^{-3}$
Generalizado de Fang y Bailey	E2 (n = 93 árboles)	$V_c$	$11.650 \times 10^{-3}$
		$d$	$10.806 \times 10^{-3}$
	E3 (n = 459 árboles)	$V_c$	$-8.983 \times 10^{-3}$
		$d$	$2.089 \times 10^{-3}$

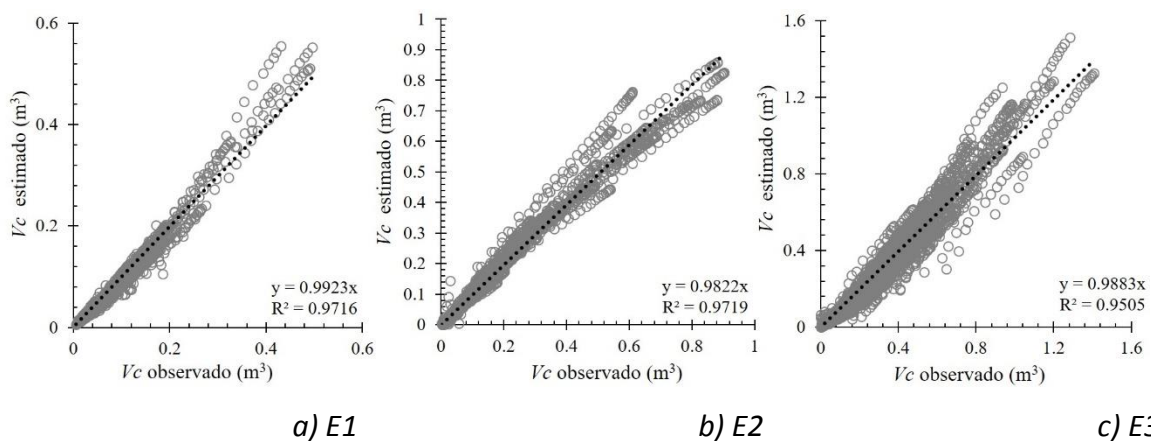


Figura 4.4. Relación entre el  $V_c$  estimado vs  $V_c$  predicho para las poblaciones de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Al verificar el  $\bar{E}$  de forma porcentual en estas estimaciones con respecto al  $V_c$  observado mediante el Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), se tiene que en las muestras de las poblaciones E1 y E2 la desviación es de 2.84 y 2.81 % en promedio, respectivamente, mientras que en las plantaciones provenientes de semilla (E3) es de 4.95 %. Estos errores son inferiores a los reportados por Wabo *et al.* (2001) al utilizar una función de perfil para estimar posteriormente el  $V_c$  y Crechi *et al.* (2008) al ajustar de forma simultánea el modelo de Bi para las estimaciones del  $d$ - $V_c$ , ambas del 8%.



Con la finalidad de conocer la similitud estadística que existe entre los ajustes del modelo generalizado de Fang y Bailey para las tres muestras por población, se utilizó la prueba de  $F$  de Snedecor a un nivel de 95% de confiabilidad (Zamudio, 1990, citado por Muñoz *et al.*, 2003). Se agruparon las poblaciones para su contraste en grupos de E1 vs E2, E1 vs E3 y E2 vs E3 y se ajustaron con el modelo seleccionado, para posteriormente poder contrastar la hipótesis de homogeneidad de modelos, con la fórmula siguiente.

$$F_c = \left[ \frac{SSE - (SSE_1 + SSE_2)}{r \left[ \frac{SSE_1 + SSE_2}{N_1 + N_2} - 2(r) \right]} \right] \quad (9)$$

Donde  $F_c$  es el Valor de  $F$  calculada,  $SSE$  la suma de cuadrados del error del modelo ajustado para las dos poblaciones,  $SSE_1$  y  $SSE_2$  la Suma de Cuadrados del Error de la población 1 y 2, respectivamente,  $N_1$  y  $N_2$  es el número de observaciones de cada población, y  $r$  el número de modelos comparados.

Con la regla de decisión donde, si  $|F_c| < F_t$  al comparar  $r$  para un solo modelo en las tres especies o bien  $|F_c| > F_t$  comparando  $r$  modelos donde se utilizara más de un modelo, se obtuvo que  $|F_c|$  fue mayor en los tres contrastes que  $F_t$ , por lo cual, el uso del modelo generalizado de Fang y Bailey ajustado por población es correcto. La prueba señala diferencias significativas en la forma de los árboles y su volumen comercial respectivo, por lo cual un ajuste simultáneo entre las poblaciones E1, E2 o E3 no podría incluir estas variaciones y se tendría que realizar por separado (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6. Prueba de  $F$  de Snedecor para igualdad de los tres ajustes del sistema compatible de ahusamiento ( $d$ ) – Volumen comercial ( $V_c$ ) del modelo generalizado de Fang y Bailey.

Muestras comparadas	No. observaciones	$F_{tablas}$	$F_{calculada}$	Grados de libertad
E1 - E2 ( $V_c$ )	4071	3	4349.328	2
E1 - E2 ( $d$ )		3	1220.830	2
E2 - E3 ( $V_c$ )	8173	3	19600.540	2
E2 - E3 ( $d$ )		3	637.261	2
E1- E3 ( $V_c$ )	8018	3	16457.960	2
E1 - E3 ( $d$ )		3	316.556	2

#### 4.6. CONCLUSIONES

El modelo generalizado de Fang y Bailey resultó ser el que con mayor precisión estima el ahusamiento y el volumen comercial de árboles de *Eucalyptus urophylla*, y el que tiene los menores sesgos entre los sistemas compatibles analizados. De igual manera estadísticamente es el modelo en el cual se corrigen adecuadamente los problemas de heterocedasticidad y autocorrelación, optimizando los valores de los parámetros estadísticos obtenidos para cada muestra correspondiente a las poblaciones debido a que homogeneiza y minimiza los errores estándar aproximados de las estimaciones al ajustarlo con la técnica de máxima verisimilitud con información completa. Con el sistema seleccionado ahusamiento y el volumen comercial, se pueden realizar estimaciones y predicciones del volumen comercial a diferentes diámetros sobre el fuste, o bien estimar la altura esperada a cualquier diámetro límite de utilización de interés establecido, además de describir en los tres tipos de plantaciones de forma confiable el perfil del fuste de los árboles con variables dasométricas diferentes.

En las poblaciones de *E. urophylla*, tanto en los clones (E1 y E2) como en las provenientes de semillas (E2), las diversas formas e índices de esbeltez (IE) de los árboles han variado debido a los criterios de selección del germoplasma y a las actividades silvícolas y culturales aplicadas. Se recomienda realizar estudios semejantes por tipo de clon además del uso de un número mayor de muestra, emplear funciones segmentadas de ahusamiento o bien realizar un análisis bajo el enfoque de efectos mixtos para poder identificar estos cambios con mayor precisión.

#### 4.7. LITERATURA CITADA

- Bailey, R. L. 1995. Upper-stem volumes from stem-analysis data: An overlapping bolt method. Canadian Journal of Forest Research 25:170-173.
- Barreto-Medel, H., D. Álvarez-Lazo e Y. Alonso-Torrens. 2013. Modelos del perfil de fuste para *Pinus caribea* var. *Caribea* en la provincia Pinar del Río. Revista Científica Avances 14: 259-268.
- Barrio, M., H. Sixto, I. Cañellas, y F. González. 2007. Sistema de cubicación con clasificación de productos para plantaciones de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv. 'I-214' en la meseta norte y centro de España. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 16; 65-75.
- Barrio, A., A. M. López y V. Nieto. 2014. Predicción de volúmenes comerciales de *Eucalyptus grandis* a través de modelos de volumen total y de razón. Colombia Forestal 17:137-149.

- Borders, B. E. 1989. Systems of equations in forest stand modeling. *Forest Science* 35: 548-556.
- Cailliez, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. FAO, Roma, Italia. 92 p.
- Casnati C., R., M. G. Euan M., R. Woollons and F. Resquin. 2014. Volume and taper equations for *P. tadea* (L.) and *E. grandis* (Hill ex. Maiden). *Agrociencia* 18: 47-60.
- Cao, Q. V., H. E. Burkhart and T. A. Max. 1980. Evaluations of two methods for cubic-foot volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. *Forest Science* 26: 71-80.
- Clutter, J. L. 1980. Development of taper functions from variable-top merchantable volume equations. *Forest Science* 26: 117-120.
- Corral R., S., J. J. Návar C. y F. Fernández S. 1999. Ajustes de funciones de ahusamiento a los perfiles fustales de cinco Pináceas de la región de El Salto, Durango. *Madera y Bosques* 5: 53-65.
- Corral-Rivas, S. y J. J. Návar-Chaidez. 2009. Comparación de técnicas de estimación de volumen fustal total para cinco especies de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15: 5-13.
- Crecente C., F., A. Rojo A. and U. Diéguez. A. 2009. A merchantable volume system for *Pinus sylvestris* L. in the major mountains ranges of Spain. *Annals of Forest Science* 66:1-12.
- Crechi E., A. Keller y H. Fassola. 2008. Desarrollo de una ecuación de forma-volumen relativo para la estimación de diferentes volúmenes de *Grevillea robusta* A. en Misiones, Argentina. XIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM – EEA Montecarlo, INTA. El Dorado, Misiones, Argentina. 12 p.
- Cruz-Cobos, F., H. M. De los Santos-Posadas y J. R. Valdez-Lazalde. 2008. Sistema compatible de ahusamiento volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango México. *Agrociencia* 42: 473-485.
- Demaerchalk, J. P. 1972. Converting volume equations to compatible taper equations. *Forest Science* 18: 241–245.
- Diéguez-Aranda, U., A. Rojo A., F. Castedo-Dorado, J. G. Álvarez G., M. Barrio-Anta, F. Crecente-Campo, J. M. González G., C. Pérez-Cruzado, R. Rodríguez S., C. A. López-Sánchez, M. Á. Balboa-Murias, J. J. Gorgoso V. y F. Sánchez R. 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Universidad de Santiago de Compostela. Galicia, España. 259 p.

- Fang, Z., B. E. Borders and R. L. Bailey. 2000. Compatible volume-taper models for loblolly and slash pine based on a system with segmented-stem form factors. *Forest Science* 46: 1-12.
- Gujarati, N. D. 2004. Violación de los supuestos del modelo clásico. Traducción al español de Garmendia G., D., Arango M. G. y M. Misas A. *In: McGraw Hill Interamericana de México* (ed.). *Econometría*. México, D.F. México. pp. 327-538.
- Harvey, A. C. 1976. Estimating regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica* 44: 461-465.
- Hernández P., D., H. M. De los Santos P., G. Ángeles P., J. R. Valdez L. y V. H. Volke H. 2013. Funciones de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4: 35-45.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2005. Marco Geoestadístico Municipal 2005, versión 3.1. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/27/27008.pdf> (Consulta: Diciembre, 2015).
- Infante G., S. y G. P. Zarate L. 2012. *Métodos estadísticos: Un enfoque interdisciplinario*. 3a edición. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de México. 610 p.
- Institute Inc. Statistical Analysis System. 2008. SAS/STAT® 9.2 User's Guide Second Edition. SAS Institute Inc. Raleigh, NC USA. s/p. <https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statugmcmc/63125/PDF/default/statugmcmc.pdf> (Consulta: Diciembre, 2015).
- Kozak, A. 1988. A variable-exponent taper equation. *Canadian Journal of Forest Research* 18: 1363-1368.
- Lara, V., C. E. 2011. Aplicación de ecuaciones de conicidad para teca (*Tectona grandis* L.F.) en la zona costera ecuatorial. *Ciencia y Tecnología* 4: 19-27.
- Martínez-López, J. y A. Acosta-Ramos. 2014. Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del diámetro del tocón para *Quercus laurina* en Ixtlán, Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 20: 59-70.
- Muñoz F., H. J., S. Madrigal H., M. Aguilar R., J. J. García M. y M. Lara R. 2003. Tablas de volumen para *Pinus lawsonii* Roetzl. y *P. pringlei* Shaw. en el oriente de Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 28: 94-112.
- Ormerod, D. 1973. A simple bole model. *The Forestry Chronicle* 49: 136-138.

- Parresol B., R. and C. C. Thomas. 1996. A simultaneous density-integral system for estimating stem profile and biomass: Slash pine and Willow Oak. *Canadian Journal of Forest Research* 26: 773-781.
- Pompa G., M. y R. Solís M. 2008. Ecuación de volumen para el género *Quercus* en la región noroeste de Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 16: 84-93.
- Prodan, M., R. Peters, F. Cox y P. Real. 1997. *Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación de Desarrollo Sostenible*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)/BMZ/GTZ. San José, Costa Rica. 561 p.
- Quiñonez-Barraza G., H. M. De los Santos-Posadas, J. G. Álvarez-González y A. Velázquez-Martínez. 2014. Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para las principales especies de *Pinus* en Durango, México. *Agrociencia* 48: 553-567.
- Rodríguez F. y C. Molina. 2003. Análisis de modelos de perfil del fuste y estudio de cilindricidad para tres clones de chopo (*Populus x euramericana*) en Navarra. *Investigación Agraria y de Recursos Forestales* 13: 73-85.
- Sakici, O. E., N. Misira, H. Yavuz and M. Misira. 2008. Stem taper functions for *Abies nordmanniana* subsp. *bornmulleriana* in Turkey. *Scandinavian Journal of Forest Research* 23: 522-533.
- Tamarit U., J. C., H. M. De los Santos P., A. Aldrete, J. R. Valdez L., H. Ramírez M. y V. Guerra C. 2013. Sistema de cubicación para árboles individuales de *Tectona grandis* L. f. mediante funciones compatibles de ahusamiento-volumen. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5: 58-74.
- Tapia J. y J. Návar. 2011. Ajuste de modelos de volumen y funciones de ahusamiento para *Pinus pseudostrobus* Lindl., en bosques de pino de la Sierra Madre Oriental de Nuevo León, México. *Foresta Veracruzana* 13: 19-28.
- Torres R., J. M. y O. S. Magaña T. 2001. *Evaluación de plantaciones forestales*. Ed. Limusa. México, D. F. México. 472 p.
- Van Deusen P. C., Sullivan A .D. and Matney T. G. 1981. A prediction system for cubic foot volume of loblolly pine applicable through much of its range. *Southern Journal of Applied Forestry*, 186-189.
- Verbeek, M. 2004. *A guide to modern econometrics*, 2 ed. West Sussex: John Wiley & Sons. West Sussex, England. 429 p.
- Wabo E., J. Marquina y R. Bratovich. Modelos de perfil de fuste para clones comerciales de *Populus deltoides* Marsh en la zona continental de la provincia de Buenos Aires. *Quebracho* 9: 83-94.

- Zaragoza H., A. Y., V. M. Cetina A., M. A. López L., A. Chacalo H., M. L. De la Isla B. y H. González R. 2014. Indicador de condición de copa y su aplicación en tres parques del Distrito Federal. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 5: 35-50.
- Zhang, L., C. Peng, S. Huang and X. Zhou. 2002. Development and evaluation of ecoregion-based tree height-diameter models for jack pine in Ontario. *The Forestry Chronicle* 78: 530-538.
- Zimmerman, D., L. and V. Núñez-Antón. 2001. Parametric modelling of growth curve data: An overview (with discussion). *Test* 10:1-73.

## CAPÍTULO V

### 5. BIOMASA AÉREA Y FACTORES DE EXPANSIÓN DE BIOMASA EN PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES DE *Eucalyptus urophylla*

#### 5.1. RESUMEN

Estimar la biomasa es fundamental para la determinación de la cantidad de Carbono almacenado en la cubierta forestal. Una forma de obtener estimaciones precisas de biomasa aérea es mediante factores de expansión que utilizan datos de volumen en pie tomados durante el inventario forestal. El objetivo de este trabajo fue estimar la biomasa aérea total y por componente estructural a partir de la generación de modelos alométricos y de factores de expansión de biomasa (*FEB*) para clones de *Eucalyptus urophylla* establecidos en plantaciones forestales comerciales en Tabasco, México. Mediante un muestreo destructivo de 93 árboles de entre uno y siete años de edad, se determinó la biomasa total y por componente. Se proponen dos sistemas de modelos alométricos ajustados como ecuaciones aparentemente no correlacionadas y de tipo aditivo. El porcentaje promedio de biomasa de fuste ( $B_f$ ), ramas ( $B_r$ ) y follaje ( $B_h$ ) es de 91.42, 5.54 y 2.03 % con respecto a la biomasa total ( $B_t$ ). La proporción de  $B_f$  aumenta a medida que el árbol incrementa sus dimensiones, mientras que la  $B_r$  y  $B_h$  disminuyen. El *FEB* promedio para  $B_t$  y  $B_f$  fue de 510.09 y 472.56 kg m<sup>-3</sup> en términos de volumen de fuste y 1.17 kg kg<sup>-1</sup> para conversión de biomasa de fuste a biomasa total. Usando datos de un inventario forestal se estima que en promedio existen 156.08 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de volumen y 80 Mg ha<sup>-1</sup> de biomasa aérea. Los estadísticos de ajuste, el sesgo y la diferencia agregada en % indican que cualquiera de los sistemas propuestos es confiable para su aplicación práctica.

**Palabras clave:** Modelos para biomasa, relaciones alométricas, factor de expansión de biomasa, ecuaciones aditivas.

## ABOVEGROUND BIOMASS AND BIOMASS EXPANSION FACTORS IN COMMERCIAL FOREST PLANTATIONS OF *Eucalyptus urophylla*

### 5.2. ABSTRACT

Accurate biomass estimation is critical in determining the amount of carbon stored by forest land. One way to obtain accurate estimates of aboveground biomass is developing expansion factors that use forest standing volume data to estimate biomass. The aim of this study was to estimate total aboveground biomass and by structural component through two methods, allometric models and biomass expansion factors (*BEF*), for clones of *Eucalyptus urophylla* established commercial forest plantations in Tabasco, Mexico. A destructive sampling of 93 trees ranging from one to seven years of age was implemented for the task. Two systems of allometric equations were fitted: one as seemingly unrelated equations and the other as an additive model. The average percentage of bole ( $B_f$ ), branches ( $B_r$ ) and foliage ( $B_h$ ) biomass is 91.42, 5.54 and 2.03 % of the total biomass ( $B_t$ ).  $B_f$  ratio increases as tree size increases, the opposite occurs for  $B_r$  and  $B_h$ . Average *BEF* is 510.09 kg m<sup>-3</sup> for  $B_t$  and 472.56 kg m<sup>-3</sup> for  $B_f$  in terms of bole volume. The  $B_t / B_f$  ratio averaged 1.17 kg kg<sup>-1</sup>. Using data from a current forest inventory the FEB (using volume models as first stage) and direct aboveground biomass models estimations showed no statistical differences, which indicates that any of the proposed systems is reliable for practical application.

**Key words:** Models for biomass, allometric relationships, biomass expansion factor, additive equations, *Eucalyptus urophylla*.



### 5.3. INTRODUCCIÓN

Estimar la biomasa forestal permite caracterizar la capacidad acumulativa de materia orgánica en los ecosistemas a lo largo del tiempo (Eamus *et al.*, 2000) y cuantificar los nutrientes almacenados en las diferentes partes de una planta o tipo de vegetación (Fonseca, *et al.*, 2009). Estas estimaciones son útiles en estudios de eficiencia nutricional y evaluación de las funciones ambientales y servicios ecosistémicos de los bosques naturales (Ferrere *et al.*, 2014) o plantaciones forestales.

La biomasa acumulada en un bosque o plantación es un indicador de la cantidad de CO<sub>2</sub> que está siendo fijado a partir del crecimiento vegetal y que posteriormente puede ser liberado a la atmósfera por la presencia de incendios forestales, huracanes, talas clandestinas u otros fenómenos o actividades (Návar, 2009). Esta información es fundamental para la valoración de la contribución de estas cubiertas vegetales en la reducción de gases de efecto invernadero (Fonseca *et al.*, 2009) y en la planeación regional del manejo forestal sustentable (Kauffman *et al.*, 2009; Cutini *et al.*, 2013), ambos enfocados a reducir los impactos ocasionados por el cambio climático (Malhi y Grace, 2000; Snowdon *et al.*, 2001) planteados en el Protocolo de Kyoto.

La biomasa aérea de un árbol se define como la suma de la cantidad total de materia orgánica de hojas, ramas, tronco y corteza (Garzuglia y Sacket, 2003) y puede ser calculada a través de métodos directos e indirectos (Vásquez y Arellano, 2012), siendo el primero de ellos el más empleado (Díaz-Franco, 2007). Cuando la estimación es a nivel bosque, la muestra para ese propósito debe considerar la edad, la calidad de sitio, la composición de especies y las condiciones climáticas, edáficas y topográficas (Avendaño-Hernández *et al.*, 2009) o bien el tipo de clones establecidos en las plantaciones forestales comerciales (PFC), para una mejor estimación por cada tipo de condición evaluada.

Los modelos alométricos son una herramienta práctica para la estimación de la biomasa y el Carbono capturado en los bosques (Návar, 2010). Tales funciones usan la correlación entre variables de difícil medición como volumen ( $V$ ), Carbono ( $C$ ), Carbono equivalente ( $CO_{2e}$ ), biomasa verde o peso seco de cada componente con variables fáciles de medir como el diámetro normal ( $dn$ ) y la altura total ( $AT$ ) de los árboles (Solano *et al.*, 2014). En combinación con datos de inventarios forestales, las ecuaciones alométricas permiten cuantificar el potencial de crecimiento vegetal y fijación de gases efecto invernadero al capturar el CO<sub>2</sub> durante los

procesos fotosintéticos, además de representar una alternativa de valoración de las áreas forestales para el pago de servicios ambientales (Ruíz-Aquino *et al.*, 2014).

La hipótesis de este trabajo asume que a través de variables fáciles de medir en un inventario forestal como el diámetro normal y la altura total es posible estimar con precisión la biomasa aérea por árbol y por unidad de superficie. El objetivo del trabajo fue estimar la biomasa aérea total y por componente estructural a partir de la generación de modelos alométricos y de factores de expansión de biomasa (*FEB*) para clones de *Eucalyptus urophylla* establecido en plantaciones forestales comerciales en Tabasco, México.

## **5.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.4.1. Área de estudio**

Las plantaciones evaluadas de *E. urophylla* están ubicadas en el Sureste de México, en el municipio de Huimanguillo, Tabasco, donde existen estaciones de lluvia y seca bien marcadas con un clima de tipo cálido húmedo (Am), temperatura media anual de 26 °C y precipitación de 2,500 mm. Los suelos son de tipo Feozem con un relieve de tipo lomerío (INEGI, 2005).

### **5.4.2. Selección y medición de la muestra**

Se realizó un muestreo destructivo de 93 árboles clonales de *E. urophylla* de entre 1 y 7 años de edad, seleccionados por su condición morfológica superior dentro de las plantaciones y tratando de cubrir la mayor variabilidad posible. A todos los árboles se les midió el diámetro normal (*dn*) antes de ser derribados. Posterior a su derribo se les midió la altura total (*AT*), el diámetro y altura de tocón (*dt* y *Atocón*), diámetros a distintas alturas sobre del fuste (*dm*), alturas a diferentes secciones (*hm*) hasta llegar a la punta, además de los diámetros basales de cada rama (*db*) a la altura de inserción en el fuste (*Adb*). Todas las mediciones se registraron en metros.

### **5.4.3. Separación por componentes**

Los componentes estructurales fuste con corteza, ramas y follaje se separaron y pesaron como lo proponen Avendaño-Hernández *et al.* (2009) y Gómez-Díaz *et al.* (2011) para obtener el peso verde de las muestras en campo (*Pv*, en kg). El fuste se seccionó en trozas de un metro de longitud iniciando en la altura del tocón hasta llegar a la punta, cada sección se pesó en estado verde en una báscula electrónica con plataforma de capacidad de 100 kg y una precisión de 0.001 kg. También se obtuvieron tres rodajas, cada una de cinco centímetros de grosor correspondientes al tocón, a la parte media del fuste y a la punta de cada árbol. Los componentes

ramas y follaje (hojas) fueron separados y pesados en estado verde de forma independiente en una báscula electrónica con capacidad de cinco kg y una precisión de 0.001 kg. De estos dos componentes se seleccionó una muestra de aproximadamente 0.5 kg. Esta metodología es semejante a la utilizada por Ruíz-Aquino *et al.* (2014) y Soriano-Luna *et al.* (2015).

#### **5.4.4. Estimación de volumen con corteza y biomasa aérea**

El volumen de cada sección o troza ( $V_{troza}$ ) se obtuvo con la fórmula de Newton, excepto para la punta ( $V_{punta}$ ), en ese caso se usó la fórmula del cono. El volumen total del árbol ( $V_t$ ) se calculó con el método de trozas traslapadas propuesto por Bailey (1995). Las muestras de los tres componentes estructurales se deshidrataron en una estufa de secado, a temperaturas de 72 °C para ramas y hojas, y de 105 °C para las rodajas, hasta alcanzar un peso constante. Los pesos se registraron con una precisión de 0.0001 kg. Con el peso verde y el peso seco de las muestras se determinó el contenido de humedad por componente y su relación entre ellos. La biomasa área total se definió como la suma del peso seco de los tres componentes (Domínguez-Cabrera *et al.*, 2009; Lim *et al.*, 2013).

#### **5.4.5. Ajuste de modelos de biomasa y análisis estadístico**

Se probaron modelos de tipo lineal y no lineal (Loetsch *et al.*, 1973; Segura y Andrade, 2008; Méndez-González *et al.*, 2011; Gómez-García *et al.*, 2013) que incluyen como variables independientes al  $dn$ ,  $AT$  y edad ( $E$ ). Además se probó un modelo general que considera el  $dt$ ,  $Atocón$ , la altura y diámetro del fuste limpio ( $Afl$  y  $dfl$ ), y la sumatoria de los diámetros basales de todas las ramas vivas en el árbol ( $\Sigma db$ ) (Cuadro 5.1).

Cuadro 5.1. Modelos ajustados para estimar la biomasa total y por componente.

Expresión del modelo	No.
$y = b_0 + b_1dn + b_2AT + b_3E + b_4dn^2 + b_5dn^2 AT$	(1)
$y = b_0 + b_1dn^2 + b_2AT + b_3dn^2 AT$	(2)
$y = b_0 + b_1dn + b_2dn^2 + b_3AT + b_4dn^2 AT$	(3)
$y = b_0 + b_1E + b_2E^2$	(4)
$y = b_0 + b_1dn^2 AT$	(5)
$y = b_0 + b_1dnAT$	(6)
$y = b_0 + b_1dn^2$	(7)
$y = b_0 + b_1dn + b_2AT$	(8)
$y = b_0dn^{b_1} AT^{b_2}$	(9)
$y = b_0(dn^2 AT)^{b_1}$	(10)
$y = b_0dn^2 AT$	(11)
$y = b_0dnAT$	(12)
$y = b_0 + b_1dn + b_2AT + b_3Afl + b_4dfl + b_5Atocón + b_6dt + b_7\Sigma(db)$	(13)

Dónde:  $y$  se refiere a la biomasa por componente estructural y los  $b$  son los parámetros a estimar.

El ajuste estadístico de las ecuaciones (1) a (12) se hizo con el paquete estadístico SAS 9.2 con el procedimiento MODEL mediante mínimos cuadrados ordinarios (Statistical Analysis System, 2008). La elección del mejor modelo se basó en los menores valores de los estadísticos Suma de Cuadrados del Error ( $SCE$ ) y la Raíz del Cuadrado Medio del Error ( $RCME$ ), así como el mayor valor del Coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros ( $R^2_{aj}$ ).

Los cuatro modelos seleccionados por componente estructural se ajustaron de forma simultánea con la técnica de ecuaciones aparentemente no relacionadas (SUR) (Álvarez-González *et al.*, 2007) considerando como variables endógenas o dependientes a las  $y$ ; y exógenas a las variables medidas directamente. De esta forma en el ajuste se involucran los errores conjuntos y se obtienen estimadores consistentes en los componentes (Hernández *et al.*, 2013), además se garantiza la aditividad del sistema donde la estimación de la biomasa aérea

total es la suma de las estimaciones de sus componentes (Ruíz *et al.*, 2011). Adicional a los estadísticos de ajuste *SCE*, *RCME*,  $R^2_{aj.}$ , significancia de los parámetros y Error estándar aproximado (*Eea*) (Álvarez-González *et al.*, 2005), se verificó la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilk (*SW*) y la homocedasticidad con la distribución gráfica de los residuales.

El modelo (13) que incluye las variables de diámetro y altura de tocón (*dt* y *Atocón*), altura y diámetro de fuste limpio (*Alf* y *dfl*), y la sumatoria de los diámetros basales de todas las ramas vivas en el árbol ( $\Sigma db$ ), se ajustó utilizando los métodos de selección backward (eliminación hacia atrás) y forward (selección hacia adelante) como lo recomienda Volke (2008) para incluir dentro del modelo solo las variables que explican con mayor precisión la variable respuesta, seleccionando el mejor modelo con los criterios de bondad de ajuste utilizados anteriormente, el menor valor del estadístico de Cp de Mallows, el mayor valor en  $R^2$  y la significancia parcial de la prueba de *F*.

En ambos casos, para corregir la heterocedasticidad, se incluyó una función de ponderación por peso a los residuales ( $\sigma^2_i = x^k_i$ ) como lo propone Neter *et al.* (1996) y Álvarez-González *et al.* (2007). Donde  $\sigma^2_i$  es igual a la varianza de la variable independiente (*x*) y *k* es el valor del exponente de optimización, el cual consiste en usar los errores al cuadrado del modelo ajustado sin peso ( $\hat{\epsilon}_i$ )<sup>2</sup> como variable dependiente en el modelo potencial de varianza del error (Harvey, 1976) ( $\hat{\epsilon}_i$ )<sup>2</sup> = *a* + *k* × *x<sub>i</sub>*.

#### 5.4.6. Factor de expansión de biomasa (FEB)

El *FEB* se estimó de tres maneras. La primera fue a través del cociente de la biomasa aérea total y la biomasa del fuste (Dauber *et al.*, 2002), lo cual permite identificar como se distribuyen y cambian las proporciones de la biomasa aérea de los componentes estructurales del árbol o de la especie a medida que incrementan sus dimensiones o se hacen más longevos. Para la estimación de este *FEB* se utilizaron las fórmulas (14) y (15) (Domínguez-Cabrera *et al.*, 2009; Rodríguez-Ortíz *et al.*, 2012). Los resultados obtenidos se sumaron y promediaron para definir el *FEB* en las plantaciones por edad (*E*) y categoría diamétrica (*CD*).

$$FEB = \frac{B_f + B_h + B_r}{B_f} \text{ (14) y } FEB = \frac{B_t}{B_f} \text{ (15)}$$

El *FEB* también se estimó a través de la proporción directa del volumen ( $V$ ) expresado en  $m^3$  con respecto a la biomasa de fuste y a la biomasa total de cada árbol en kg, la cual permite identificar las existencias volumétricas en las plantaciones con relación a su biomasa. El factor se estimó con la estructura propuesta por Ruíz-Aquino *et al.* (2014) para la biomasa de fuste (16), además tal proporción se calculó con la biomasa total (17).

$$FEB = \frac{B_f}{V} \text{ (16); y } FEB = \frac{B_t}{V} \text{ (17)}$$

Adicionalmente, el *FEB* se estimó definiendo la relación lineal de los componentes de biomasa con el volumen, donde el valor del parámetro que multiplica al volumen representa los kilogramos de biomasa por  $m^3$  promedio que se pueden obtener (*FEB*). Dicha relación se representa mediante las expresiones (18) y (19) para biomasa total y de fuste, respectivamente.

$$B_t = b_0V \text{ (18) y } B_f = b_1V \text{ (19)}$$

Donde  $b_0$  y  $b_1$  son los parámetros a estimar y representan el *FEB* para biomasa total y de fuste respectivamente.

#### 5.4.7. Comparación de los métodos

Las medias obtenidas para  $B_t$  y  $B_f$  se sometieron a un análisis de varianza de una vía (ANOVA de un factor) (Martínez *et al.*, 2006) para determinar la existencia de diferencias estadísticas significativas. Las hipótesis planteadas fueron.

$H_0 = u_1 = u_2 = \dots = u_k$ . Las medias de las estimaciones son iguales, aceptando la hipótesis de igualdad.

$H_1 =$  Al menos dos medias son distintas y se rechaza la hipótesis de igualdad.

Al contrastar la hipótesis de igualdad de medias ( $u_k$ ), la regla de decisión que se aplicó fue con base a la significancia de  $F$  en la prueba de Duncan ( $Pd$ ) agrupando la muestra por método a un nivel de confiabilidad del 95 %.

#### 5.4.8. Biomasa aérea bajo términos de un inventario forestal

Con la finalidad de observar la aplicabilidad de los resultados en términos de un inventario forestal se compararon tres ecuaciones de volumen total generadas en 2015 (20), 2012 (21) y 2007 (22) que se emplean en las PFC para cubicar con los *FEB* generados.

$$V=0.326089(dn^2AT)^{0.868193} \quad (20)$$

$$V=0.000037dn^{1.908525}AT^{1.056786} \quad (21)$$

$$V=0.000066dn^{1.706446}AT^{1.049807} \quad (22)$$

Para este análisis se utilizaron datos de 28 sitios rectangulares de 500 m<sup>2</sup> medidos en 2014, los cuales fueron obtenidos a partir de un muestreo al azar en las plantaciones de *E. urophylla* de entre uno y siete años de edad. Para fines prácticos el análisis de la información se realizó bajo un diseño de muestreo simple aleatorio (MSA).

## 5.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La muestra de árboles analizada deja ver la gran variedad de dimensiones en la población (Cuadro 5.2).

Cuadro 5.2. Estadísticos básicos de las variables de los árboles muestreados de *E. urophylla* en plantaciones forestales entre uno y siete años de edad en Huimanguillo, Tabasco.

Variable	Medio	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Diámetro normal (m)	0.172	0.332	0.078	0.058
Altura total (m)	21.003	33.300	8.540	7.011
Biomasa de fuste (kg)	128.931	413.197	16.256	105.381
Biomasa de ramas (kg)	10.474	31.751	3.104	5.328
Biomasa de hojas (kg)	3.997	7.631	1.170	1.668
Biomasa total (kg)	143.402	435.564	26.684	108.905
Volumen (m <sup>3</sup> )	0.327	0.903	0.020	0.240

Se determinó que la biomasa por componente estructural representa 43.0, 44.8 y 37.8 % del peso en verde registrado en campo para el fuste, ramas y follaje, respectivamente.

La distribución de biomasa por componente indica que la proporción de biomasa de fuste y volumen aumentan a medida que el diámetro y la altura incrementan. Lo opuesto ocurre a la proporción de biomasa correspondiente a ramas y follaje (Ferrere *et al.*, 2008; y Soriano-Luna *et al.*; 2015). En general, los árboles clonales de *E. urophylla* establecidos en PFC concentran el 92.42 % de la biomasa total en el fuste, 5.54 % en ramas y el 2.03 % en el follaje (Cuadro 5.3). Estos resultados contrastan con los reportados por Geldres *et al.* (2006) para plantaciones de *E. nitens* de cuatro a siete años de edad donde encontró una proporción de 84.1 % para fuste, 9 % en ramas y 6.8 % en hojas y por Álvarez-González *et al.* (2005) para plantaciones de *E.*

*globulus* de entre 13 y 24 años con proporciones en fuste y corteza de 85.9 %, 11 % en ramas y 3.1 % en follaje. Estos resultados sugieren que comparativamente las plantaciones analizadas tienen una mayor velocidad de crecimiento y mayor eficiencia fotosintética.

Cuadro 5.3. Distribución porcentual de biomasa por categoría diamétrica de cada componente estructural en árboles de *E. urophylla*.

Categoría diamétrica	Biomasa de hojas (%)	Biomasa de ramas (%)	Biomasa de fuste (%)	Total (%)
10	10.22	25.26	64.52	100
15	3.44	9.09	87.47	100
20	2.55	6.58	90.87	100
25	1.74	4.66	93.60	100
30	1.67	4.52	93.82	100
35	1.35	4.23	94.42	100
Promedio	2.03	5.54	92.42	100

En la generación del sistema aditivo de estimación de biomasa primeramente se ajustaron los modelos del (1) al (12) que solo utilizan las variables  $dn$ ,  $AT$  y  $E$  de manera separada por componente estructural. Se determinó que los modelos (9), (2), (8) y (10), son los adecuados para el cálculo de la  $B_f$ ,  $B_r$ ,  $B_h$  y  $B_t$ . Sin embargo, se observaron problemas de heterocedasticidad de la varianza de los residuales (Figura 5.2).



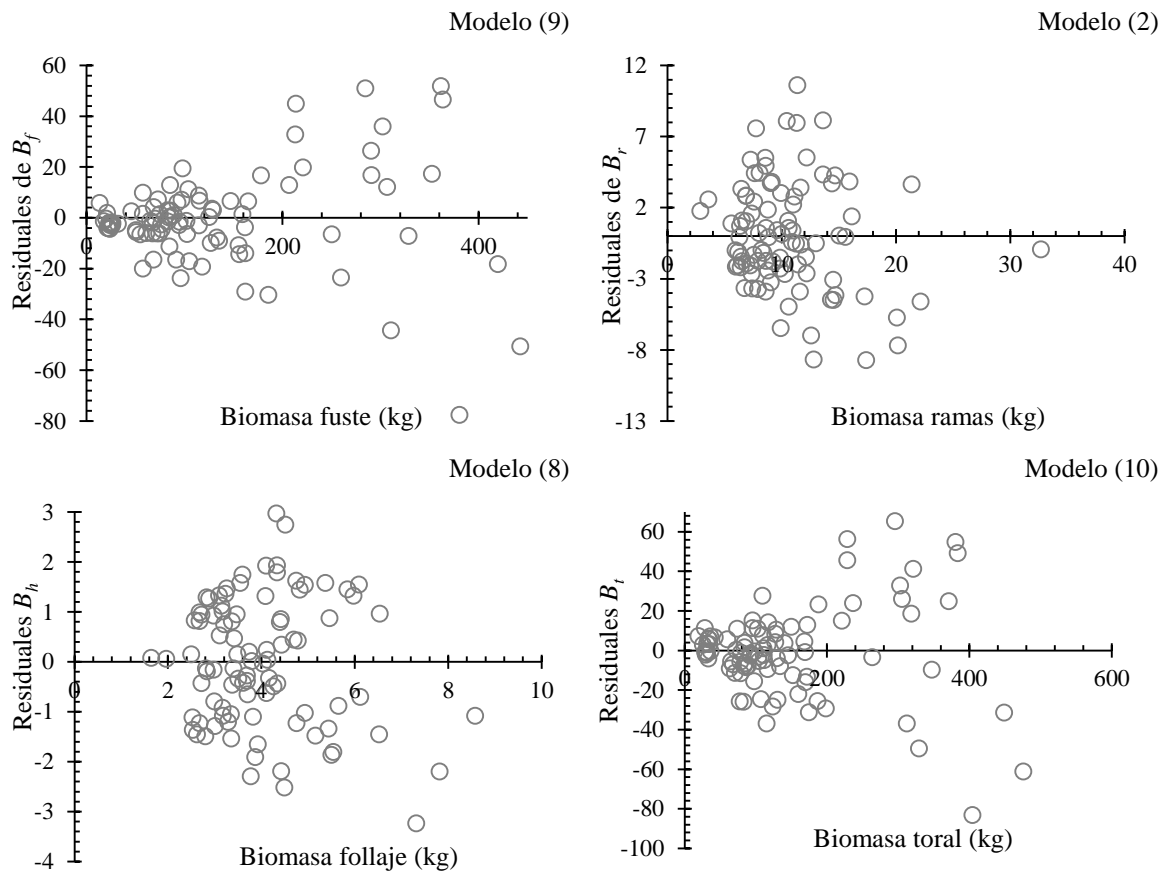


Figura 5.1. Distribución de residuales de los modelos (9), (2), (8) y (10), utilizados para la estimación de biomasa por componente estructural en *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Al realizar la corrección por heterocedasticidad y ajustar los modelos con mínimos cuadrados generalizados conjuntos (SUR) (Cuadro 5.4) se garantiza la aditividad de los resultados y los problemas de distribución de los residuales desaparezcan haciendo la varianza de los errores constante (Figura 5.2).

Cuadro 5.4. Valores de ajuste simultáneo y parámetros de los modelos de biomasa para árboles clonales de *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco.

Modelo	Variable	SCE	RCME	$R^2_{aj}$	Parámetro	Estimación	Eea	Valor t	Pr >  t
(9)	$B_f$	32115.2	18.890	0.968	$b_0$	31.0843	6.7102	4.63	<.0001
					$b_1$	1.3115	0.0452	29.04	<.0001
					$b_2$	1.1700	0.0528	22.16	<.0001
(2)	$B_r$	1346.5	3.890	0.467	$b_0$	7.5670	1.3535	5.59	<.0001
					$b_1$	827.9449	68.1203	12.15	<.0001
					$b_2$	-0.5271	0.0755	-6.98	<.0001
					$b_3$	-16.1040	1.8931	-8.51	<.0001
(8)	$B_h$	149.5	1.289	0.403	$b_0$	1.9988	0.3752	5.33	<.0001
					$b_1$	44.6601	3.8434	11.62	<.0001
					$b_2$	-0.2706	0.0294	-9.19	<.0001
(10)	$B_t$	48367.5	23.055	0.955	$b_0$	179.3627	2.9075	61.69	<.0001
					$b_1$	0.7508	0.0174	43.1	<.0001

$B_f$ ,  $B_r$ ,  $B_h$  y  $B_t$ : Biomasa del fuste, ramas, hojas y total, respectivamente. SCE: Suma de Cuadrados del Error. RCME: Raíz del Cuadrado Medio del Error.  $R^2_{aj}$ : Coeficiente de determinación ajustado. Eea: Error estándar aproximado.  $b_n$ : Parámetros estimados.

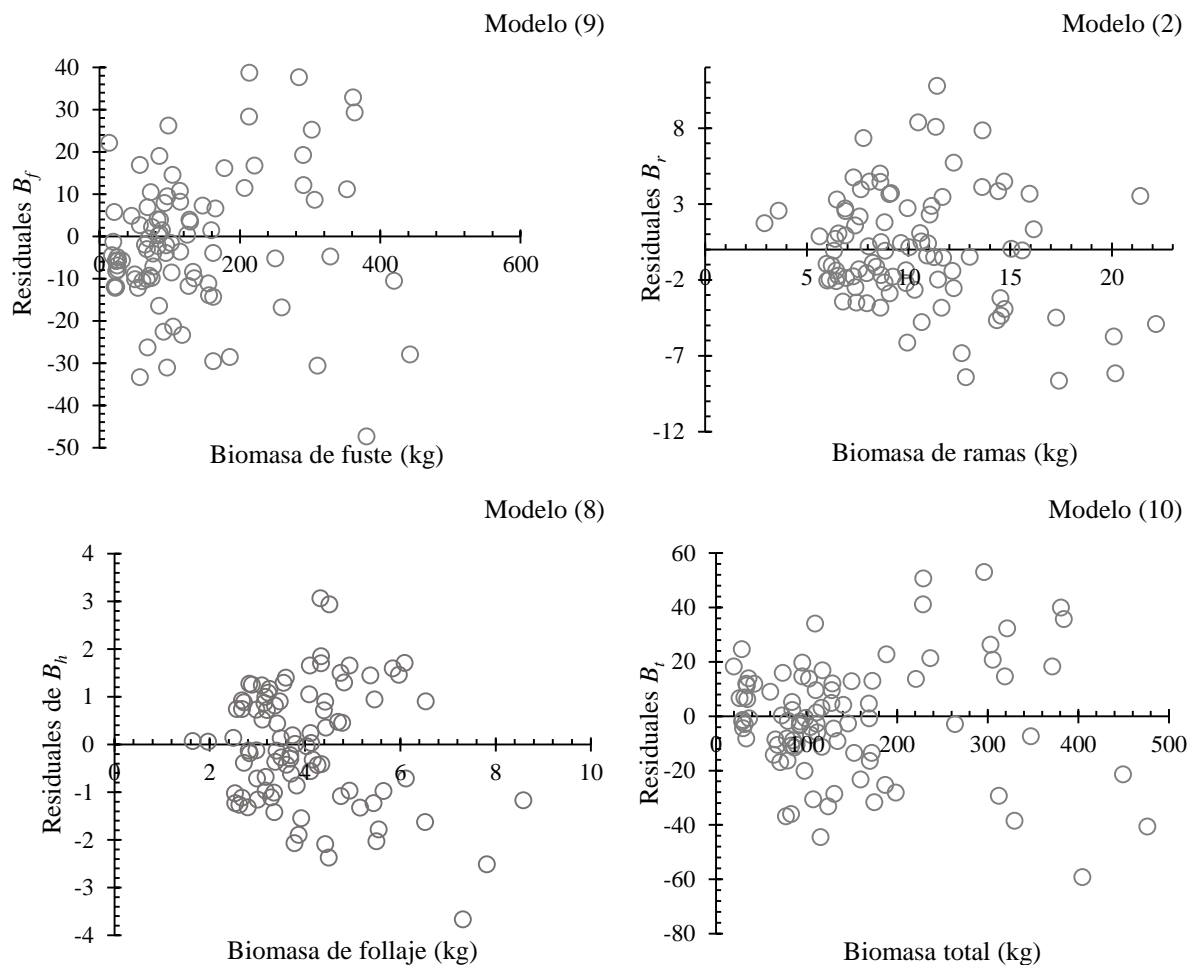


Figura 5.2. Distribución de residuales corregidos por heterocedasticidad de los modelos (9), (2), (8) y (10), utilizados para la estimación de biomasa por componente estructural en *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Para los tres componentes estructurales y de biomasa total se obtuvieron valores en la prueba de *SW* entre 0.91 y 0.98, valores que señalan que no hay violación en este supuesto de la regresión en los cuatro casos, tal como lo describe Balzarami *et al.* (2008) y es utilizado por Gaillard *et al.* (2014).

El modelo (13), ajustado mediante los procedimientos de regresión backward y forward, permitió identificar los modelos más adecuados al incluir variables adicionales que explican con mayor precisión la variable respuesta (predicción de la biomasa de ramas y follaje), los cuales fueron:

$$B_r = b_0 + b_1 dn + b_2 Afl + b_3 \Sigma(db) \quad (23)$$

$$B_h = b_0 \Sigma(db)^{b_1} dt^{b_2} Aft^{b_3} \quad (24)$$

Tales modelos fueron ajustados en forma simultánea y corregidos por heterocedasticidad (Figura 5.3), lo que dio origen a la construcción de un segundo sistema aditivo de ecuaciones (SII) para la estimación de biomasa de fuste (9), biomasa total (10) y las ecuaciones para biomasa de ramas y follaje, (23) y (24). Este sistema es comparativamente de mejor calidad de ajuste estadístico (Cuadro 5.5) lo que lo hace más estable. La prueba de *SW* demostró la normalidad de los datos con valores entre 0.91 y 0.97 para los cuatro modelos ajustados.

Cuadro 5.5. Parámetros y estadísticos de ajuste de los modelos al incluir las variables de altura de fuste limpio y sumatoria de los diámetros basales de las ramas por componente estructural de biomasa para *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Modelo	Variable	SCE	RCME	$R^2_{aj.}$	Parámetro	Estimación	Eea	Valor $t$	Pr >  t
(9)	$B_f$	24861.5	17.629	0.968	$b_0$	28.444	6.153	4.62	<.0001
					$b_1$	1.256	0.045	27.91	<.0001
					$b_2$	1.168	0.053	22.12	<.0001
(23)	$B_r$	454.3	2.398	0.812	$b_0$	-4.224	0.927	-4.56	<.0001
					$b_1$	95.979	6.544	14.67	<.0001
					$b_2$	-0.463	0.050	-9.31	<.0001
					$b_3$	5.957	0.843	7.07	<.0001
(24)	$B_h$	54.3952	0.83	0.745	$b_0$	24.993	4.654	5.37	<.0001
					$b_1$	0.509	0.061	8.34	<.0001
					$b_2$	0.895	0.095	9.44	<.0001
					$b_3$	-0.110	0.027	-4.16	<.0001
(10)	$B_t$	40014	22.226	0.953	$b_0$	178.171	2.942	60.56	<.0001
					$b_1$	0.726	0.018	39.6	<.0001

$B_f$ ,  $B_r$ ,  $B_h$  y  $B_t$ : Biomasa fuste, ramas, hojas y total respectivamente. *SCE*: Suma de Cuadrados del Error. *RCME*: Raíz del Cuadrado Medio del Error.  $R^2_{aj.}$ : Coeficiente de determinación ajustado. *Eea*: Error estándar aproximado.  $b_n$ : Parámetros estimados.

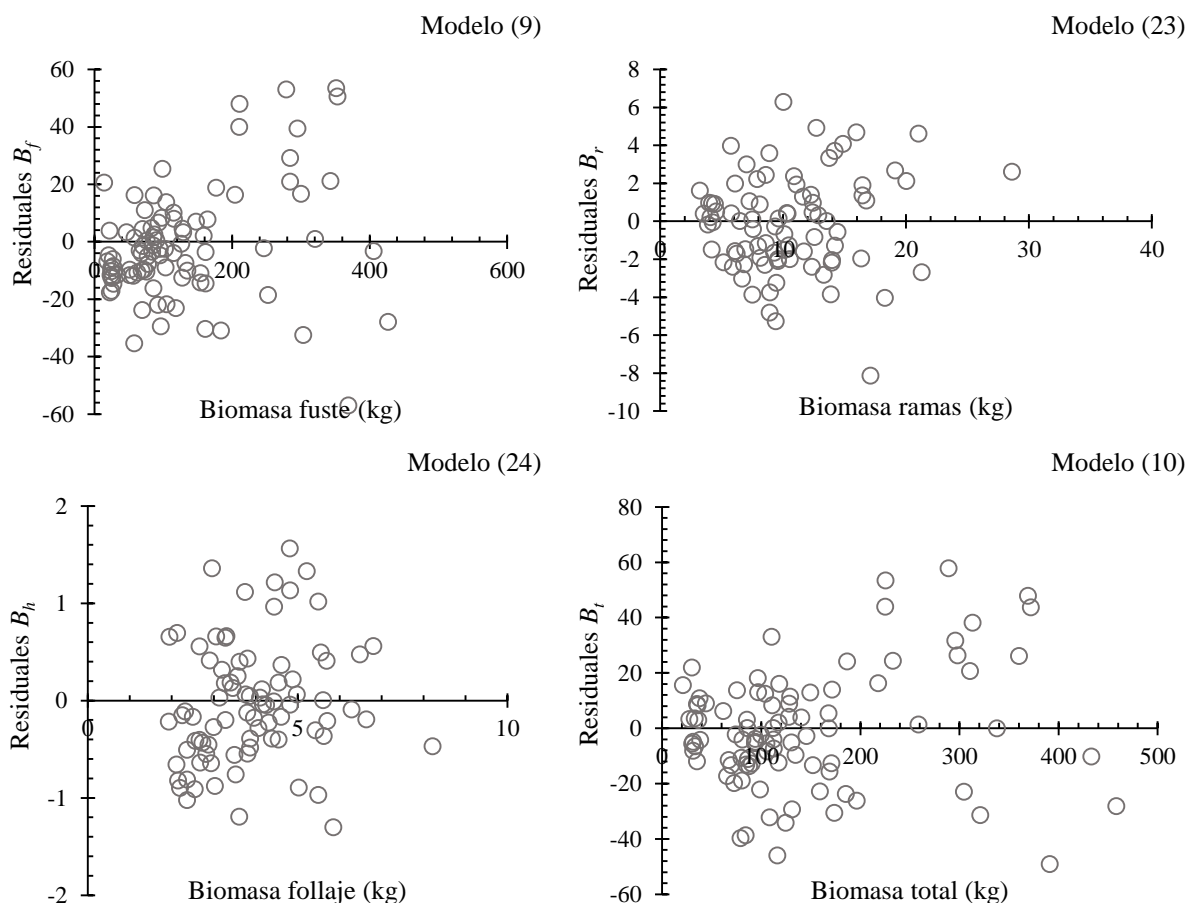


Figura 5.3. Distribución de residuales al corregir por heterocedasticidad los modelos (8), (20), (21) y (9), ajustados para estimar biomasa por componente estructural en *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Se determinó que SII sobreestima ligeramente la  $B_f$ ,  $B_r$  y la  $B_t$ , mientras que la estimación de la  $B_h$  es conservadora tanto en la predicción por individuo como en la diferencia total por muestra. El primer sistema aditivo (SI) subestima en todas las variables haciendo más conservador los cálculos (Cuadro 5.6).

Cuadro 5.6. Estadísticos de evaluación de la capacidad predictiva de la biomasa por componente y total *E. urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, México.

Sistema aditivo	Estadístico estimado	$B_f$	$B_r$	$B_h$	$B_t$
SI	Sesgo	-0.631	-0.056	-0.022	-0.431
	Diferencia Agregada %	-0.494	-0.541	-0.542	-0.303
SII	Sesgo	0.475	0.073	-0.024	0.574
	Diferencia Agregada %	0.372	0.701	-0.613	0.404

$B_f$ ,  $B_r$ ,  $B_h$  y  $B_t$ : Biomasa fuste, ramas, hojas y total respectivamente.

Debido a la precisión que señalan los estadísticos de ajuste del sistema aditivo II y a que fue generado para realizar estimaciones de biomasa aérea total y por componente estructural, sin utilizar métodos destructivos, se pueden realizar estimaciones precisas de biomasa por componente con la inclusión de información adicional al inventario forestal tradicional, que puede obtenerse a través de aparatos de medición electrónica como el Dendrómetro Criterium RD 1000 ®.

El factor de expansión de biomasa (*FEB*) promedio para árboles *E. urophylla* obtenido con las ecuaciones (14) y (15) señala que el 17 % de la biomasa aérea se encuentra distribuida en ramas y follaje, mientras que el resto se concentra en el fuste (83 %) (Cuadro 5.7), distribución que concuerda con lo reportado por Téllez *et al.* (2008) para plantaciones de esta especie en Oaxaca, México donde el 17.6 % corresponde a biomasa de ramas y follaje y el 82.4 % en fuste; por Álvarez *et al.* (2005) para *E. globulus* en España con 14.1 % en biomasa de hojas y ramas y 85.9 % en fuste; y con Ferrere *et al.* (2008) en Argentina en la distribución de *E. viminalis* en la cual el 20 % corresponde a biomasa de ramas y follaje, y el 80 % a fuste.

Las estimaciones realizadas con los sistemas aditivos I y II propuestos sub-estiman el *FEB* en 1.51 y 1.48 %, respectivamente, donde el SII es el que se aproxima de mejor manera a los datos evaluados cuando se analizan por categoría diamétrica y no se considera la edad de la plantación.

Cuadro 5.7. Factores de expansión de biomasa por categoría diamétrica para los datos observados de biomasa aérea ( $\text{kg kg}^{-1}$ ).

CD	10	15	20	25	30	35	Promedio
<i>FEB-DO</i>	1.58	1.16	1.11	1.07	1.07	1.06	1.17

Al considerar la edad en el análisis se determinó que el SI es el que en promedio tiene mejor aproximaciones, aunque sub-estima el *FEB* en 2.5 %, donde se propone que el 19 % de biomasa corresponde a ramas y follaje y, el 81 % al fuste, situación semejante a lo referido anteriormente en las proporciones de biomasa por componente estructural (Cuadro 5.8). En ambos sistemas los *FEB* para *E. urophylla* decrecen a medida que la biomasa total aérea se incrementa (observada o estimada), semejante a lo que mencionan Rodríguez-Ortíz *et al.* (2012) y Chávez-Pascual *et al.* (2013).

Cuadro 5.8. Factores de expansión de biomasa para los datos observados por edad (años) para los datos observados de biomasa aérea ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

Edad	1	2	3	4	5	6	7	Promedio
<i>FEB</i> - DO	1.60	1.31	1.13	1.09	1.11	1.08	1.20	1.22

Al Aplicar el modelo (16) de *FEB* para  $B_t$ , el promedio es de 600.94 kg de biomasa total por cada  $\text{m}^3$  de volumen maderable, donde el factor va disminuyendo conforme incrementan las dimensiones de los árboles. Para las categorías diamétrica de 10 y 15 cm existen 795.05  $\text{kg m}^{-3}$  en promedio, mientras que para 20 y 25, y 30 y 35 cm es de 557.94 y 447.82  $\text{kg m}^{-3}$ , respectivamente. El análisis de estos resultados por edad sugiere que el promedio para estas plantaciones a los siete años es de 652.22  $\text{kg m}^{-3}$ , presentando una tendencia semejante de los siete a los cuatro años de edad con 531.06  $\text{kg m}^{-3}$  y aumenta a 613.34  $\text{kg m}^{-3}$  en edades de dos y tres años, y a 812.25  $\text{kg m}^{-3}$  para las plantaciones de una año de edad.

En el caso del *FEB* para  $B_f$  la tendencia es similar a lo antes referido, siendo menores las diferencias entre categorías diamétricas o edades, los promedios fueron de 496.45 y 503.02  $\text{kg m}^{-3}$ , respectivamente. Al analizar por *CD* se tienen 508.76, 500.03 y 480.45  $\text{kg m}^{-3}$ , para las plantaciones con dimensiones de 10 y 15 cm, 20 y 25 cm, y 30 y 35 cm, respectivamente. En ambos casos los *FEB* disminuyen con forme el individuo incrementa sus dimensiones y se hace más longevo, sin embargo la acumulación en los *stocks* de biomasa se incrementan, debido a la proporción de biomasa aérea de fuste por categoría diamétrica o edad.

Los modelos (18) y (19) para estimar  $B_t$  y  $B_f$  que consideran la relación lineal de estas variables con el volumen del árbol ( $\text{m}^3$ ) arrojaron valores de *FEB* de 510.06 y 472.54  $\text{kg m}^{-3}$ , respectivamente (Cuadro 5.9); resultados semejantes a los obtenidos con los modelos (16) y (17).

Cuadro 5.9. Estadísticos de bondad de ajuste y parámetros de los modelos (18) y (19) para estimar  $B_t$  y  $B_f$  en árboles de *E. urophylla* de PFC en Huimanguillo, Tabasco, México.

Variable	Modelo	SCE	RCME	$R^2_{aj.}$	Parámetro	Estimación	Eea	Valor t	Pr >  t
$B_t$	(18)	43468.3	21.620	0.961	$b_0$	510.0913	3.901	130.75	<.0001
$B_f$	(19)	26850.1	16.992	0.974	$b_1$	472.5588	2.791	169.32	<.0001

SCE: Suma de Cuadrados del Error. RCME: Raíz del Cuadrado Medio del Error.  $R^2_{aj.}$ : Coeficiente de determinación ajustado por el número de parámetros. Eea: Error estándar aproximado.  $b_0$  y  $b_1$ : Parámetros estimados.

El análisis de varianza de las medias de los datos observados *versus* las tres estimaciones con los dos sistemas aditivos (SI y SII) y los modelos de proporción directa relacionados con el volumen (18 y 19), a un nivel de  $P = 0.05$ , permite concluir que las variables analizadas ( $B_t$  y  $B_f$ ) son iguales entre sí ( $Pr > F = 0.963$  para  $B_t$  y  $Pr > F = 0.997$  para  $B_f$ ), por lo cual, se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se puede afirmar que los tres métodos propuestos son confiables en la estimación de estas variables, por lo que solo son diferentes en las variables independientes que conforman cada modelo. De forma práctica, se recomienda el SI cuando se cuenta con información de inventario forestal.

Los datos de inventario analizados con los estadísticos de muestreo simple al azar, indican que en promedio existen  $156.08 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  y  $7.8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de volumen por sitio en las PFC de *E. urophylla*, siendo el promedio de dimensiones de 14 cm en diámetro normal, 18 metros en altura y una densidad de  $986 \text{ árboles ha}^{-1}$ .

Una comparación de resultados tomando como referencia los modelos de biomasa de fuste y biomasa total de los modelos (9) y (10) del primer sistema aditivo de ecuaciones demuestra que el modelo de volumen (20) es el más optimista con respecto a la estimación de biomasa aérea con datos de un inventario, seguido del modelo (21) y finalmente del (22) que es el más conservador (Cuadro 5.10). El análisis de varianza entre las estimaciones, con la prueba de *t-CKamer*, indica que son iguales entre sí, debido a que el valor de probabilidad de error en el ANOVA es muy alto ( $F = 2.6887$  p-value = 0.7978).



Cuadro 5.10. Estimadores con el muestreo simple aleatorio para PFC de *E. urophylla* de entre uno y siete años de edad establecidas en Huimanguillo, Tabasco, México.

Variable estimada	Biomasa total (kg/sitio) - Modelo (18)			Biomasa fuste (kg/sitio) - Modelo (19)			Biomasa total de referencia (kg/sitio)	Biomasa fuste de referencia (kg/sitio)
	Modelo (20)	Modelo (21)	Modelo (22)	Modelo (20)	Modelo (21)	Modelo (22)	Modelo (9)	Modelo (10)
Media	3.98	3.95	3.87	3.69	3.66	3.59	4.54	4.04
Var. Muestral	7160.79	8919.47	7551.23	6145.78	7655.17	6480.87	6985.75	7175.49
Var Media	255.74	318.55	269.69	219.49	273.40	231.46	249.49	256.27
IC+ 95%	5.02	5.11	4.94	4.65	4.73	4.57	5.56	5.08
IC- 95%	2.94	2.79	2.81	2.73	2.59	2.60	3.51	3.00
Precisión	0.26	0.29	0.28	0.26	0.29	0.28	0.23	0.26
Inventario ha <sup>-1</sup>	79.62	79.02	77.40	73.76	73.21	71.71	90.73	80.80

Considerando los resultados más optimistas en combinación con el modelo (18) de  $B_t$  en los resultados del volumen  $m^3 ha^{-1}$ , se estiman 80.80 Mega gramos por hectárea ( $Mg ha^{-1}$ ) de biomasa aérea, lo cual es semejante a los 70.27  $Mg ha^{-1}$  que reporta Ferrere *et al.* (2008) para plantaciones de siete años de *E. viminalis* en Argentina; sin embargo, es inferior a los rendimientos reportados por Geldres *et al.* (2006) en plantaciones de cinco, seis y siete años de *E. nitens* antes de ser intervenidas con aclareos con un rendimiento de 73.1, 111.8 y 159.5  $Mg ha^{-1}$ , a una densidad de plantación de 1500 plantas por hectárea.

La biomasa aérea por hectárea obtenida es similar con los rendimiento de 142  $Mg ha^{-1}$  estimados en plantaciones de *E. globulus* de España, ya que la cantidad reportada en este trabajo es en promedio la mitad de lo mencionado por Álvarez *et al.* (2005) a una edad de 13 años; estas estimaciones de acuerdo a los escenarios propuestos por Seppänen (2002 y 2003) para *E. urophylla*, *E. grandis* y el híbrido *E. grandis x E. urophylla* es muy baja ya que a la edad de 7

años se espera que en el escenario menos optimista tendría en promedio un rendimiento de biomasa aérea de 147.7 Mg ha<sup>-1</sup> en esta región.

## 5.6. CONCLUSIONES

La fuerte correlación entre el diámetro normal y la altura total de un árbol con la biomasa aérea, permite obtener modelos alométricos confiables para estimar la biomasa total y por componente estructural en los individuos de *Eucalyptus urophylla*. La inclusión de variables adicionales como la altura de fuste limpio y la sumatoria de los diámetros basales de todas las ramas vivas en los modelos de biomasa de ramas y hojas, mejora la estabilidad y precisión de las ecuaciones evaluadas. La relación directa encontrada entre el volumen y la biomasa aérea permite aplicar las ecuaciones de biomasa generadas y los sistemas aditivos propuestos de forma confiable con datos de un inventario forestal. Las PFC analizadas a la edad del turno definido en 7 años tienen en promedio una producción de biomasa aérea de 80.89 Mg ha<sup>-1</sup>.

Las ecuaciones de biomasa aérea y los factores de expansión obtenidos, facilitan la planeación y ejecución de las actividades de manejo forestal implementadas para *Eucalyptus urophylla*, además son útiles para evaluar y cuantificar los beneficios adicionales de las plantaciones, como el pago de servicios ambientales por los servicios ecosistémicos generados o bien en el desarrollo de proyectos productivos para elevar el contenido de biomasa y carbono en estas plantaciones.

## 5.7. LITERATURA CITADA

- Álvarez-González, J. G., M. A. Balboa-Murias, A. Merino y R. Rodríguez-Soalleiro. 2005. Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. Recursos Rurais 1: 21-30.
- Álvarez-González, J. G., R. Rodríguez-Soalleiro y A. Rojo-Alboreca. 2007. Resolución de problemas de ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones: Heterocedasticidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 23: 35-42.
- Avendaño-Hernández, D. M., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures y J. D. Etchevers-Barra. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. Fitotecnia Mexicana 32: 233-238.
- Balzarini, M. G., L. González, M. Tablada, F. Casanoves, J. A. Di Rienzo y C. W. Robledo. 2008. "INFOSTAT, Manual del Usuario". Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.

[https://www.researchgate.net/publication/283491340\\_Infostat\\_manual\\_del\\_usuario](https://www.researchgate.net/publication/283491340_Infostat_manual_del_usuario)

(Consulta: Diciembre, 2015).

- Bailey, R. L. 1995. Upper-stem volumes from stem-analysis data: An overlapping bolt method. *Canadian Journal of Forest Research* 25: 170-173.
- Chávez-Pascual E. Y., G. Rodríguez-Ortiz, J. C. Carrillo-Rodríguez, J. R. Enríquez-Del Valle, J. L. Chávez-Servia y G. V. Campos-Ángeles. 2013. Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6: 1273-1284.
- Cutini, A., F. Chianucci, and M. C. Manetti. 2013. Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Italian coastal stands. *iForest: Biogeosciences and Forestry* 6: 331-337.
- Dauber, E., J. Terán y R. Guzmán. 2002. Estimación de carbono y biomasa en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana* 1: 1-10.
- Díaz-Franco, R., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala y J. D. Etchevers-Barra. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et. Cham. *Madera y Bosques* 13(1): 25-34.
- Domínguez-Cabrera, G., O. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, R. Rodríguez-Laguna y J. A. Díaz-Balderas. 2009. Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15: 59-64.
- Eamus, K., Mc. Guinness and W. Burrows. 2000. Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the northern territory and western Australia. Technical report N° 5. National Carbon accounting system. 56 p.
- Ferrere, P., A. M. Lupi y R. T. Boca. 2014. Estimación de la biomasa aérea en árboles y rodales de *Eucalyptus viminalis* Labill. *Quebracho* 22: 100-113.
- Ferrere, P., A. M. Lupi, R. T. Boca, V. Nakama y A. Alfieri. 2008. Biomasa en plantaciones de *Eucalyptus viminalis* Labill. de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia Florestal* 18(3): 291-305.
- Fonseca G. W., F. Alice G. y J. M. Rey. 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque* 30: 36-47.

- Gaillard B., C., M. Pece, M. Juárez G. y M. Acosta. 2014. Modelaje de la biomasa aérea individual y otras relaciones dendrométricas de *Prosopis nigra* Gris. en la provincia de Santiago del Estero, Argentina. *Quebracho* 22: 17-29.
- Geldres E., V. Gerding y J. E. Schlatter. 2006. Biomasa de *Eucalyptus nitens* de 4-7 años de edad en un rodal de la X Región, Chile. *Bosques* 27: 223-230.
- Garzuglia, M. and M. Saket. 2003. Wood volume and woody biomass: review of FRA 2000 estimates. Forest Resources Assessment WP 68. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. 30 p.
- Gómez-Díaz, J. D., J. D. Etchevers-Barra, A. I. Monterroso-Rivas, J. Campo-Alvez y J. A. Tinoco-Rueda. 2011. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17: 261-272.
- Gómez-García, E., F. Crecente-Campo y U. Diéguez-Aranda. 2013. Tarifas de biomasa aérea para abedul (*Betula pubescens* Ehrh.) y roble (*Quercus robur* L.) en el noreste de España. *Madera y Bosques* 19: 71-91.
- Harvey, A. C. 1976. Estimating regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica* 44: 461-465.
- Hernández P., D., H. M. De los Santos P., G. Ángeles P., J. R. Valdez L. y V. H. Volke H. 2013. Funciones de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4: 34-45.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2005. Marco Geoestadístico Municipal 2005, versión 3.1. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/27/27008.pdf> (Consulta: Diciembre, 2015).
- Kauffman, J. B., R. F. Hughes y C. Heider. 2009. Carbon pool and biomass dynamics associated with deforestation, land use, and agriculture abandonment in the neotropics. *Ecological Applications* 19: 1211-1222.
- Lim, H., K.-H. Lee and I. H. Park. 2013. Biomass expansion factors and allometric equations in an age sequence for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in southern Korea. *The Journal of Forest Research* 18: 316-322.
- Loetsch, F., F. Zohrer, K. E. Haller. 1973. Forest inventory. Munich, DE, BLV Verlagsgesellschaft. 469 p.
- Malhi Y. and J. Grace. 2000. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends in Ecology and Evolution* 15: 332-336.

- Méndez-González J., S. L. Luckie-Navarrete, M. A. Capó-Arteaga y J. A. Nájera-Luna. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia* 45: 479-491.
- Návar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257: 427-434.
- Návar, J. 2010. Measurement and assessment methods of forest aboveground biomass: A literature review and the challenges ahead. In biomass. Maggy Ndombo Benteke Momba (Ed.). Agosto, 2010. Rijeka, Croatia. InTech. pp. 27-64.
- Neter, J., M. H. Kutner, C. J. Nachtsheim, and W. Wasserman. 1996. *Applied linear statistical models*. 1th edition. Mc. Graw-Hill. New York. 1396 p.
- Rodríguez-Ortiz, G., H. M. De Los Santos-Posadas, V. A. González-Hernández, A. Aldrete, A. Gómez-Guerrero y A. M. Fierros-González. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques* 18(1): 25-41.
- Ruiz-Aquino, F., J. I. Valdez-Hernández, F. Manzano-Méndez, G. Rodríguez-Ortiz, A. Romero-Manzanares y M. E. Fuentes-López. 2014. Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca. *Madera y Bosques* 20: 33-48.
- Statistical Analysis System. 2008. *SAS/STAT® 9.2 User's Guide Second Edition*. SAS Institute Inc. Raleigh, NC USA. s/p. <https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statugmcmc/63125/PDF/default/statugmcmc.pdf> (Consulta: Diciembre, 2015).
- Segura, M. y H. J. Andrade. 2008. ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?. *Agroforestería en las Américas* 46: 89-96.
- Seppänen, P. 2002. Secuestro de carbono a través de plantaciones de eucalipto en el trópico húmedo. *Foresta Veracruzana* 4: 51-58.
- Seppänen, P. 2003. Costo de la captura de carbono en plantaciones de eucalipto en el trópico. *Foresta Veracruzana* 5: 1-6.
- Snowdon, P, J. Raison, H. Keith, K. Montagu, H. Bi, P. Ritson, P. Grieson, M. Adams, W. Burrows and D. Eamus. 2001. Protocol for sampling tree and stand biomass, National Carbon Accounting System Technical Report, No. 31, First Draft. Australian Greenhouse Office, Au.114 p.
- Solano D., C. Vega, V. H. Eras y K. Cueva. 2014. Generación de modelos alométricos para determinar biomasa aérea a nivel de especies, mediante el método destructivo de baja

- intensidad para el estrato de bosque seco pluviestacional del Ecuador. *Revista Científica CEDAMAZ* 4: 32-44.
- Soriano-Luna, M. A., G. Ángeles-Pérez, T. Martínez-Trinidad, F. O. Plascencia-Escalante y R. Razo-Zárate. 2015. Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia* 49: 423-438.
- Téllez M., E., M. J. González G., H. M. De los Santos P., A. M. Fierros G., R. J. Lilieholm y A. Gómez G. 2008. Rotación óptima en plantaciones de eucalipto al incluir ingresos para captura de carbono en Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 31: 173-182.
- Vásquez, A. y H. Arellano. 2012. Estructura, biomasa aérea y carbono almacenado en los bosques del Sur y Noroccidente de Córdoba. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. p. 923-961.
- Volke H., V. 2008. Estimación de funciones de respuesta para información de tipo no experimental, mediante regresión. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México. 113 p.

## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES GENERALES

Los árboles de los distintos clones medidos en 2007 y 2014, con respecto a los provenientes de semilla medidos en 2007 de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake establecidos en plantaciones forestales en Huimanguillo, Tabasco sugiere fuertemente que cada población tiene características diferentes. Los árboles provenientes de las fuentes clonales cosechadas en 2007 mostraron tener el fuste menos ahusado entre las poblaciones. No obstante, las poblaciones clonales cosechadas en 2104 tienen un mayor coeficiente de esbeltez con lo cual compensan la forma más cónica de sus fustes. Evidentemente que un balance entre forma y crecimiento absoluto sería deseable en la selección de los clones a plantarse. Particularmente, estas dos últimas variables, se deberán de tomar en cuenta en la selección del material a propagar, más que las dimensiones de diámetro normal y altura total, esto con el fin de maximizar la rentabilidad de las inversiones hechas en este tipo de actividades.

El análisis de los sistemas compatibles de ahusamiento-volumen comercial ajustados por población, muestra que las plantaciones de 2007 son las que mayor distribución de productos primarios produce, seguidas de las plantaciones de semilla y finalmente los clones de 2014, estas últimas con una mayor proporción en productos secundarios. En el caso de la distribución de productos de leña y desperdicios la mayor cantidad la producen los árboles provenientes de semilla.

La combinación de las ecuaciones de volumen total, volumen comercial y biomasa generadas, además de sus factores de expansión de biomasa aplicados en términos de un inventario forestal, son eficientes como herramientas silvícolas cuantitativas en las estimaciones de rendimiento volumétrico por hectárea o bien de las existencias de biomasa por unidad de superficie, donde son fundamentales en la planeación, aplicación y evaluación de las actividades de manejo forestal con vistas a un rendimiento sostenido a largo plazo de este tipo de plantaciones forestales.