



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**

**FISIOLOGÍA VEGETAL**

**EFECTO DE ACLAREOS EN EL  
CRECIMIENTO DE UNA  
PLANTACIÓN DE *Pinus patula* Schl. et  
Cham. EN IXTLÁN, OAXACA**

**GERARDO RODRÍGUEZ ORTIZ**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO**

**2010**

La presente tesis titulada: **EFFECTO DE ACLAREOS EN EL CRECIMIENTO DE UNA PLANTACIÓN DE *Pinus patula* Schl. et Cham. EN IXTLÁN, OAXACA**, realizada por el alumno **GERARDO RODRÍGUEZ ORTIZ**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS  
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD  
FISIOLOGÍA VEGETAL**

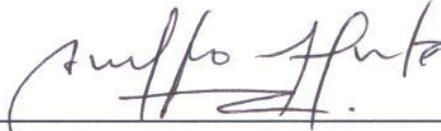
**CONSEJO PARTICULAR**

**CONSEJERO:**



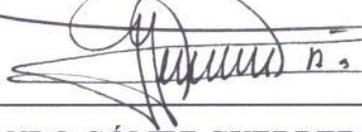
DR. VÍCTOR A. GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

**DIRECTOR:**



DR. ARNULFO ALDRETE

**ASESOR:**



DR. ARMANDO GÓMEZ GUERRERO

**ASESOR:**



DR. HÉCTOR M. DE LOS SANTOS POSADAS

**ASESOR**



DR. AURELIO M. FIERROS GONZÁLEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Noviembre de 2010.

**RESUMEN GENERAL**  
**EFFECTO DE ACLAREOS EN EL CRECIMIENTO DE UNA PLANTACIÓN DE *Pinus***  
***patula* Schl. et Cham. EN IXTLÁN, OAXACA**

**Gerardo Rodríguez Ortiz, DR.**

**Colegio de Postgraduados, 2010**

La eficiencia de crecimiento (EC) es la relación entre el follaje o el área de albura del fuste y el incremento maderable del árbol. Con este índice es posible analizar la respuesta del crecimiento y fisiología del fuste a factores de calidad de sitio, la edad, el aclareo y la densidad del rodal. El objetivo de este trabajo fue estimar y analizar los componentes de biomasa aérea y la eficiencia de crecimiento en árboles de *Pinus patula* Schl. et Cham. sujetos a aclareos en una plantación en Ixtlán, Oaxaca. En 2009 se realizaron muestreos destructivos en 30 árboles localizados en parcelas aclareadas y un testigo, para obtener muestras del componente aéreo. La biomasa de acículas por rama se estimó utilizando variables más susceptibles a las variaciones del medio ambiente, el sitio y el manejo del rodal que permitieron reducir problemas de heterocedasticidad y analizar las funciones de distribución de follaje en el fuste, y la partición del componente aéreo. Con las funciones de biomasa y volumen se obtuvo un factor de expansión de biomasa, útil para estimar la biomasa total del componente aéreo utilizando datos de inventario forestal. Para evaluar efectos de aclareo sobre la EC en esta especie es recomendable utilizar el área de albura de la sección transversal del tocón para estimar el área foliar proyectada (AF), ya que el aclareo induce incrementos en la proporción de tejido conductivo en albura. La EC con base en el incremento en volumen o biomasa de madera aumentó con la intensidad de aclareo (IA), produciendo mayor cantidad de madera por unidad de AF en árboles bajo aclareo; sin embargo, la EC disminuyó al incrementarse el AF, biomasa y volumen de madera de los árboles. El aclareo del 40 al 69 % de la densidad inicial de plantación generó un incremento en diámetro y altura de 75 y 52 %, respectivamente en relación con el testigo, y redujo área basal y volumen, diferencias que se minimizaron ante una mayor edad de la aplicación del aclareo. El aclareo modificó las tasas de acumulación y distribución de biomasa foliar y la cantidad de biomasa de madera con corteza en el fuste, pero no afectó la distribución de este componente ni el de ramas.

**Palabras clave:** Aclareos, biomasa aérea, albura, área foliar, eficiencia de crecimiento.

**GENERAL SUMMARY**  
**THINNING EFFECT IN THE GROWTH OF A *Pinus patula* Schl. et Cham.**  
**PLANTATION IN IXTLÁN, OAXACA**

**Gerardo Rodríguez Ortiz, DR.**

**Colegio de Postgraduados, 2010**

Growth efficiency (GE) is the relationship between foliage or stem sapwood area and wood increment of tree. With this index is possible to analyze the growth and stem physiology to site quality factors, age, thinnings and stand density. The aim of this work was to estimate and analyze aboveground biomass components and growth efficiency of *Pinus patula* Schl. et Cham. trees, under thinning in a plantation of Ixtlán, Oaxaca. In 2009 destructive samplings were realized in 30 trees located in thinned plots and a control, to obtain samples of aboveground component. Needle biomass per branch was estimated using variables more sensible to environment variations, site, and stand management that allowed reduce heterocedasticity problems and analyze functions of foliage distributions in the stem and aboveground biomass partition. Using biomass and volume equations a biomass expansion factor was obtained that is useful to estimate total aboveground biomass using forest inventory data. In order to evaluate thinning effects over GE in this specie is good to use sapwood area of cross section of stump to estimate projected leaf area (LA), because thinning increments the area of conductive tissue in sapwood. GE calculated in relation to volume increment or wood biomass was increased with thinning intensity (TI), yielding more wood per LA unit in thinned trees; nevertheless, GE decreased to increase LA, biomass and wood volume in trees. Removing from 40 to 69 % of the initial planting density produced an increment in diameter and height in relation to control of 75 and 52 %, respectively, and reduced basal area and volume, but these differences were minimized as cutting age application increased. Thinning modified accumulation and distribution rates of foliar biomass and wood with bark quantity in the stem, but no modified neither the distribution of this component nor branches.

**Key words:** Thinning, aboveground biomass, sapwood, leaf area, growth efficiency.

## DEDICATORIA

A mis padres, **Gerardo y Maura**<sup>†</sup> que me dieron su amor infinito, la inteligencia y la fuerza necesarias para triunfar en la vida. Los amaré por siempre ...

A mí querida hija **Litsea** y mi adorable hijo **Gerald**, que con su amor profundo me motivaron a culminar mis anhelados estudios de doctorado.

Para mi querida esposa **Tony**, quien soportó el alejamiento y tuvo la paciencia para educar durante este tiempo a nuestros hijos.

Para mis hermano(a)s: **Taide, Olivia, René, Claudia, Mónica y Oswaldo**; y cuñado(a)s: **Miguel, Lorena, Pablo, Manuel y Rosalía**, quienes me han dado el calor de una familia unida en las tristezas y alegrías. Gracias por quererme de esa manera.

Para todos mis sobrinos: **Betsy, Francisco, Ernesto, Rodrigo, René, Arlette, Laura, Yesenia, Monserrat, Daniel, Lisette, Pablo, Leonardo y Sandro**, que la presente sirva de motivación para cada uno de ellos.

A todos mis compañeros y amigos, que disfrutaron y sufrieron conmigo en el Colegio de Postgraduados, **Filemón, Wenceslao, Edgardo, Selene, Viridiana, Braulio, Karla, Guadalupe, Blanca, Lupita y Susi**, gracias por acompañarme.

A mis amigos de siempre y toda la vida **Rafael, Ponciano, Felipe, Victorino, Bertín, Juan R. Flores, José Cecosati, Miguel Galeote, Enrique F.**, y todos mis colegas Chapingueros, que aunque casi no nos vemos, los llevo siempre presentes.

Para mis queridos compañeros y amigos del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, mi más profundo agradecimiento, y con afecto especial para **Isabel Pérez**, por nuestra amistad y por haber soportado tantas molestias. Te estoy agradecido de por vida.

*Para el amor profundo y verdadero que es como un encino fuerte y vigoroso, tienen momentos de flaqueza y tristeza cuando existen problemas y el árbol pierde su esplendoroso follaje. Sin embargo, ambos están viviendo sobre cimientos firmes y grandiosos que ayudan a soportar las inclemencias del tiempo y de la vida, y sobre todo, nos dan la oportunidad de disfrutar lo maravilloso del amor sublime. Gracias te doy mi Dios por darme la dicha de conocerlo . . . Gera.*

## AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** que me brindó el apoyo económico para la realización de mis estudios.

A la **Dirección General de Educación Superior Tecnológica**, que a través del **Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO)** me dio la confianza y apoyo para la realización de mis estudios doctorales.

Al **Colegio de Postgraduados**, en los programas de Recursos Genéticos y Productividad-Fisiología Vegetal y Forestal que me brindaron todo el apoyo para la culminación exitosa de mis estudios.

Al **Dr. Víctor A. González Hernández**, consejero y amigo, que sin conocerme me dio la oportunidad de adentrarme en su experiencia y sabiduría, que llevaron a feliz término mi programa doctoral.

Al **Dr. Arnulfo Aldrete**, director de tesis, por su sentido profesional en la conducción de la investigación y por la libertad que me brindó en el desarrollo de la misma, lo cual generó en mí un sentido y espíritu de mayor responsabilidad.

Al **Dr. Héctor M. De los Santos Posadas**, por sus inmensos conocimientos estadísticos aplicados al quehacer forestal, que me ayudaron a mejorar sustancialmente este trabajo de investigación.

Para mi asesor y amigo, el **Dr. Armando Gómez Guerrero** que me impulsó a buscar mejoras para la tesis, y que con sus comentarios motivó mi trabajo.

Al **Dr. Aurelio M. Fierros González** por facilitarme información de su biblioteca y por la revisión atinada de este trabajo.

Para mi amigo el **Ing. Julio A. Ruiz Aquino**, responsable de los Servicios Técnicos Forestales de Ixtlán de Juárez, con eterno agradecimiento por las facilidades y apoyo brindados en los trabajos de campo en la plantación.

Para mis queridos amigos y estudiantes de Ingeniería Forestal del ITVO, por su gran apoyo: **Idalia, Jonathan, Rogelio, Celia, Miguel, Jorge y Laura Rebeca.**

A todos los profesores del Colegio de Postgraduados que de una u otra manera influyeron en mi formación académica, doctores **Jesús Jasso, Javier López, Víctor Cetina, Patricia Hernández, Jesús Vargas, Gustavo Ramírez, Josué Kohashi** y equipo de trabajo (especialmente al maestro

Toño), **Jorge Alvarado, Alfredo Carrillo, Ignacio Valdez, Carlos Ramírez y Gregorio Ángeles.**

Para mi amigo, **IBQI. Iván Ramírez** y personal del Laboratorio de Fisiotecnia (**Dra. Ana Bertha Cruz** y **Sr. F. Javier Carrillo**), muchas gracias por todas sus atenciones y facilidades brindadas en mi estancia en el Colegio.

A la **Sra. Maricela Valdez** encargada de la Oficina de Enlace de Fisiología y secretaria del Dr. Víctor, estoy eternamente agradecido por todas sus atenciones.

A las secretarias del Programa Forestal, con especial agradecimiento a **Maru**, muchas gracias por su amabilidad.

Para todas aquellas personas que de una u otra manera me ayudaron a culminar satisfactoriamente estos estudios y que dejo de mencionar, muchas gracias por todo.

*Paso noches, pensando en aquel día,  
que por fin pueda volver a reencontrarte,  
tener el regalo de mirarte y también la bendición de contemplarte,  
Aunque siento un miedo inexplicable, de que tú ni siquiera me regales,  
una dulce mirada de tus negros ojos,  
más ruego a Dios porque ese día tan esperado,  
pueda ver en el asombro de tu rostro,  
que tampoco tú a mí me has olvidado.*

*Gg,*

## CONTENIDO

RESUMEN GENERAL .....	iii
GENERAL SUMMARY.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
CONTENIDO.....	viii
ÍNDICE DE CUADROS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiv
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 GENERALIDADES SOBRE PLANTACIONES .....	1
1.2 PARTICIÓN DE BIOMASA AÉREA .....	2
1.3 ACLAREOS Y EFICIENCIA DEL CRECIMIENTO.....	3
1.3.1 Productividad de las plantaciones .....	3
1.3.2 Efecto de aclareos.....	5
1.3.3 Eficiencia en el uso del espacio de crecimiento (EEC).....	7
1.4 CARACTERÍSTICAS DE <i>Pinus patula</i> Schl. et Cham. ....	10
1.5 OBJETIVOS.....	12
1.6 HIPÓTESIS.....	13
1.7 LITERATURA CITADA.....	13
CAPÍTULO II .....	20
MODELOS DE BIOMASA AÉREA Y FOLIAR EN UNA PLANTACIÓN DE PINO DE RÁPIDO CRECIMIENTO EN OAXACA .....	20
2.1 RESUMEN.....	20
2.2 SUMMARY .....	20
2.3 INTRODUCCIÓN .....	21
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	23
2.4.1 El área de estudio .....	23
2.4.2 Muestreo de madera con corteza.....	24
2.4.3 Muestreo de ramas y acículas.....	25
2.4.4 Análisis estadístico de la información y estrategias de ajuste.....	26
2.5 RESULTADOS .....	26
2.5.1 Estimación de biomasa foliar por rama y por árbol .....	26

2.5.2 Modelos por componente y de partición de biomasa aérea en el árbol.....	31
2.6 DISCUSIÓN.....	35
2.6.1 Estimación de biomasa foliar por rama y por árbol .....	35
2.6.2 Modelos por componente y de partición de biomasa aérea a nivel árbol .....	36
2.7 CONCLUSIONES .....	38
2.8 LITERATURA CITADA.....	39
CAPÍTULO III .....	44
MODELOS PARA ESTIMAR EFICIENCIA DE CRECIMIENTO EN PLANTACIONES ACLAREADAS DE <i>Pinus patula</i> .....	44
3.1 RESUMEN.....	44
3.2 SUMMARY .....	44
3.3 INTRODUCCIÓN .....	45
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	47
3.4.1 Área de estudio.....	47
3.4.2 Muestreo de acículas y madera .....	47
3.4.3 Análisis estadístico de los datos .....	49
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
3.5.1 Relación área foliar: área de albura (AF: $A_{alb}$ ).....	49
3.5.2 Eficiencia de crecimiento (EC) .....	52
3.5.3 Incrementos con relación al aclareo .....	56
3.6 CONCLUSIONES .....	60
3.7 LITERATURA CITADA.....	61
CAPÍTULO IV .....	65
¿LOS ACLAREOS AFECTAN LA ACUMULACIÓN DE BIOMASA AÉREA EN UNA PLANTACIÓN DE <i>Pinus patula</i> ?.....	65
4.1 RESUMEN.....	65
4.2 SUMMARY .....	66
4.3 INTRODUCCIÓN .....	66
4.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	68
4.4.1 Antecedentes de la plantación .....	68
4.4.2 Muestreo de árboles y variables medidas.....	68
4.4.3 Análisis estadístico de los datos .....	70
4.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	70
4.5.1 Biomasa acumulada de madera con corteza ( $BAM_{CC}$ ) .....	70
4.5.2 Biomasa acumulada en acículas (BAA).....	74

4.5.3 Biomasa acumulada en ramas (BAR) .....	78
4.5.4 Biomasa aérea total (BAT).....	80
4.6 CONCLUSIONES .....	81
4.7 LITERATURA CITADA.....	82
CAPÍTULO V .....	86
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES .....	86
ANEXOS.....	88

## ÍNDICE DE CUADROS

		<b>Pág.</b>
Cuadro 2.1	Características de las parcelas de estudio y aclareos aplicados a <i>P. patula</i> en la plantación de Ixtlán, Oaxaca .....	23
Cuadro 2.2	Cuadrados medios del error (CME), error estándar (EE) y bondad de ajuste ( $R^2$ ) para los modelos lineales y no lineales que estiman el peso seco de acículas por rama .....	27
Cuadro 2.3	Parámetros estimados, error estándar y valor de t para los modelos no lineales de estimación de biomasa foliar por rama (Anexo 2.1) .....	28
Cuadro 2.4	Parámetros estimados, error estándar y valor de t para los modelos lineales de estimación de biomasa foliar por rama (Anexo 2.2) .....	29
Cuadro 2.5	Cuadrados medios del error (CME), error estándar (EE) y bondad de ajuste ( $R^2$ ) para los modelos que estiman la biomasa de madera con corteza por árbol (Anexo 2.4) .....	31
Cuadro 2.6	Parámetros estimados, error estándar y valor de t para los modelos de estimación de biomasa de madera con corteza (Anexo 2.4) .....	32
Cuadro 3.1	Volumen de aclareo, por árbol y porcentaje extraído de la densidad inicial por año de aclareo, densidad de árboles e indicadores de follaje en tratamientos de aclareo aplicados en <i>P. patula</i> en Ixtlán, Oaxaca .....	51
Cuadro 3.2	Incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en tratamientos con aclareos y el control en <i>P. patula</i> de Ixtlán, Oaxaca .....	57
Cuadro 4.1	Acumulación de biomasa aérea por componente y total a nivel árbol y por hectárea, en parcelas aclareadas de <i>P. patula</i> en Ixtlán, Oaxaca .....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 2.1 Relación entre los datos medidos y estimados de biomasa de acículas por rama mediante el modelo lineal 7 y el área basal de rama para <i>P. patula</i> ....	30
Figura 2.2 Comparación de medias (Tukey, $P = 0.05$ ) estimadas de biomasa de acículas por árbol con los siete modelos utilizados. Los modelos corresponden a las ecuaciones descritas en el texto (Anexo 2.3) .....	31
Figura 2.3 Estimación de biomasa total por árbol, mediante diámetro normal y altura de individuos de <i>P. patula</i> .....	33
Figura 3.1 Cociente área foliar ( $AF$ ):área de albura ( $A_{alb}$ ) en la sección de diámetro de tocón ( $DT$ ) en árboles de <i>P. patula</i> . La recta representa cinética lineal del cociente .....	50
Figura 3.2 Volumen ( $Vol$ ) y biomasa de madera producida por unidad de área foliar ( $AF$ ) en función de la intensidad de aclareo aplicado (porcentaje de densidad extraída con respecto a la densidad inicial de plantación) a <i>P. patula</i> . Las barras verticales representan el error estándar .....	53
Figura 3.3 Comparación de medias para la eficiencia de crecimiento ( $EC$ ) en función de la intensidad del aclareo (medido en porcentaje de árboles cortados) aplicado a <i>P. patula</i> . Los números entre paréntesis representan número de tratamiento (ver texto) y las líneas verticales el error estándar (Tukey, 0.03; $CV = 33\%$ ; $E.E. = 0.29$ ) (Anexo 3.4) .....	55
Figura 3.4 Estimación del incremento medio anual en volumen ( $IMA_v$ ) en función de área foliar ( $AF$ ) en árboles de <i>P. patula</i> en Ixtlán, Oaxaca (Anexo 3.5) ...	56
Figura 3.5 Incremento corriente anual en diámetro normal ( $ICA_{dn}$ ) antes y después de los aclareos en <i>P. patula</i> en Ixtlán, Oaxaca. Entre paréntesis el tratamiento respectivo. El porcentaje de densidad cortada se calculó con respecto a la densidad inicial de plantación .....	58
Figura 4.1 Biomasa de madera acumulada por árbol estimada en función al diámetro normal a una altura base de 10 y 20 m en <i>P. patula</i> bajo aclareo y en un testigo sin aclareo, en Ixtlán, Oaxaca .....	73
Figura 4.2 Estimación de biomasa acumulada en acículas, en la copa viva de <i>P.</i>	

	<i>patula</i> , para las parcelas aclareadas y el testigo sin aclarear, en Ixtlán, Oaxaca .....	76
Figura 4.3	Promedio de biomasa foliar acumulada a diferentes alturas del fuste de <i>P. patula</i> , en parcelas aclareadas (P1 a P5) y en el testigo sin aclarear, en Ixtlán, Oaxaca .....	77
Figura 4.4	Promedio de acumulación de biomasa en ramas de <i>P. patula</i> a diferentes alturas del fuste, en parcelas sometidas a aclareo (P1 a P5) y en el testigo sin aclarear, en Ixtlán, Oaxaca .....	79

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo 2.1 Parámetros estimados para los modelos no lineales de estimación de biomasa foliar por rama .....	88
Anexo 2.2 Parámetros estimados para los modelos lineales de estimación de biomasa foliar por rama .....	90
Anexo 2.3 Análisis de varianza para los modelos de estimación de biomasa foliar por árbol en las parcelas aclareadas .....	92
Anexo 2.4 Modelos de regresión para estimar biomasa de madera en el fuste por árbol en las parcelas aclareadas .....	94
Anexo 2.5 Modelos de regresión para estimar biomasa en ramas por árbol en las parcelas aclareadas .....	97
Anexo 2.6 Modelos de regresión para estimar biomasa foliar por árbol en las parcelas aclareadas .....	99
Anexo 2.7 Estimación de biomasa total por árbol y partición de biomasa aérea en árboles de <i>P. patula</i> .....	100
Anexo 2.8 Factores de expansión de biomasa variable (FEB) obtenidos del cociente entre biomasa total aérea y volumen total de madera en el fuste aplicables para todo el rango de variación de diámetro normal (DN) y altura total (AT) de <i>P. patula</i> .....	101
Anexo 2.9 Base de datos para los análisis estadísticos del capítulo dos .....	102
Anexo 3.1 Parámetros estimados, residuales e intervalos de confianza para el modelo que estima área foliar por rama en árboles de <i>P. patula</i> .....	112
Anexo 3.2 Regresión lineal para estimar área foliar en función al área de albura en las secciones de tocón (T), diámetro normal (N) y diámetro de copa viva (CV) en <i>P. patula</i> .....	117
Anexo 3.3 Modelo de regresión para estimar área foliar mediante el área de albura en la sección de inicio de copa viva y diferenciar el efecto del aclareo en <i>P. patula</i> .....	122
Anexo 3.4 Análisis de varianza para la eficiencia de crecimiento ( <i>EC</i> ) en función de la	

	intensidad de aclareo aplicado a <i>P. patula</i> .....	123
Anexo 3.5	Modelo de regresión para estimar el incremento medio anual en volumen ( $IMA_V$ ) en función de área foliar ( $AF$ ) en árboles de <i>P. patula</i> .....	125
Anexo 3.6	Base de datos para análisis estadístico del capítulo tres .....	126
Anexo 4.1	Modelo de regresión que evalúa el efecto del aclareo sobre la biomasa acumulada de madera con corteza en el fuste de <i>P. patula</i> .....	131
Anexo 4.2	Estimación de biomasa acumulada en madera en función al diámetro normal (DN) a diversas alturas (AT) en árboles de <i>P. patula</i> bajo aclareo (Acl) y testigo (Test) en Ixtlán, Oaxaca .....	132
Anexo 4.3	Modelo de regresión que evalúa el efecto del aclareo sobre la distribución de biomasa foliar en <i>P. patula</i> .....	133
Anexo 4.4	Modelo de regresión que evalúa el efecto del aclareo sobre la distribución de biomasa en ramas de <i>P. patula</i> .....	134

# CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.1 GENERALIDADES SOBRE PLANTACIONES

Las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero en México, tales como CO<sub>2</sub>, clorofluorocarbonados, óxido nitroso, metano, entre otros, son (en millones de tC): el uso de combustibles fósiles para la producción de energía (83.8), los procesos derivados del cambio en el uso del suelo y las actividades silvícolas (30.2), y la industria del cemento (3.1); todas ellas representan 1.45 % de las emisiones totales en el planeta (Ordoñez y Masera, 2001). Específicamente en el sector agropecuario y silvícola, la conversión de bosques de coníferas a cultivos agrícolas genera un incremento significativo en el flujo de CO<sub>2</sub>-C del suelo a la atmósfera, de aproximadamente 2.09 g C m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (Campos, 2004), lo que puede superar las ganancias por productividad primaria neta de algunos bosques. Por otro lado, la vegetación perenne tiene la capacidad de asimilar carbono a través de la fotosíntesis, fijarlo en su estructura y mantenerlo por largos periodos en los reservorios de biomasa, esto se conoce como el tiempo medio de residencia.

Por esta razón, la tendencia actual del sector forestal nacional y mundial es mantener los bosques naturales con fines de conservación y como sumideros de carbono, e implementar proyectos de plantaciones forestales comerciales (PFC) con especies de rápido crecimiento para la satisfacción de bienes y servicios.

Otra ventaja de esta estrategia es la mejora en los niveles de productividad, pues mientras los bosques naturales y bajo buen manejo en México tienen crecimientos promedios de 1 a 2 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, las PFC pueden alcanzar niveles superiores de 20 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> con especies coníferas y mayores de 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> con eucaliptos (Shelbourne *et al.*, 2000; Kietzka *et al.*, 2007).

El futuro de esta actividad está en lograr los más altos rendimientos en producción por unidad de área en el menor tiempo y costo. Además, debe tenerse presente el material genético a utilizar y el manejo de la plantación, para maximizar la productividad de los sitios de acuerdo con el objetivo que se persiga, con base en optimizar y potencializar las características ecológicas, morfológicas y fisiológicas de las especies utilizadas (Luna-Rodríguez *et al.*, 2005).

Diferentes intereses industriales, energéticos y ambientales hacen que en los últimos años las PFC adquieran mayor importancia, no sólo para el aprovechamiento de madera sino también para utilizar la biomasa arbórea no maderable, conservar la biodiversidad y ofrecer servicios ambientales. Las PFC utilizadas como biomasa pueden disminuir la dependencia de combustibles fósiles, reducir las emisiones y generar electricidad y etanol, ya que a pesar de su alta productividad, requieren menos fertilizantes y energía que los cultivos agrícolas (Amatayakul y Azar, 2003).

La importancia actual de las PFC en el país demanda de técnicas adecuadas para cuantificar la biomasa y crecimiento, porque son herramientas importantes para analizar su productividad y para el manejo silvícola. En México esta productividad sólo se ha evaluado en términos de la cantidad de madera por unidad de área y tiempo, pero sin haber incluido variables de la copa que son más sensibles a las variaciones del ambiente, sitio y manejo; tampoco se ha relacionado al crecimiento con variables fisiológicas, mediante índices que reflejen la eficiencia de la utilización del espacio de crecimiento (EEC).

A través de la EEC con base en área foliar (AF) o área de albura ( $A_{alb}$ ), puede obtenerse una medida de la contribución de estas variables al crecimiento del árbol o del rodal y, por consecuencia, permitirían evaluar la productividad potencial de diferentes estructuras en una plantación.

## 1.2 PARTICIÓN DE BIOMASA AÉREA

La biomasa aérea de un árbol está comprendida por el peso seco contenido en madera, corteza, ramas y follaje. Las metodologías más precisas y adecuadas para analizarla están basadas en muestreos destructivos para generar ecuaciones alométricas que relacionen la biomasa del componente con variables de fácil medición. Estas ecuaciones se utilizan para extrapolar la muestra de un componente-árbol a unidades de superficie.

En *Pinus patula*, Figueroa (2007) determinó un modelo de biomasa por árbol ( $B_{\text{árb}}$ ) para bosques manejados en Hidalgo, México, de la forma  $B_{\text{árb}} = 5.34 + 18.63 (DN^2 \times AT)$ , donde DN es el diámetro normal (cm) y AT la altura total (m). En los mismos rodales, Aguirre-Salado *et al.* (2009) utilizaron el modelo de Schumacher para estimar la biomasa de follaje ( $B_{\text{follaje}}$ ) a nivel

árbol ( $B_{\text{follaje}} = 29.44 e^{(-26.5/DN)}$ ). El contenido de carbono en fuste, ramas, corteza y follaje fue de 0.506, 0.505, 0.522 y 0.503, respectivamente, y los rodales de 20 a 24 años pueden secuestrar más de 25 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de carbono. Díaz-Franco *et al.* (2007) propusieron la ecuación  $B_{\text{árb}} = 0.036 \times DN^{2.69}$  para estimar biomasa (kg) en árboles de *P. patula* en Tlaxcala, y determinaron una concentración promedio de carbono de 0.503; el carbono total se distribuyó: 78.8 % en fuste, 7.5 % en ramas, 8.6 % en follaje y 5.1 % en tocón. Según Acosta-Mireles *et al.* (2009), los rodales de *P. patula* mezclados con *Abies religiosa* retuvieron mayor cantidad de carbono total (301.9 Mg ha<sup>-1</sup>) que los rodales puros de pino (183.2 Mg ha<sup>-1</sup>).

Los factores que pueden afectar la partición de biomasa son varios. Por ejemplo, la fertilización con P aplicada a plantas jóvenes de *Eucalyptus grandis* permitió incrementar el follaje y reducir la raíz, lo que a largo plazo puede elevar la susceptibilidad al déficit hídrico; en cambio, la aplicación de N incrementó la biomasa en raíz sin cambiar la magnitud del follaje (Graciano *et al.*, 2006).

Según Oliver y Larson (1996), existe una jerarquía en la prioridad de partición de biomasa, donde el tallo tiene menos prioridad que el follaje (para mejorar la competencia por luz) y que las raíces finas (para mejorar la competencia por agua y nutrientes). Con el incremento de la densidad de plantas, la competencia intraespecífica en el suelo y subsuelo también se incrementa y cambia estas prioridades de partición (Burkes *et al.*, 2003).

Otros factores que afectan la partición de biomasa son la calidad del sitio y la disponibilidad de nutrientes (Wang *et al.*, 1998). En *P. patula*, Aguirre-Salado *et al.* (2009) determinaron proporciones de biomasa aérea en bosques bajo manejo en Hidalgo de 0.777, 0.095 y 0.115, para fuste, ramas y corteza, respectivamente.

## 1.3 ACLAREOS Y EFICIENCIA DEL CRECIMIENTO

### 1.3.1 Productividad de las plantaciones

El crecimiento y rendimiento de un rodal son una función de la productividad primaria neta y de la asignación de biomasa hacia el fuste y otros componentes del árbol (follaje, ramas, raíz). La productividad se mide en unidades de volumen o biomasa por unidad de superficie y tiempo. Debido a que los incrementos en la densidad de plantas en un sitio, generalmente aumentan la

adquisición y uso de recursos como nutrientes y agua, el incremento medio anual por hectárea (IMA) tiende a aumentar, aunque descienda la tasa de crecimiento de árboles individuales (Burkes *et al.*, 2003).

A nivel mundial, las PFC más productivas se han obtenido con especies latifoliadas en sitios tropicales de buena calidad y humedad. Por ejemplo, en Tailandia la productividad de las plantaciones de eucalipto se estimó entre 7 y 12 t de materia seca ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, en un periodo de rotación de 3 a 5 años (Amatayakul y Azar, 2003). En plantaciones de *Eucalyptus tereticormis* de 8.5 años de edad establecidas en Pakistán, se encontró un promedio de 21 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> de área basal (AB) e IMA en volumen de 44.3 7 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Dogra y Sharma, 2005). En Nueva Zelanda, Shelbourne *et al.* (2000) reportaron un IMA en volumen de 52 y 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, para *E. fastigata* y *E. regnans*, respectivamente.

En un ensayo de especies, procedencias y progenies con pinos subtropicales de México plantados en países de Sudamérica y Sudáfrica, se encontró un IMA en volumen de 3 a 24.5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en *Pinus herrerae*, a una edad de 8 a 13 años. Este pino mostró mejores crecimientos en áreas subtropicales, pero no superó a los mostrados por *P. patula* procedente de bosques templados de México (Kietzka *et al.*, 2007).

En el país existe un aumento en el establecimiento de PFC con especies introducidas y nativas de rápido crecimiento. Se han plantado especies latifoliadas en climas tropicales y subtropicales con excelentes rendimientos. En *Gmelina arborea* plantada en Michoacán, el crecimiento inicial correspondió a un IMA en altura de 3.41 m año<sup>-1</sup> y un IMA en diámetro de 5.1 cm año<sup>-1</sup>; los valores respectivos para *Acrocarpus fraxinifolius* fueron 3.12 y 3.45, y para *Tectona grandis* de 2.68 y 2.55 (Muñoz *et al.*, 2009).

Para coníferas de poblaciones naturales se han determinado algunos incrementos muy elevados, en relación a la productividad media de los bosques mexicanos (IMA en volumen de 1 a 2 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). García-García *et al.* (2004) encontraron, para algunas poblaciones mexicanas de *Pinus greggii* variación en la productividad en zonas de alta y baja precipitación, con IMA en volumen de 15 y 7 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente. En un ensayo de especies y procedencias establecido en 1995 en el centro de México con pinos nativos y 11 procedencias de *P. patula*, a los 5 años se encontró que *Pinus maximinoi* mostró mayor IMA en altura (2 m año<sup>-1</sup>), IMA en diámetro (2.8 cm año<sup>-1</sup>) y volumen individual (0.062 m<sup>3</sup>), y que *P. patula* tuvo el menor volumen (0.030 m<sup>3</sup>) (López-Upton *et al.*, 2005).

En plantaciones establecidas en Ixtlán, Oaxaca (cercanas a la plantación sujeta a estudio), se encontró que *P. patula* var. *longipedunculata* mostró mejores crecimientos que *P. pseudostrobus* y *P. ayacahuite*, en los primeros 6 años de crecimiento, con IMA en altura de  $0.614 \text{ m año}^{-1}$  e incremento en volumen individual de  $0.00106 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  (Hernández *et al.*, 2003). La plantación de *P. patula* motivo de este trabajo, mezclada con *Pinus pseudostrobus*, tuvo un IMA en volumen cercano a  $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , sin tomar en cuenta parcelas con aclareos (Servicios Técnicos Forestales Ixtlán de Juárez, 2008).

### 1.3.2 Efecto de aclareos

Después de la calidad de sitio, el manejo de la densidad por medio del aclareo es el segundo factor en importancia para determinar la productividad de un sitio forestal. El aclareo es la técnica utilizada por el silvicultor, con la intención de mejorar el crecimiento y calidad de los árboles; es muy conocido que mediante aclareos se redistribuye la capacidad productiva del sitio entre los individuos que quedan en pie, los cuales tienen una mayor disponibilidad de radiación fotosintéticamente activa y mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo. Los efectos del aclareo son múltiples, porque puede influir en el establecimiento de especies, la calidad del fuste y la tasa de crecimiento, al modificar las condiciones del sitio, el suelo y los factores fisiológicos.

La mayoría de las investigaciones realizadas en aclareos tratan sobre sus efectos en el crecimiento individual de árboles o del rodal. En una plantación de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* de 8 y 11 años ubicada en La Sabana, Oaxaca, Ruiz *et al.* (1996) evaluaron el efecto de niveles de aclareo (0, 20, 40, 60 y 80 %), sobre la densidad inicial ( $2,500 \text{ árboles ha}^{-1}$ ). En las mayores intensidades de aclareo encontraron mayores incrementos absolutos en DN (3.70 cm), AB ( $8.321 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ) y volumen ( $47.84 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ); los dos últimos indicadores se incrementaron en forma inversa con la densidad residual del rodal, de manera que decrecieron en los altos niveles de aclareo.

Según Jaakkola *et al.* (2005), en *Picea abies* L. tanto los aclareos de intensidad normal ( $27 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  de AB residual) como los de alta intensidad ( $24 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  de AB residual) indujeron aumentos de 52 y 68 % en el crecimiento del AB de árboles individuales, respectivamente, con relación a una intensidad baja de aclareo ( $40 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  de AB residual). Aclareos intensivos (espaciamiento residual de  $2.13 \times 2.13 \text{ m}$ ) en *Pinus banksiana* permitieron incrementar la amplitud de copa,

diámetro de ramas, ahusamiento y crecimiento en altura (13.1 %), DN (20 %) y volumen comercial del fuste (75 %), con respecto al testigo no aclareado (Zhang *et al.*, 2006).

El aclareo también puede reducir la calidad de la madera al aumentar la proporción de madera juvenil, o mejorarla al aumentar la anchura total de los anillos y la anchura de madera temprana y tardía, como ocurrió en *P. patula* a dos años de aplicadas las cortas (Hernández *et al.*, 1996). En *Pinus banksiana* Zhang *et al.* (2006) encontraron que el aclareo redujo la calidad de la madera al disminuir el módulo de elasticidad y ruptura. La reducción de los espaciamientos iniciales utilizados (600 a 9,000 plantas ha<sup>-1</sup>) en árboles de 18 años de *Eucalyptus marginata* generó pequeños incrementos en la densidad de albura (Grigg *et al.*, 2008).

Un efecto inmediato después de la aplicación de los aclareos es la reducción del índice de área foliar (IAF); pero posteriormente pueden presentarse pequeños incrementos, en función de la especie, calidad de sitio y condiciones de manejo. Grigg *et al.* (2008) encontraron en *Eucalyptus marginata* un valor de 1.2 de IAF en rodales de baja densidad y de 2 a 2.5 en rodales densos, además de encontrar descensos en el área foliar específica (AFE) por efecto de aclareos.

El aclareo también modifica algunas variables fisiológicas, como el estrés inicial observado en *Pinus sylvestris*, porque el aclareo reduce la transpiración, el flujo de savia (muy relacionado con la biomasa foliar) y el crecimiento; pero después sigue una fase de estimulación del crecimiento (Lagergren y Lindroth, 2004).

Aclareos realizados en *Pinus ponderosa* con base en el área basal incrementaron el potencial hídrico del suelo ( $R^2 = 0.98$ ), sin afectar la capacidad fotosintética (McDowell *et al.*, 2006). En la misma especie, Simonin *et al.* (2006) encontraron que el aclareo incrementó el potencial hídrico del árbol (al amanecer) a dos semanas de aplicados los tratamientos, y que sus efectos en la conductancia (transporte) de agua del suelo a la hoja y en la transpiración por unidad de AF, dependen del DN, de la relación AF:A<sub>alb</sub> y de la severidad de la sequía. A un año de aplicar aclareo, en *P. ponderosa* se incrementaron los siguientes variables: contenido volumétrico de agua en suelo, potencial hídrico del xilema al amanecer (y un descenso a medio día), tasa neta de fotosíntesis, concentración de N foliar, tamaño de yemas y acículas, crecimiento del dosel y absorción de agua, N y C (Stone *et al.*, 1999).

Otro efecto positivo del aclareo es al combinarlo con quemas prescritas, pues así resultan más efectivos para reducir la superficie de material leñoso fino y grueso, e incluso para remover árboles pequeños con lo cual se reduce el riesgo de incendios (Innes *et al.*, 2006). El aclareo

mejoró el crecimiento de un rodal de *Abies magnifica*, además de reducir los combustibles para incendios y acelerar su desarrollo (Zhang *et al.*, 2005). En *Pinus contorta* var. *latifolia* Tan *et al.* (2008) encontraron que 24 años después de aplicados los aclareos había menor masa de piso forestal ( $59 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) que en rodales sin aclareo ( $75 \text{ Mg ha}^{-1}$ ); el aclareo también incrementó el contenido de humedad edáfica en el piso forestal, la tasa de mineralización neta de nitrógeno, y el N disponible en el suelo mineral.

Se sabe que los aclareos aplicados a rodales de latifoliadas de EE. UU., con base en la estructura diamétrica, pueden afectar el secuestro de carbono y el crecimiento del rodal de manera positiva o negativa. Parcelas aclareadas en la parte inferior de la estructura (aclareo por lo bajo) mostraron tasas de producción en volumen y secuestro de C más grandes que la parcelas aclareadas en la mitad superior (aclareo por lo alto), y que el testigo mostró tasa de secuestro de C más altas que las parcelas aclareadas en la parte inferior (Hoover y Stout, 2007). En el estado de Yucatán, México se encontró que la acumulación de C en bosques tropicales fue mayor en parcelas con aclareo que en el testigo, incluso después de 5 años de aplicadas las cortas, aunque el C total del ecosistema permaneció constante (Vargas *et al.*, 2009).

### **1.3.3 Eficiencia en el uso del espacio de crecimiento (EEC)**

Una vez que la plantación se ha establecido, inicia un periodo de crecimiento hasta alcanzar un máximo, que por lo general sucede cuando se alcanza la mayor superficie de área foliar, o cuando los fustes han acumulado una biomasa entre  $40$  y  $60 \text{ Mg ha}^{-1}$ , como se observó en plantaciones de eucalipto en Brasil; en los cuales, el crecimiento declina (Binkley *et al.*, 2002). Cuando el rodal madura, la presencia de árboles dominantes (D) incrementa el uso de recursos, y los cambios en la estructura final por efecto de aclareos reducen el crecimiento del rodal, debido a que los árboles D (que utilizan una gran proporción de los recursos del sitio) son ineficientes en el crecimiento de madera, por su bajo uso de recursos, como la intercepción de luz (Binkley *et al.*, 2002; Smith y Long, 2001).

Este aspecto se ve reforzado por el estudio realizado por Smith y Long (2001), quienes dedujeron que la redistribución progresiva de una cantidad constante de follaje en un menor número de copas de mayor tamaño, hace decrecer la *EEC* de árboles dominantes, al mismo tiempo que la supresión competitiva decrece la eficiencia de árboles no dominantes. En los árboles suprimidos (S) la *EEC* también se reduce porque se altera la asignación de carbohidratos;

quizás estos individuos fijan tanto carbono por unidad de recurso utilizado como los árboles D, pero asignan más carbono a la producción de otros tejidos, como raíces, o a la respiración, debido a su baja capacidad fotosintética (Binkley *et al.*, 2002). Según Roberts *et al.* (1993), la eficiencia del crecimiento debe ser más alta entre árboles codominantes (CD) de un rodal que posee poca AF y muchos individuos en el dosel. Ante niveles de mayor estratificación, los individuos intermedios (I) podrían tener eficiencias de AF más grandes que los árboles suprimidos (los cuales reciben mucha menos luz) o que los árboles D (los cuales no pueden utilizar totalmente la luz interceptada).

Para poder relacionar el crecimiento maderable con variables de biomasa, área foliar o área de albura, se requiere en primera instancia medirlas. En este aspecto existe una inherente dificultad para medir el follaje. Por ello, a menudo se utilizan relaciones alométricas para predecir atributos a nivel de rama y de árbol, como biomasa total, biomasa de acículas, biomasa de copa y AF proyectada (Gilmore y Zenner, 2005). Debido a que la albura es la parte activa del xilema para el transporte de agua y nutrientes hacia las hojas, resulta un factor de estimación efectivo para las tasas de transpiración. El área de albura permite establecer el límite de la cantidad de follaje de un árbol y por tanto de su vigor (Quiñonez-Piñón y Valeo, 2004).

Esta relación es conocida como el modelo tubular y representa una de las formas más precisas para estimar AF a nivel árbol o rodal (Gajardo-Caviedes *et al.*, 2005). Sin embargo, en árboles de *Pinus taeda* de 30 años de edad, Shelburne y Hedden (1996) demostraron que la permeabilidad de la albura no es constante y es afectada por la posición en el fuste, distancia de la médula y calidad del sitio. Por ello, el área de albura ( $A_{alb}$ ) idónea en el fuste para realizar las extrapolaciones de follaje es el punto de inicio de copa viva (DCV), ya que un estudio hecho en plantaciones de eucalipto con aclareos de 8 años mostró que en la relación AF:  $A_{alb}$ , el área de tejido vivo en el DCV abasteció 60 % más de AF que una cantidad similar de  $A_{alb}$  en el DN; es decir, existe mayor eficiencia en el transporte de agua a través de la albura, la cual no fue afectada por el aclareo (Medhurst y Beadle, 2002).

El incremento de AB o volumen para coníferas puede expresarse en términos de la cantidad y distribución vertical de área foliar, lo cual permite analizar la respuesta del crecimiento y fisiología a factores tales como calidad de sitio, la edad, los tratamientos silvícolas y la densidad del rodal (Dean, 2004). Lo anterior se puede analizar mediante el concepto de eficiencia en el uso del espacio de crecimiento (*EEC*) o eficiencia del crecimiento (*EC*), el cual fue inicialmente

definido por Waring *et al.* (1980) y se entiende como el crecimiento en volumen de madera en el fuste por unidad de AF proyectada, AF total del árbol o por unidad de cualquier otro recurso utilizado (Berril y O'Hara, 2007). Dicho concepto también ha sido usado para entender y cuantificar la relación entre el crecimiento del árbol, la estructura del rodal y la disponibilidad de recursos del sitio, así como para examinar los efectos de tratamientos silvícolas (aclareos, espaciamiento inicial, fertilización y podas) en el crecimiento del rodal (O'Hara, 1996; McCrady y Jokela, 1998).

El comportamiento de la *EEC* es muy variable en árboles forestales. Por ejemplo, se ha observado que declina con la edad del árbol o rodal, cuando la disponibilidad de luz, agua y nutrientes llega a ser limitante; estos descensos pueden ser detectados en edades tempranas de una plantación, como en *Pinus taeda* (Samuelson, 1999). En dos especies de coníferas en rodales incoetáneos mezclados de EE. UU. Seymour y Kenefic (2002) observaron que la *EEC* sigue un patrón sigmoide, con un máximo en el dosel medio y superior de los árboles, y que se reduce con la edad, independientemente del incremento del AF proyectada.

El patrón de *EEC* en especies intolerantes a la sombra (*i. e.*, *Pinus patula*), es de descenso continuo no lineal conforme aumenta el AF y el tamaño de la copa; mientras esto último sucede, una proporción mayor de AF se asigna a ramas grandes y viejas en la parte inferior de la copa, las cuales presumiblemente son sostenidas fisiológicamente a expensas de la producción de madera. En árboles tolerantes a la sombra, la *EEC* de las clases de copa inferiores (I y S) es típicamente más baja que la de los árboles del dosel principal (Jack y Long, 1992).

La *EEC* se ha determinado mediante el empleo de índices de crecimiento. En *Pseudotsuga menziesii*, O'Hara (1998) utilizó el cociente del incremento volumétrico del fuste entre el área de albura, el cual fue más alto en árboles con mayor área de albura; el aclareo redujo la variabilidad del crecimiento del fuste por unidad de área de albura. Para especies de pino en EE. UU., Dean (2004) propuso una ecuación que calcula el incremento de madera en el fuste en función del producto de AF por la eficiencia de la misma. Jack *et al.* (2002) utilizaron el incremento en biomasa del fuste para determinar *EEC* de 0.64 y 0.58 kg m<sup>-2</sup> para *P. palustris* y *P. elliotii*, respectivamente; sin encontrar diferencias entre árboles maduros a pesar de haber claras diferencias en la asignación de biomasa aérea.

Meadows y Hodges (2002) utilizaron el índice de crecimiento que relaciona AF por unidad de área de albura, cuyo valor fue de 0.67 m<sup>2</sup> cm<sup>-2</sup> para *Fraxinus pennsylvanica* y de 0.24 m<sup>2</sup> cm<sup>-2</sup>

para *Quercus falcata* var. *pagodifolia*, y encontraron que el índice varió entre clases de copa. Burkes *et al.* (2003) evaluaron la eficiencia del crecimiento de biomasa en *Pinus taeda* y *P. elliottii*, y encontraron que el crecimiento del fuste (producido durante la cuarta estación de crecimiento) expresado por unidad de biomasa foliar, fue significativamente bajo en rodales de baja densidad (740 árboles ha<sup>-1</sup>), mientras que el crecimiento se incrementó en follaje o raíces finas al aumentar la densidad del rodal. En *Eucalyptus crebra* de Australia, Zeppel y Eamus (2008) utilizaron el valor de Huber, que es el cociente entre A<sub>alb</sub> y AF, para estimar la tasa del uso de agua por el árbol.

#### 1.4 CARACTERÍSTICAS DE *Pinus patula* Schl. et Cham.

**Distribución.** En forma natural en México se distribuye en la Sierra Madre Oriental, Eje Neovolcánico y Sierra Madre de Oaxaca, y se extiende hasta Nicaragua. Por su crecimiento acelerado y gran tamaño ha sido plantado extensamente fuera de su área de distribución, como en Sudáfrica, India, Australia y Sudamérica, entre los paralelos 40° de LN y 40° de LS. Como especie exótica prospera en sitios libres de heladas, con un mínimo de 750 mm de precipitación, en suelos ácidos (pH de 4.5 a 5.5), profundos y húmedos, y altitudes entre 1,400 y 3,200 m (Guillemie, 1992).

**Ecología y reproducción.** Bajo plantación la inflorescencia por lo general surge de un brote de primavera, y puede haber dos floraciones (primavera y final del verano). Puede florecer desde los tres años de edad, con una producción anual abundante de conos entre los 8 y 10 años (Guillemie, 1992; Dvorak *et al.*, 2000). Es intolerante a la sombra y sensible a la competencia por agua durante la sequía.

**Follaje.** Es de hojas perennifolias. En México, el renuevo de hojas ocurre en dos periodos; en febrero brotan las hojas del primer internudo (maduran en marzo), y en mayo comienza la aparición de nuevas hojas en el segundo internudo (maduran en junio), al tiempo que caen las formadas al inicio del año (Guillemie, 1992). Es moderadamente resistente a la enfermedad de tizón del follaje cuando las plantaciones son establecidas fuera de su distribución natural, donde su resistencia se incrementa (Malan, 1994).

**Madera.** Puede llegar a tener hasta 50 % de fuste limpio. Esta especie presenta alta incidencia de nudos y ramillas, por lo que tiende a formar tablones menos uniformes que *P. pringlei* y no produce alta proporción de madera limpia (Malan, 1994). El rápido crecimiento de esta especie genera una mayor proporción de madera juvenil de mala calidad industrial durante los primeros 10 años de crecimiento (Meza *et al.*, 2005). La madera obtenida de una plantación tiende a mostrar menor densidad y dureza que la proveniente del bosque natural, con fuerte contraste entre la madera temprana y tardía. El duramen rosáceo a rojo claro, con mayor proporción de madera juvenil, tiene menor densidad y fortaleza, y por ello se utiliza para la manufactura de cajas, contenedores grandes, tablillas para techos y productos ensamblados; la albura es de color amarillo con una densidad ( $0.46 \text{ g cm}^{-3}$ ) y fortaleza mayores, y se utiliza para obras estructurales. En plantaciones de 10.5 años en Sudáfrica se encontró un volumen de  $0.155 \text{ m}^3$  por árbol, densidad de la madera de  $0.44 \text{ g cm}^{-3}$ , y producción de 32 kg de fibra por árbol, características adecuadas para producir pulpa (Wright, 1992).

**Crecimiento.** Durante el primer año de plantación la altura alcanza de 0.9 a 1.5 m, y deja de crecer aproximadamente a los 25 años. En rodales bien manejados y con buena calidad de sitio puede alcanzar  $35 \text{ m}^3$  de  $\text{IMA}_V$ , de los cuales  $27 \text{ m}^3$  pueden ser utilizables, en rotaciones de 30 años; en sitios de menor calidad el  $\text{IMA}_V$  es menor de  $20 \text{ m}^3$ . En plantación el IMA alcanza su máximo de 14 a 18 años, por lo general. Los mejores crecimientos se logran en etapas tempranas, hasta los 15 años de edad en suelos profundos y elevaciones entre 1,800 y 2,000 m, cuando se utiliza como especie exótica (Malan, 1994). Plantaciones establecidas en Veracruz, Méx., con material procedente de un huerto semillero de segunda generación de Sudáfrica, han mostrado un crecimiento inicial acelerado en diámetro, el cual está correlacionado positivamente con la altitud, que al igual que el clima son importantes en la edad adulta y la madurez sexual (Tolome y Alba-Landa, 2004). En una plantación de 18 meses establecida en Puebla, *P. patula* mostró menores crecimientos en altura ( $1.92 \text{ m año}^{-1}$ ) que *P. maximinoi* y *P. tecunumanni*. Su tasa de crecimiento se correlaciona positivamente ( $r = 0.75$ ) con el número de ciclos de crecimiento (Salazar *et al.*, 1999).

**Manejo silvícola.** Semillas colectadas en Veracruz han mostrado una germinación de 79 % en condiciones de vivero, la cual inicia de 11 a 13 días (Aparicio *et al.*, 1999). La regeneración natural bajo el método de árboles padres, en Hidalgo, es de manera regular y uniforme con 4,200 árboles  $\text{ha}^{-1}$  y queda establecida a cuatro años del aprovechamiento (Castelán-Lorenzo y Arteaga-

Martínez, 2009). El espaciamiento inicial de plantación recomendado es de 2.40 a 2.75 m (1508 plantas ha<sup>-1</sup>, en promedio). Es sensible a la competencia durante sus primeros años, ya que puede llegar a ocupar la totalidad del sitio en dos años. Se recomiendan aclareos precomerciales a los 6 años, para dejar de 15 a 40 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> de AB residual y así afectar gradualmente la distribución temporal y diamétrica de los rendimientos. En el manejo de la plantación se recomienda la aplicación de podas desde los 2.5 m, las cuales permiten tener mejores respuestas en el crecimiento en altura y calidad de la madera al año de ser aplicadas, aunque reducen el crecimiento en diámetro. El IMA<sub>DN</sub> es de 1.71 cm y el IMA<sub>H</sub> de 1.29 m (Domínguez *et al.*, 1997).

## 1.5 OBJETIVOS

### a) Objetivo general

Estimar y analizar los componentes de biomasa y área foliar y la eficiencia del uso del espacio de crecimiento, en parcelas sometidas a aclareo en una plantación de rápido crecimiento de *Pinus patula* Schl. *et* Cham. en Ixtlán de Juárez, Oaxaca.

### b) Objetivos específicos

- Desarrollar modelos matemáticos para estimar la biomasa foliar a nivel rama y árbol completo, así como ajustar modelos de partición de biomasa aérea, para ser aplicados a datos de inventario en plantaciones.
- Estimar y analizar la relación existente entre área foliar y área de la sección transversal de albura de los árboles, para determinar su eficiencia de crecimiento en relación con la intensidad de aclareo.
- Analizar el efecto de los aclareos aplicados en forma bianual, sobre la distribución y acumulación de biomasa aérea.

## 1.6 HIPÓTESIS

- a) La estimación de partición de biomasa se puede mejorar significativamente al incluir variables que diferencian la posición de los componentes aéreos en la copa de los árboles.
- b) La intensidad de aclareo aplicada genera un efecto significativo en la distribución de biomasa foliar en la copa de los árboles, al modificar la acumulación de biomasa maderable en el fuste, así como la eficiencia de crecimiento en volumen de madera en el fuste por unidad de área foliar proyectada.

## 1.7 LITERATURA CITADA

- Acosta-Mireles, M., F. Carrillo-Anzures y M. Díaz L. 2009. Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. Terra Latinoamericana 27: 105-114.
- Aguirre-Salado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H. M. de los Santos-Posadas, R. Haapanen y A. I. Aguirre-Salado. 2009. Mapeo de carbono aéreo en bosques manejados de pino patula en Hidalgo, México. Agrociencia 43: 209-220.
- Amatayakul, W. and C. Azar. 2003. Eucalyptus plantations for electricity generation: the cost of carbon dioxide abatement in Thailand. International Journal of Sustainable Development 6: 359-377.
- Aparicio R., A., H. Cruz J. y J. Alba L. 1999. Efecto de seis sustratos sobre la germinación de *Pinus patula* Schl. et Cham., *P. montezumae* Lamb. y *P. pseudostrobus* Lindl. en condiciones de vivero. Foresta Veracruzana 1: 31-34.
- Berril, J. P. and K. L. O'Hara. 2007. Patterns of leaf area and growing space efficiency in young even-aged and multi-aged coast redwood stands. Canadian Journal of Forest Research 37: 617-627.
- Binkley, D., J. L. Stape, M. G. Ryan, H. R. Barnad and J. Fownes. 2002. Age-related decline in forest ecosystem growth: an individual-tree, stand structure hypothesis. Ecosystems 5: 58-67.

- Burkes, E. C., R. E. Will, G. A. Barron-Gafford, R. O. Teskey and B. Shiver. 2003. Biomass partitioning and growth efficiency of intensive managed *Pinus taeda* and *P. elliottii* stands at different planting densities. *Forest Science* 49: 224-234.
- Campos C., A. 2004. Effects of subsistence farming system on soil surface CO<sub>2</sub>-C flux on Cofre de Perote volcano slopes, Veracruz (Mexico). *Forest Ecology and Management* 199: 273-282.
- Castelán-Lorenzo, M. y B. Arteaga-Martínez. 2009. Establecimiento de regeneración de *Pinus patula* Schl. et Cham., en cortas bajo el método de árboles padres. *Revista Chapingo, serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15: 49-57.
- Dean, T. J. 2004. Basal area increment and growth efficiency as functions of canopy dynamics and stem mechanics. *Forest Science* 50: 106-116.
- 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: 25-34.
- Dogra A. S. and S. C. Sharma. 2005. Performance of eucalyptus species and provenances in South-West Punjab. *Indian Forester* 131: 1521-1528.
- Domínguez A., F. A., A. M. Rodríguez y C. Mallén R. 1997. Evaluación de cuatro intensidades de poda en una plantación de *Pinus patula* Schl. et Cham. en la región de Huayacocotla, Veracruz. *Ciencia Forestal en México* 22: 15-32.
- Dvorak, W. S., G. R. Hodge, J. E. Kietzka, F. Malan, L. F. Osorio and T.K. Stanger. 2000. *Pinus patula*. In: Conservation and Testing of Tropical and Subtropical Forest Tree Species by the CAMCORE Cooperative, College of Natural Resources, NCSU. Raleigh, NC. U.S.A. pp: 148-173.
- Figuroa N., C. M. 2007. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en la Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx. 98 p.
- Gajardo-Caviedes, P. A., M. A. Espinoza, U. T. González and D. G. Ríos. 2005. The influence of thinning and tree size on the sapwood area/leaf area ratio in coigue. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 1679-1686.

- García-García, R., A. Gómez-Guerrero, J. López-Upton, J. Vargas-Hernández and W. R. Horwath. 2004. Tree growth and  $\delta^{13}\text{C}$  among populations of *Pinus greggii* Engelm. at two contrasting sites in central Mexico. *Forest Ecology and Management* 198: 237-247.
- Gilmore, D. W. and E. K. Zenner. 2005. Foliage-sapwood relationships for balsam fir in north-central Minnesota. *Northern Journal of Applied Forestry* 22: 203-210.
- Graciano, C., J. J. Guiamet and J. F. Goya. 2006. Fertilization and water stress interactions in young *Eucalyptus grandis* plants. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 1028-1035.
- Grigg, A. H., C. Macfarlane, C. Evangelista, D. Eamus and M. A. Adams. 2008. Does initial spacing influence crown and hydraulic architecture of *Eucalyptus marginata*? *Tree Physiology* 28: 753-760.
- Guillespie, A. J. R. 1992. *Pinus patula* Schiede and Deepe. SO-ITF-SM-54. New Orleans, LA., USA. 5 p.
- Hernández L., A., M. Martínez R., J. J. Vargas H., A. Velázquez M. y G. Ángeles P. 1996. Características de los anillos y densidad de la madera a diferentes alturas del fuste en rodales aclareados de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Ciencia Forestal en México* 21: 39-55.
- Hernández L., I., C. Flores L., E. H. Cornejo y S. Valencia M. 2003. Crecimiento de tres especies de pino en una plantación establecida en Santiago Comaltepec, Ixtlán, Oaxaca. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. pp: 404-410. Disponible en: <http://www.uaaan.mx/DirInv/Rdos2003/recforestales/comaltep.pdf> (Consultado 05 de abril 2010).
- Hoover, C. and S. Stout. 2007. The carbon consequences of thinning techniques: stand structure makes a difference. *Journal of Forestry* 105: 266-271.
- Innes, J. C., M. P. North and W. Williamson. 2006. Effect of thinning and prescribed fire restoration treatments on woody debris and snags dynamics in a sierran old-growth, mixed-conifer forest. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 3183-3194.
- Jaakkola, T., H. Mäkinen and P. Saranpää. 2005. Wood density in Norway spruce: changes with thinning intensity and tree age. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 1767-1779.
- Jack, S. B. and J. M. Long. 1992. Forest production and the organization of foliage within crowns and canopies. *Forest Ecology and Management* 49: 233-245.
- Jack, S. B., M. C. P. Sheffield and D. J. McConville. 2002. Comparison of growth efficiency of mature longleaf and slash pine trees. *In*: K.W. Outcalt. *Proceedings of the Eleventh*

- Biennial Southern Silvicultural Research Conference. Gen. Tech. Asheville, N.C., USA. 622 p.
- Kietzka, E., G. R. Hodge, A. Nel, G. A. Dos Santos and C. Gantz. 2007. Assessing the potential of *Pinus herrerae* as a plantation species for the subtropics. *Forest Ecology and Management* 242: 598-605.
- Lagergren, F. and A. Lindroth. 2004. Variation in sapflow and stem growth in relation to tree size, competition and thinning in a mixed forest of pine and spruce in Sweden. *Forest Ecology and Management* 188: 51-63.
- López-Upton, J., J. K. Donahue, F. O. Plascencia-Escalante and C. Ramírez-Herrera. 2005. Provenance variation in growth characters of four subtropical pine species planted in Mexico. *New Forests* 29: 1-13.
- Luna-Rodríguez, M., J. López-Upton y L. G. Iglesias-Andreu. 2005. Variabilidad morfológica y molecular (RAPD) en una plantación de *Pinus patula* en Veracruz, México. *Agrociencia* 39: 231-235.
- Malan, F. S. 1994. The wood properties and quality of *P. pringlei* Shaw and *P. greggii* Engelm. compared with that of *P. patula* and *P. elliottii* grown in South Africa. *Southern African Forestry Journal* 171: 43-52.
- McCrary, R. L. and E. J. Jokela. 1998. Canopy dynamics, light interception and radiation use efficiency of selected loblolly pine families. *Forest Science* 44: 64-72.
- McDowell, N. G., H. D. Adams, J. D. Barley, M. Hess and T. E. Kolb. 2006. Homeostatic maintenance of ponderosa pine gas exchange in response to stand density changes. *Ecology Applied* 16: 1164-1182.
- Meadows, J. S. and J. D. Hodges. 2002. Sapwood area as an estimator of leaf area and foliar weight in cherry-bark oak and green ash. *Forest Science* 43: 69-76.
- Medhurst, J. L. and C. L. Beadle. 2002. Sapwood hydraulic conductivity on leaf area: sapwood area relationships following thinning of a *Eucalyptus nitens* plantation. *Plant Cell and Environment* 25: 1011-1019.
- Meza J., D. J., J. J. Vargas H., J. López U., H. Vaquera-Huerta y A. Borja R. 2005. Determinación de la edad de transición de madera juvenil a madura en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Ra Ximhai* 1: 305-324.

- Muñoz F., H. J., V. M. Coria A., J. J. García S. y M. Blam C. 2009. Evaluación de una plantación de tres especies tropicales de rápido crecimiento en Nuevo Urecho, Michoacán. *Ciencia Forestal en México* 34: 61-87.
- O'Hara, K. L. 1996. Dynamics and stocking level relationships of multi-aged ponderosa pine stands. *Forest Science, Monog.* 33: 1-34.
- O'Hara, K. L. 1998. Stand structure and growing space efficiency following thinning in an even-aged Douglas-fir stand. *Canadian Journal of Forest Research* 18: 859-866.
- Oliver C. D. and B. C. Larson. 1996. *Forest stand dynamic*. Biol. Resour. Manage. Ser. Wiley, New York, USA. 520 p.
- Ordoñez B., J. M. y O. Maser. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7: 3-12.
- Quiñonez-Piñón, R. and C. Valeo. 2004. Sapwood area as a scaling factor for transpiration rates. *In: American Geophysical Union, Spring Meeting 2004, Montreal, Canada. Abstract No. H5ID-03.*
- Roberts, S., I. N. Long and F.W. Smith. 1993. Canopy stratification and leaf area efficiency: a conceptualization. *Forest Ecology and Management* 60: 143-156.
- Ruiz M, M., M. A. Fierros G. y H. Ramírez M. 1996. Efecto inicial del aclareo en plantaciones de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. y Golf. en La Sabana, Oaxaca. *Ciencia Forestal en México* 21: 25-38.
- Salazar G., J. G., J. J. Vargas H., J. Jasso M., J. D. Molina G., C. Ramírez H. y J. López U. 1999. Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. *Madera y Bosques* 5: 19-34.
- Samuelson, L. J. 1999. Control of growth efficiency in young plantations loblolly pine and sweetgum through irrigation and fertigation enhancement of leaf carbon gain. U.S. Department of Energy, Auburn, Alabama, USA. 22 p.
- Servicios Técnicos Forestales Ixtlán de Juárez. 2008. Informe de Actividades de los Servicios Técnicos Forestales de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. s/p.
- Seymour, R. S. and L. S. Kenefic. 2002. Influence of age on growth efficiency of *Tsuga canadensis* and *Picea rubens* trees in mixed species, multiage northern conifer stands. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 2032-2042.

- Shelbourne, C. J. A., C. B. Low and P. J. Smale. 2000. Eucalypts for Northland: 7-to 11-year results from trials of nine species at four sites. *New Zealand Journal of Forestry Science* 30: 366-383.
- Shelburne V. B. and R. L. Hedden. 1996. Effect of stem height-diameter class and site quality on sapwood permeability in loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Forest Ecology and Management* 83: 163-169.
- Simonin, K., T. E. Kolb, M. Montes-Helu and G. M. Kotch. 2006. Restoration thinning and influence of tree size and leaf area to sapwood area ratio on water relations of *Pinus ponderosa*. *Tree Physiology* 26: 493-503.
- Smith, F. W. and J. N. Long. 2001. Age-related decline in forest growth: an emergent property. *Forest Ecology and Management* 1-3: 175-181.
- Stone, J. E., T. E. Kolb and W. W. Covington. 1999. Effects of restoration thinning on presettlement *Pinus ponderosa* in Northern Arizona. *Restoration Ecology* 7: 172-182.
- Tan, X., S. X. Chang, P. G. Comean and Y. Wang. 2008. Thinning effects on microbial biomass, N mineralization and tree growth in a mid-rotation fire origin lodgepole pine stand in the lower foothills of Alberta, Canada. *Forest Science* 54: 465-474.
- Tolome R., J. y J. Alba-Landa. 2004. Desarrollo de fuentes parentales de *Pinus patula* Schl. et Cham. en un rango altitudinal. *Foresta Veracruzana* 6: 37-40.
- Vargas, R., E. B. Allen and M. C. Allen. 2009. Effects of vegetation thinning on above-and belowground carbon in a seasonally dry tropical forest in Mexico. *Biotropica* 41: 302-311.
- Wang, J. R., C. D. B. Hawkins and T. Letchford. 1998. Relative growth rate and biomass allocation of paper birch (*Betula papyrifera*) populations under different soils moisture and nutrient regimes. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 44-55.
- Wright, J. A. 1992. Laboratory scale of *Pinus pseudostrobus*, *P. maximinoi* and *P. patula*. *Piracicaba* 2: 39-44.
- Zeppel, M. and D. Eamus. 2008. Coordination of leaf area, sapwood area and canopy conductance leads to species convergence of tree water use in a remnant evergreen woodland. *Australian Journal of Botany* 56: 97-108.
- Zhang, J. W. Oliver and R. F. Powers. 2005. Long term effects of thinning and fertilization on growth of red fir in northeastern California. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 1285-1294.

Zhang, S. Y., G. Chauret, D. E. Swift and I. Duchesne. 2006. Effects of precommercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 945-953.

## CAPÍTULO II

### MODELOS DE BIOMASA AÉREA Y FOLIAR EN UNA PLANTACIÓN DE PINO DE RÁPIDO CRECIMIENTO EN OAXACA<sup>1</sup>

#### 2.1 RESUMEN

El vigor de un árbol se puede evaluar a partir del follaje, que si bien representa de 4 a 6 % de la biomasa total del árbol, es el componente principal para los procesos fisiológicos. El objetivo de este estudio fue estimar la biomasa de acículas en ramas individuales y árbol completo, y ajustar modelos de partición de biomasa aérea en árboles plantados de *Pinus patula* Schl. et Cham. La biomasa de acículas por rama se estimó con un modelo lineal, que empleó área basal de rama viva, altura de rama y la sección de copa en la cual la rama se encontraba como variables independientes. La biomasa de los componentes aéreos se estimó con coeficientes de determinación de 0.86, 0.92 y 0.88, para madera con corteza, ramas y acículas, respectivamente. Para madera con corteza, se utilizó el diámetro normal (DN) y altura de árbol (AT) en un modelo lineal; la biomasa de ramas y follaje con ecuaciones no lineales que se basaron en el diámetro de copa viva (DCV) y área de copa para ramas; y DCV y AT para la biomasa de follaje. La biomasa total aérea por árbol se estimó con un  $R^2 = 0.87$ , utilizando DN y AT. La biomasa a una edad de 14 años se distribuyó en 92.9, 4.7 y 2.4 % para madera, ramas y follaje, respectivamente.

**Palabras clave:** *Pinus patula*, diámetro basal de rama viva, diámetro de copa viva, sección de copa de posición de la rama.

#### 2.2 SUMMARY

Forest tree's health can be accurately assessed by evaluating foliage biomass, even when only represents 4 to 6 % of the total tree biomass, is the main driver of every major physiological processes. This research was mainly focused to accurately estimate needle biomass at branch and tree level on fast growing trees of *Pinus patula* Schl. et Cham. Needle biomass per branch was estimated with a linear model, which used live branch basal area, live branch height, and crown

---

<sup>1</sup> Artículo en revisión en la Revista Madera y Bosques

section of the branch like independent variables. Determination coefficients for above ground components were estimated 0.86, 0.92 and 0.88 for wood with bark, branches and needles, respectively. For the wood with bark model, diameter at breast height (DBH) and total tree height (HT) were used in a linear structure; total branch biomass was fitted with a non-linear models, using live crown diameter (LCD) and crown area (CA) while total needle biomass used LCD and HT on a non-linear model. The aboveground total biomass per tree was estimated with  $R^2 = 0.87$ , using DBH and HT. At 14 years old, biomass partition was estimated to be 92.9, 4.7 and 2.4 % for wood with bark, branches and needles, respectively.

**Key words:** *Pinus patula*, basal live branch diameter, live crown diameter, crown section of branch position.

## 2.3 INTRODUCCIÓN

Ante el cambio climático global, las plantaciones forestales de rápido crecimiento adquieren mayor importancia como reservorios de carbono. Por ello, el estimar confiablemente la biomasa (cantidad total de materia orgánica presente) es vital para una determinación adecuada del potencial de secuestro de carbono (Garzuglia y Saket, 2003; Návar *et al.*, 2002). Con frecuencia, tales estimaciones involucran una fuente importante de incertidumbre en los modelos de flujo de carbono (Houghton *et al.*, 2000), sobre todo cuando se utilizan relaciones alométricas que no corresponden con las especies o lugares donde se desarrollan. La distribución de biomasa aérea de los árboles en sus diferentes órganos, está influenciada por las condiciones ambientales y de manejo silvícola. Por ejemplo, en *Pinus patula* se han encontrado incrementos en el crecimiento diametral y en la biomasa global cuando el árbol crece asociado con especies fijadoras de N (Gutiérrez-Guzmán *et al.*, 2004).

A pesar que la biomasa foliar sólo representa de 4 a 6 % de la biomasa total del árbol, es uno de los componentes más importantes porque demanda más del 50% de N y P y es donde ocurren muchos procesos fisiológicos fundamentales para el crecimiento, como la intercepción de luz, la fotosíntesis neta, la transpiración, la respiración y la eliminación de CO<sub>2</sub> (Gower y Norman, 1991; Margolis *et al.*, 1995). Además es el componente donde se genera la productividad primaria neta a partir de la energía solar y el agua (Gholz y Cropper, 1991). Puesto que el follaje

presenta estacionalidad con los patrones climáticos y es muy sensible al manejo silvícola, la biomasa foliar debe ser estimada con precisión para explicar la productividad de un rodal. Ello indica que los modelos futuros de crecimiento y rendimiento del rodal deben incluir a este componente, porque involucrarían ecuaciones más específicas para un determinado sitio. En consecuencia, los modelos generados para estimar el follaje deberán ser también sensibles a los factores del ambiente y de manejo, así como superar la inherente dificultad para medir este componente con precisión, pues a medida que el tamaño de los árboles incrementa, su evaluación consume más tiempo y recursos.

*Pinus patula* Schl. et Cham. es una pinácea endémica de México. Proporciona un alto potencial productivo mediante manejo silvícola simple, y posee una amplia variedad fenotípica y genética en la calidad de la madera (Barnes *et al.*, 1994; Dvorak *et al.*, 2000). Sus productos se aprovechan en una amplia gama de usos, por ello fue una de las primeras especies de pinos mexicanos en ser plantadas y mejoradas genéticamente en Sudáfrica (Perry, 1991), y sus áreas de plantación se extendieron a otros países (Dvorak *et al.*, 2000; Valencia y Vargas, 2001).

Ixtlán de Juárez es una comunidad del estado de Oaxaca pionera en trabajos con plantaciones forestales de rápido crecimiento con *P. patula* y otras especies. En las plantaciones se ha utilizado germoplasma de árboles selectos de sus rodales naturales. El establecimiento de diversos ensayos inició en 1995 en una superficie de 5 ha donde se utilizaron áreas fraccionadas de terrenos que anteriormente estaban ocupados con cultivos agrícolas. Desde 2004 se establecieron parcelas con aclareos aplicados bianualmente en *P. patula*, en las que se ha reportado un incremento corriente anual, antes y después de las intervenciones de 14.9 y 36.3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente. Con esta tasa de crecimiento la comunidad de Ixtlán se encuentra motivada para extender la superficie plantada con árboles de rápido crecimiento (Servicios Técnicos Forestales Ixtlán de Juárez, 2008).

El objetivo del presente trabajo fue encontrar modelos matemáticos que permitan estimar con precisión suficiente la biomasa de acículas en ramas individuales y en el árbol completo, así como modelos que estimen la partición de biomasa aérea de manera que los modelos puedan ser aplicados a datos de inventario en la plantación.

## 2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.4.1 El área de estudio

La plantación de 5 ha de *P. patula* se estableció en 1995 en la comunidad de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Se localiza en terrenos planos y con pendientes de 20 a 40 %, a una altitud promedio de 2550 m, a 17° 22' 38.69" LN y 096° 28' 44.8" LO. Las plántulas se obtuvieron de semilla de árboles selectos de la misma comunidad y se establecieron en suelos preparados con maquinaria pesada. El estudio se efectuó en seis parcelas de 20 x 20 m, delimitadas en 2004. En cinco de las cuales se aplicaron aclareos eliminando del 40 al 69 % de la densidad inicial de plantación y en la otra no se hicieron (testigo). Los aclareos se aplicaron en intervalos de dos años.

Cuadro 2.1 Características de las parcelas de estudio y aclareos aplicados a *P. patula* en la plantación de Ixtlán, Oaxaca.

Característica	Parcelas (400 m <sup>2</sup> )					
	1	2	3	4	5	6
Tratamiento	Aclareo	Aclareo	Aclareo	Aclareo	Aclareo	Testigo
Pendiente (%)	5	0	40	35	30	5
Árboles ha <sup>-1</sup> (2004)	3600	3650	5675	5000	4525	4650
Árboles ha <sup>-1</sup> (2008)	1250	2200	1775	1800	1900	3625
Diámetro normal 2004 (cm)	10.4	9.7	8.6	9.2	10.0	8.5
Diámetro normal 2008 (cm)	20.7	16.2	17.6	17.4	16.8	12.6
Altura total 2004 (m)	7.6	7.8	7.1	7.4	7.9	7.1
Altura total 2008 (m)	15.7	12.9	14.8	14.9	14.9	12.2
Área basal 2004 (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	38.28	30.25	38.55	38.57	40.58	31.28
Área basal 2008 (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	43.25	47.87	44.25	43.85	43.19	50.17
Volumen extraído 2004 (%)	15.11	10.90	35.03	21.47	0	0
Volumen extraído 2006 (%)	3.74	0	0.93	0	0.72	0
Volumen extraído 2008 (%)	6.01	7.09	5.89	5.65	27.37	0
Volumen total removido (%)	24.86	17.99	41.85	27.12	28.09	0

En 2008 se hicieron mediciones de diámetro normal (DN en cm), diámetro al pie (DP en cm), diámetro de copa (diámetro de la proyección de la parte más amplia de la copa viva) en dos ejes (N-S, E-O en m) y altura total (AT en m), y se calculó área de copa (AC en m<sup>2</sup>), área basal (AB en m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>), volumen total (VT en m<sup>3</sup>) y volumen extraído en cada corta (Cuadro 2.1). El VT se determinó mediante el modelo que se utiliza para esta especie:  $VT = 0.076528 \times DN^{1.672251} \times AT^{1.333502}$  (TIASA, 1993), con DN y AT en m.

#### **2.4.2 Muestreo de madera con corteza**

Con los datos de DN y AT se obtuvieron las estructuras diamétricas de cada parcela y la caracterización del tipo de dominancia de la copa. Se seleccionaron, en forma aleatoria, 30 árboles para derribo (5 por parcela), todos ellos sanos y no bifurcados, distribuidos en las categorías diamétricas, constituidos por tres árboles suprimidos, siete intermedios, 15 codominantes y cinco dominantes. Cada árbol se identificó con su número de parcela, etiqueta de campo y número de derribo. El derribo se realizó en 2009 a una altura de 30 cm sobre el nivel del suelo. En cada árbol derribado se midió diámetro (cm) en el tocón (DT), DN y en la altura del inicio de copa viva (DCV); altura de tocón (HT), AT, longitud de fuste limpio (LFL) y longitud de copa viva (LCV), todas en metros. Después de la separación de ramas del fuste principal, se cortaron trozas de 1 m de longitud, del tocón a la punta; cada troza se pesó en verde (PV en kg) con una báscula electrónica Torrey®, serie EQB/EQM, con capacidad de 100 kg, y se midió el diámetro inferior y superior de las mismas. En la primera troza se obtuvieron dos rodajas (inferior y superior) de 5 cm de espesor; en el resto de las trozas sólo la superior. Todas las trozas fueron identificadas por números progresivos y embolsadas, por cada árbol.

En el punto de medición de DT, DN y DCV, así como en la parte media del fuste limpio, se obtuvieron rodajas de 5 cm de espesor. En cada rodaja se determinó el PV (g) en campo y el volumen verde por desplazamiento de agua (VV en cm<sup>3</sup>) en laboratorio; luego de ser secada en estufa a 102 °C hasta peso constante, su peso seco (PS en g) en balanza analítica Sartorius® con capacidad de 1620 g. Con estos datos se determinó el peso específico (PE = PS/VV, en g cm<sup>-3</sup>) de cada rodaja. A cada rodaja se le midió diámetro con corteza (D<sub>cc</sub> en cm) y grosor de corteza (GC en cm), y por diferencia se calculó el diámetro sin corteza (D<sub>sc</sub> en cm). Con esta información más la longitud de troza y la altura de la sección a la cual fue extraída la rodaja, se cubicaron las trozas y el árbol completo, mediante la metodología de trozas sobrepuestas (Bailey, 1995).

Debido a que la densidad de la madera disminuye del centro a la periferia y de la base hacia el ápice y aumenta con la edad de los árboles juveniles, la parte media del fuste es una representación confiable de su densidad promedio (Deene y Hale, 1999). Así, con el producto del PE promedio por árbol (en  $\text{kg m}^{-3}$ ) y el VV de cada troza se obtuvo el PS de cada sección y los acumulados para todo el árbol (kg). Se construyeron gráficas entre la altura de la sección y el volumen acumulado con corteza ( $V_{cc}$  en  $\text{m}^3$ ) y el PS acumulado de todos los árboles, con la intención de detectar anomalías en los datos obtenidos.

### 2.4.3 Muestreo de ramas y acículas

A los 30 árboles derribados se les separó las ramas del fuste. En cada rama se identificó o midió: número de verticilo foliar (de la base de copa a punta), número consecutivo de rama, longitud del pie del árbol al punto de inserción de la rama (AR, en m), longitud de rama (LR, en m) y diámetro basal de rama (DBR, en cm) a 1 cm de separación del fuste. El volumen de rama ( $V_r$  en  $\text{cm}^3$ ) se calculó con la fórmula del cono. En la parte media de la copa, del lado norte, se eligieron aleatoriamente tres ramas de crecimiento medio. De ellas se obtuvieron tres secciones de 5 cm de longitud, que se identificaron y metieron en bolsas de papel. En laboratorio se obtuvo el VV de cada sección con ayuda de una probeta de 250 mL, así como el PV y PS en balanza analítica (este último después del secado en estufa a  $102\text{ }^\circ\text{C}$ ). Con estos datos se pudo estimar el PE de cada muestra. Se obtuvo el PE promedio de rama por árbol (en  $\text{kg m}^{-3}$ ). Para la biomasa de ramas individuales y de árbol completo, se utilizó el mismo procedimiento empleado en el componente madera.

Para el muestreo de acículas se seleccionó aleatoriamente una submuestra de 20 árboles. En cada árbol se seleccionó al azar una rama por verticilo en la que las acículas se separaron, y luego se obtuvo el PV de las acículas y de la rama. Debidamente identificadas en bolsas de papel, las acículas se llevaron a laboratorio y se secaron a  $75\text{ }^\circ\text{C}$  por 3 días en una estufa. Finalmente, se determinó el PS del follaje en balanza analítica Sartorius®. Con la biomasa de acículas de 314 ramas, se corrieron modelos de regresión lineal y no lineal para apreciar su cinética en función de las variables obtenidas en las ramas. El modelo de mejor  $R^2$  se utilizó para estimar la biomasa de acículas de 1328 ramas más. La suma de la biomasa estimada de acículas y la biomasa de la muestra proporcionaron la biomasa por árbol de este componente.

#### 2.4.4 Análisis estadístico de la información y estrategias de ajuste

La base de datos (Anexo 2.9) con la biomasa de cada árbol y de cada uno de sus componentes (madera con corteza, ramas y acículas), y demás variables medidas, se integró. Los análisis se realizaron con el paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., 2004). En cada variable se comprobaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Los análisis de regresión lineal se realizaron con PROC GLM, los no lineales con PROC MODEL y los análisis de varianza con PROC ANOVA, todos ellos procedimientos de SAS. Se probaron modelos de regresión lineal y no lineal para estimar la biomasa de cada componente y la biomasa total por árbol, así como la partición de biomasa aérea.

## 2.5 RESULTADOS

### 2.5.1 Estimación de biomasa foliar por rama y por árbol

Todos los modelos se estimaron mediante una muestra de 314 ramas, correspondientes a 20 árboles. Las variables independientes que se utilizaron en las ecuaciones no lineales para estimar la biomasa de acículas por rama, fueron (las ecuaciones 1 y 2 se probaron sobre la base que el producto de las variables mejora substancialmente la predicción de biomasa):

$$BAR = \beta_0 \times ABR^{\beta_1} \times AR^{\beta_2} \times LR^{\beta_3} \dots \text{Ec. 1}$$

$$BAR = \beta_0 \times (ABR \times AR)^{\beta_1} \dots \text{Ec. 2}$$

$$BAR = DBR^{\beta_1} \times (1 - ARR)^{\beta_2} \times (1 + ARR)^{\beta_3} \times AR^{\beta_4} \times SEC \dots \text{Ec. 3 (función geométrica de Edwards y Penney, 1997).}$$

$$BAR = DBR^{\beta_1} \times AR^{\beta_2} \times (1 - ARR)^{\beta_3} \times SEC \dots \text{Ec. 4 (función beta modificada- De Los Santos-Posadas, 1998).}$$

Donde: BAR = biomasa de acículas por rama (g), DBR = diámetro basal de rama (cm), ABR = área basal de rama (=  $DBR^2$ , en  $cm^2$ ), AR = altura de rama (desde el suelo, en m), LR = longitud de rama (de la base a la punta de yema apical, en m), ARR = altura relativa de rama con respecto

a la longitud de copa [(AR-LFL)/LCV], SEC = altura de rama con respecto a la altura total del árbol (AR/AT), y  $\beta_{0,1,2,3,4}$  = parámetros de los modelos de regresión.

En el análisis previo de los datos se encontraron mejores alternativas mediante el producto de área x altura x largo de rama. Estos modelos evitan la predicción negativa de valores de biomasa para ramas pequeñas de la parte inferior de la copa. Los modelos lineales empleados para explicar el comportamiento de BAR estuvieron basados en el área de la sección de la base y altura de rama, más una variable dicotómica de posición en el fuste ( $X_i$ ) que permite definir la sección inferior, media o superior de la copa donde la rama estaba localizada. Tales modelos fueron tomados de De Los Santos-Posadas (1998):

$$BAR = \beta_0 + \beta_1 \times DBR^2 \dots \text{Ec. 5}$$

$$BAR = \beta_0 + \beta_1 \times DBR^2 + \beta_2 \times (DBR^2 \times X_1) + \beta_3 \times (DBR^2 \times X_2) \dots \text{Ec. 6}$$

$$BAR = \beta_0 + \beta_1 \times DBR^2 + \beta_2 \times DBR^2 \times AR + \beta_3 \times (DBR^2 \times X_1) + \beta_4 \times (DBR^2 \times X_2) \dots \text{Ec. 7}$$

Donde las variables son las mismas definidas anteriormente,  $X_1 = 1$  si la rama está en la sección inferior 1 ( $AR/AT \leq 0.6 = 1$ ), 0 de otra manera, y  $X_2 = 1$  si la rama está en la sección media 2 ( $AR/AT > 0.6 \text{ y } \leq 0.8 = 2$ ), 0 de otra manera

Cuadro 2.2 Cuadrados medios del error (CME), error estándar (EE) y bondad de ajuste ( $R^2$ ) para los modelos lineales y no lineales que estiman el peso seco de acículas por rama.

Ecuación	CME	EE	$R^2$
Modelo no lineal 1	887	1.68	0.82
Modelo no lineal 2	1126	1.89	0.77
Modelo no lineal 3	931	1.72	0.81
Modelo no lineal 4	928	1.71	0.81
Modelo lineal 5	1460	2.15	0.70
Modelo lineal 6	1300	2.03	0.74
Modelo lineal 7	973	1.76	0.80

El modelo no lineal de la Ecuación 1 presentó el mejor ajuste, con un coeficiente de determinación de 0.82 y menor error estándar, que incluye las tres variables medidas en ramas. En contraparte, el modelo lineal (Ec. 5) dio el mayor error en la estimación de biomasa (BAR), con un  $R^2 = 0.70$ , y únicamente está en función del área basal de rama (Cuadro 2.2).

Los valores de los parámetros de los modelos no lineales (Ecuac. 1 al 4) se muestran en el Cuadro 2.3. Todos los parámetros presentan significancia ( $P \leq 0.05$ ) en el valor de t, con excepción del parámetro  $\beta_3$  de la Ecuación 3.

Cuadro 2.3 Parámetros estimados, error estándar y valor de t para los modelos no lineales de estimación de biomasa foliar por rama (Anexo 2.1).

Variable	Parámetro	Estimación	Error estándar	t para H0: parámetro = 0	Prob >  t
<b>Modelo no lineal 1</b>					
Intercepto	$\beta_0$	0.10	0.04	2.37	0.0186
ABR	$\beta_1$	0.73	0.05	13.48	0.0001
AR	$\beta_2$	2.02	0.16	12.94	0.0001
LR	$\beta_3$	0.99	0.13	7.90	0.0001
<b>Modelo no lineal 2</b>					
Intercepto	$\beta_0$	1.23	0.19	6.57	0.0001
(ABR)(AR)	$\beta_1$	1.08	0.04	32.34	0.0001
<b>Modelo no lineal 3</b>					
DBR	$\beta_1$	1.94	0.07	27.89	0.0001
(1-ARR)	$\beta_2$	0.83	0.17	4.87	0.0001
(1+ARR)	$\beta_3$	-0.70	1.27	-0.55	0.5813
AR	$\beta_4$	1.99	0.21	9.30	0.0001
<b>Modelo no lineal 4</b>					
DBR	$\beta_1$	1.94	0.07	27.71	0.0001
AR	$\beta_2$	1.89	0.07	26.47	0.0001
(1-ARR)	$\beta_3$	0.92	0.10	8.80	0.0001

En todos los modelos lineales, el intercepto no es significativo, y tampoco lo fue el parámetro  $\beta_2$  de la Ecuación 6, lo que sugiere que la cantidad de acículas por rama viva de la parte inferior y la parte superior de la copa no son estadísticamente diferentes. Destaca que en la Ec. 7 los valores de t se incrementan y el error estándar para los parámetros de estimación se reduce (Cuadro 2.4), lo que genera la mejor estimación lineal.

Cuadro 2.4 Parámetros estimados, error estándar y valor de t para los modelos lineales de estimación de biomasa foliar por rama (Anexo 2.2).

Variable	Parámetro	Estimación	Error estándar	t para H0: parámetro = 0	Prob >  t
<b>Modelo lineal 5</b>					
Intercepto	$\beta_0$	4.36	2.98	1.46	0.1451
(DBR) <sup>2</sup>	$\beta_1$	16.58	0.61	27.03	0.0001
<b>Modelo lineal 6</b>					
Intercepto	$\beta_0$	3.81	3.25	1.17	0.2421
(DBR) <sup>2</sup>	$\beta_1$	14.80	2.32	6.37	0.0001
(DBR) <sup>2</sup> x <sub>1</sub>	$\beta_2$	-0.32	2.19	-0.15	0.8836
(DBR) <sup>2</sup> x <sub>2</sub>	$\beta_3$	5.15	2.16	2.38	0.0180
(DBR) <sup>2</sup> x <sub>3</sub>	$\beta_4$	0			
<b>Modelo lineal 7</b>					
Intercepto	$\beta_0$	2.70	2.81	0.96	0.3371
(DBR) <sup>2</sup>	$\beta_1$	-32.24	5.00	-6.44	0.0001
(DBR) <sup>2</sup> (AR)	$\beta_2$	3.36	0.33	10.26	0.0001
(DBR) <sup>2</sup> x <sub>1</sub>	$\beta_3$	17.72	2.59	6.85	0.0001
(DBR) <sup>2</sup> x <sub>2</sub>	$\beta_4$	15.53	2.13	7.29	0.0001

Al realizar las estimaciones con estos modelos a nivel árbol, se optó por aquellas basadas en la Ecuación 7 (Figura 2.1), porque producen estimaciones totales por árbol promedio entre el modelo más optimista (Ecuación 3) y el más conservador (Ecuación 6), y además incluye en su estructura variables de área basal de rama, altura y la sección de copa de la rama ( $X_i$ ).

Para verificar la elección de la Ecuación 7, con los siete modelos se estimó la biomasa de acículas ( $B_{\text{follaje}}$ ) de 1,328 ramas, sumada a la biomasa de la muestra ( $n = 314$  ramas). Con la suma de ambas se determinó la biomasa total de acículas por árbol (kg). A la biomasa de acículas promedio por árbol se le aplicó análisis de varianza y comparación de medias con la prueba de Tukey ( $P = 0.05$ ). No se encontraron diferencias ( $P = 0.99$ ) entre los modelos evaluados para estimar el promedio de biomasa de acículas por árbol, con un C.V. de 67.2 % y un error estándar de 2.1 (Figura 2.2).

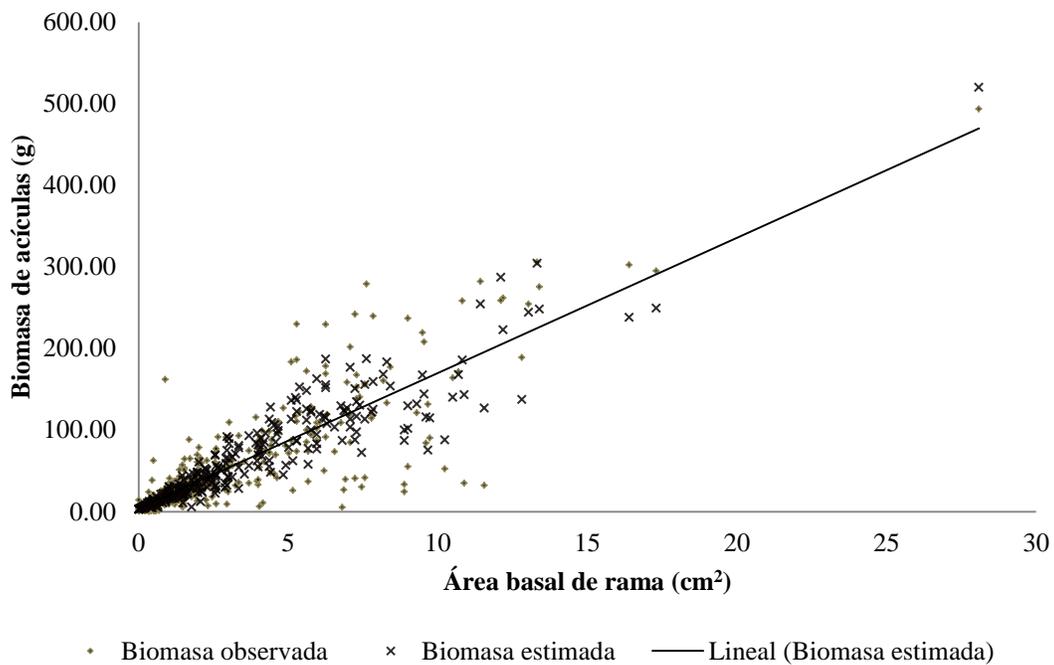


Figura 2.1 Relación entre los datos medidos y estimados de biomasa de acículas por rama mediante el modelo lineal 7 y el área basal de rama para *P. patula*.

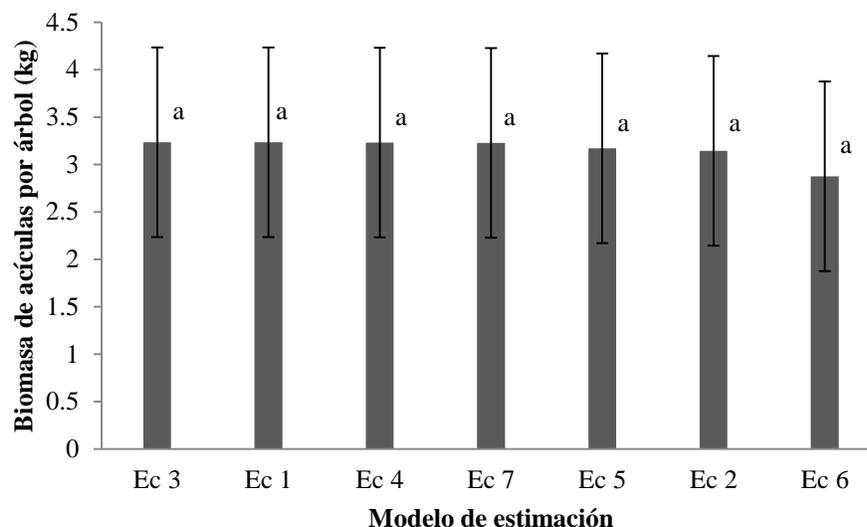


Figura 2.2 Comparación de medias (Tukey,  $P = 0.05$ ) estimadas de biomasa de acículas por árbol con los siete modelos utilizados. Los modelos corresponden a las ecuaciones descritas en el texto (Anexo 2.3).

### 2.5.2 Modelos por componente y de partición de biomasa aérea en el árbol

Para la madera con corteza en el fuste sólo se presentan los modelos de mejor estimación de biomasa que están en función del diámetro normal y altura del árbol (Valdez-Lazalde y T. B. Lynch, 2000) (Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5 Cuadrados medios del error (CME), error estándar (EE) y bondad de ajuste ( $R^2$ ) para los modelos que estiman la biomasa de madera con corteza por árbol (Anexo 2.4).

Ecuación	CME	EE	$R^2$
Ec. 8 $B_{mad} = \beta_0(DN \times AT)^{\beta_1}$	747	4.9	0.85*
Ec. 9 $B_{mad} = \beta_0 + \beta_1(DN^2 \times AT)$	861	5.3	0.83
Ec. 10 $B_{mad} = \beta_0 + \beta_1 DN^2 + \beta_2 AT + \beta_3(DN^2 \times AT)$	734	4.9	0.87
Ec. 11 $B_{mad} = \beta_0 + \beta_1 DN + \beta_2 DN^2 + \beta_3 AT + \beta_4 DN^2 AT$	763	5.0	0.87

\*  $R^2$  ajustada,  $B_{mad}$  = biomasa de madera con corteza (kg), DN = diámetro normal (cm), AT = altura total (m),  $\beta_{0,1,2,3,4}$  = parámetros de los modelos de regresión.

Debido al menor error estándar que genera, a la simpleza de su expresión y al coeficiente de determinación de 0.87, la Ecuación 10 es la más conveniente para estimar la madera con corteza en el fuste,  $B_{mad} = 144.08 - 0.82DN^2 - 8.09AT + 0.07(DN^2 \times AT)$ . El modelo mostró un C.V. = 21 % y una significancia estadística para  $\beta_1$  y  $\beta_3$  ( $P \leq 0.02$ ) (Cuadro 2.6).

Cuadro 2.6 Parámetros estimados, error estándar y valor de t para los modelos de estimación de biomasa de madera con corteza (Anexo 2.4).

Variable	Parámetro	Estimación	Error estándar	t para H0: parámetro = 0	Prob >  t
<b>Ecuación 8</b>					
Intercepto	$\beta_0$	0.004	0.003	1.08	0.2890
DN $\times$ AT	$\beta_1$	1.841	0.159	11.58	0.0001
<b>Ecuación 9</b>					
Intercepto	$\beta_0$	4.276	11.57	0.37	0.7147
DN <sup>2</sup> $\times$ AT	$\beta_1$	0.026	0.002	11.88	0.0001
<b>Ecuación 10</b>					
Intercepto	$\beta_0$	144.088	98.8	1.46	0.1580
DN <sup>2</sup>	$\beta_1$	-0.825	0.35	-2.31	0.0290
AT	$\beta_2$	-8.095	6.32	-1.28	0.2120
DN <sup>2</sup> $\times$ AT	$\beta_3$	0.074	0.02	3.40	0.0022
<b>Ecuación 11</b>					
Intercepto	$\beta_0$	145.036	101.02	1.44	0.1630
DN	$\beta_1$	-1.548	8.69	-0.18	0.8600
DN <sup>2</sup>	$\beta_2$	-0.742	0.59	-1.25	0.2200
AT	$\beta_3$	-7.385	7.57	-0.97	0.3300
DN <sup>2</sup> $\times$ AT	$\beta_4$	0.072	0.02	2.78	0.0100

En el componente biomasa en ramas se encontraron mejores ajustes al utilizar las variables referidas a la copa del árbol: diámetro (DCV), longitud (LCV) y área (AC). Los modelos de mejor ajuste se encontraron por el método SUR del procedimiento MODEL del SAS y fueron (Anexo 2.5):

$$B_{rama} = 0.0028 \times DCV^{2.66} \times LCV^{0.44} \dots \text{Ec. 12}$$

$$B_{rama} = 0.0056 \times DCV^{2.24} \times AC^{0.51} \dots \text{Ec. 13}$$

Donde:  $B_{rama}$  = biomasa de ramas (sin acículas) por árbol (kg), DCV = diámetro medido al inicio de la copa viva (cm), LCV = longitud de copa viva (m) y AC = área de copa (cuadrado del diámetro de copa en m).

En la Ecuación 12 se tiene un nivel de ajuste con  $R^2 = 0.90$  y error estándar de 0.27. Para la Ecuación 13 el nivel de ajuste mejora  $R^2 = 0.92$ , por lo que el error se reduce a 0.24. La inclusión de variables referidas a la copa mejora la estimación de biomasa en ramas, en comparación a utilizar variables clásicas de fácil medición, como diámetro y altura del árbol.

En biomasa de follaje ( $B_{follaje}$ ) la Ecuación 14 fue la de mejor ajuste (Anexo 2.6):  $B_{follaje} = 0.00019 \times DCV^{2.138} \times AT^{1.559}$  (Valdez-Lazalde y T. B. Lynch, 2000), con  $R^2 = 0.88$  y error estándar de 0.14.

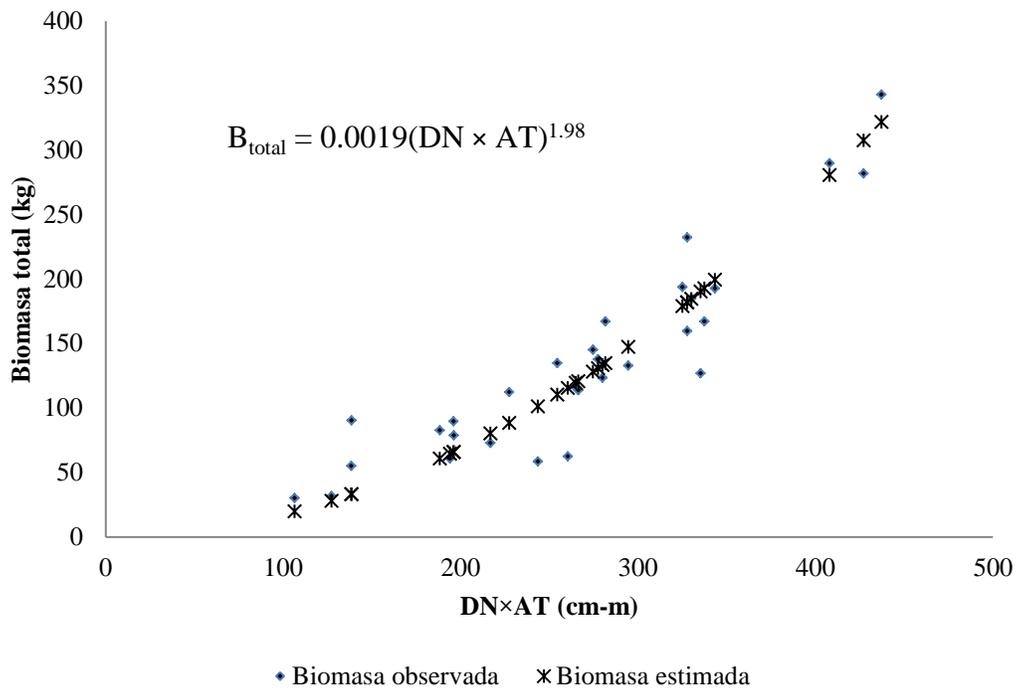


Figura 2.3 Estimación de biomasa total por árbol, mediante diámetro normal y altura de individuos de *P. patula*.

Finalmente, para la biomasa aérea total por árbol ( $B_{total}$ ) se utilizó la Ecuación 15  $B_{total} = \beta_0 (DN \times AT)^{\beta_1}$  y un sistema de partición de variables de la forma  $k_j \times B_{total}$ , donde  $k_j$  representan la fracción del componente con respecto a la biomasa total. Este sistema de ecuaciones fue ajustado mediante el método SUR del procedimiento MODEL. La biomasa total por árbol presentó un coeficiente de determinación de 0.87 y E.E. = 5.0, utilizando diámetro normal y altura total en forma no lineal (Figura 2.3, Anexo 2.7).

El valor de  $k_j$  obtenido para madera con corteza, ramas y follaje fue de 0.929, 0.047 y 0.024, respectivamente. Todos los parámetros del sistema de ecuaciones presentaron significancia estadística ( $P = 0.0001$ ), excepto el intercepto. La biomasa total del árbol se distribuye 92.9 % ( $R^2 = 0.99$ ) en madera con corteza en el fuste, 4.7 % ( $R^2 = 0.70$ ) en ramas sin acículas y 2.4 % ( $R^2 = 0.75$ ) en follaje.

A partir del modelo de estimación de biomasa total ( $B_{total}$ ) y del modelo de volumen total (VT) es posible obtener un factor de expansión de biomasa variable (FEB) de la forma:

$$FEB = \frac{B_{total}}{VT} = \frac{0.001917(DN \times AT)^{1.977233}}{0.076528 \left( \frac{DN}{100} \right)^{1.672251} AT^{1.333502}} = 55.374(DN^{0.305} AT^{0.644})$$

El producto del FEB por el volumen total de madera en el fuste (obtenido en un inventario forestal) proporciona la estimación de biomasa total aérea del individuo. Así, por ejemplo, para un árbol promedio con  $DN = 19$  cm y  $AT = 13$  m, el FEB estimado es de  $708.6 \text{ kg m}^{-3}$  (Anexo 2.8). El producto de FEB ( $708.6 \text{ kg m}^{-3}$ ) por VT ( $0.1456 \text{ m}^3$ ), proporciona una biomasa total aérea de  $103.17 \text{ kg}$  para este individuo. Tanto la ecuación de FEB como el cuadro del Anexo 2.8 son útiles para calcular la biomasa total del componente aéreo, con datos de volumen maderable del inventario forestal de la plantación en estudio.

## 2.6 DISCUSIÓN

### 2.6.1 Estimación de biomasa foliar por rama y por árbol

La variable independiente más importante para estimar la biomasa foliar en ramas individuales es el área basal de la rama viva (cuadrado del diámetro de base), que proporciona una bondad de ajuste de 70 % en el modelo lineal simple (Ec. 5) y una relación lineal significativa, al igual que el parámetro de estimación de la pendiente ( $P \leq 0.0001$ ) (Cuadros 2.2 y 2.4). Según KüBner y Mosandl (2000), la cantidad de biomasa y área foliar en la rama está en función a la proporción de tejido vivo conductivo (albura) del área basal de rama, lo cual podría estar sucediendo con la biomasa foliar soportada por las ramas de *P. patula*. Al adicionar al modelo la variable altura de la posición de la rama (AR), la Ecuación 2 mejora su bondad de ajuste en 6.8 %, con respecto a la Ec. 5; y al incluir longitud de rama (Ec. 1), el coeficiente de determinación se incrementa en 11.7 %, con respecto a la Ec. 5 (Cuadros 2.3 y 2.4). Esta es la mejor estimación no lineal para la biomasa del follaje en ramas individuales de *P. patula*. Este resultado coincide con el encontrado para *Pinus sylvestris* donde se obtuvo una bondad de ajuste de 83 % en una relación no lineal (Jonckheere *et al.*, 2005). Las Ecuaciones 3 y 4 tienen estimaciones de biomasa en ramas con semejante  $R^2$  (0.81), ya que incluyen, además del diámetro basal, la altura relativa de rama con respecto a la longitud de copa viva del árbol (ARR) y la altura de rama con respecto a la altura del árbol (SEC).

Los mayores valores de t en la estimación de los parámetros de regresión son indicativos del incremento en la precisión de los mismos, con la consiguiente reducción en su error estándar (Monroy y Návar, 2004). Estos requisitos deseables se cumplen en los coeficientes de regresión de la Ec. 7 (Cuadro 2.4), con excepción del intercepto, que resultó no significativo ( $P = 0.3371$ ) pero que es necesario para producir estimaciones de mínimos cuadrados corregidos. De esta manera, la Ecuación 7 es el modelo lineal de mejor estimación para BAR, ya que mejora el coeficiente de determinación en un 10.2 % con respecto a usar sólo ABR y proporciona resultados semejantes al encontrado en biomasa de follaje por rama en *Abies balsamea* (L.) (Gilmore y Zenner, 2005). Esto podría ser el resultado de incluir variables dicotómicas que denotan la posición de la rama ( $X_i$ ), que permiten definir la sección de copa a la cual la rama pertenece y que son convenientes de incluir, como fue demostrado para otras especies de

coníferas (Bartelink, 1996; Temesgen, 2003). Además, la biomasa y área foliar presentan variación entre las secciones inferior, media y superior de la copa (Kershaw y Maguirre, 1995).

### 2.6.2 Modelos por componente y de partición de biomasa aérea a nivel árbol

En la estimación del componente madera con corteza en el fuste, los modelos lineales (Ec. 10 y 11) presentaron mejores coeficientes de determinación ( $R^2$ ) que la ecuación lineal (Ec. 9 y no lineal (Ec. 8) (Cuadro 2.5). El modelo lineal (Ec. 10) con bondad de ajuste 0.87 ( $R^2$ ) y menor error estándar (4.9), utiliza variables independientes similares a la variable combinada para volumen total de la forma  $DN^2 \times AT$ . Esto permite inferir que la biomasa de este componente en *P. patula* guarda una relación lineal estrecha con el diámetro, y que la inclusión de la variable AT en el modelo permite mejorar el coeficiente de determinación. Esto fue demostrado por Acosta-Mireles *et al.* (2002) y Brown (2001) en otras coníferas y coincide con los resultados encontrados por Návar *et al.* (2004) en plantaciones jóvenes de pinos en Durango, México.

La estimación de biomasa en ramas sin acículas tuvo un coeficiente de determinación de 0.92 (Ec. 13), al utilizar el diámetro al inicio de copa viva (DCV) y el área de copa proyectada (AC) en una ecuación no lineal. En *P. patula* la variable más importante fue DCV, ya que por tratarse de árboles jóvenes, el área de la sección en ese punto es casi totalmente conductiva y puede reflejar la biomasa de ramas que es capaz de soportar, como fue demostrado por Pinazo *et al.* (2007) para *P. taeda*. El AC es una variable que ayuda a explicar la biomasa de ramas en la copa, y además guarda una estrecha relación con el diámetro normal de *P. patula*. Esto coincide con lo encontrado para *P. sylvestris* ( $R^2 = 0.9$ ) por Jonckheere *et al.* (2005). Debido a que la biomasa de un individuo se identifica con su índice de productividad, el AC puede ser un indicador del vigor del árbol. Acosta *et al.* (2003) encontraron en diversas especies forestales que el vigor puede ser explicado por el área de la silueta de la copa (AC), misma que guarda una relación directa con la biomasa foliar y ramas. Por ello, mediante la evaluación de la biomasa en árboles jóvenes de *P. patula* podrían conocerse indirectamente los individuos que se van incorporando a nuevas categorías diamétricas con el fin de asegurar el éxito de las plantaciones.

La biomasa foliar presentó una relación no lineal con el diámetro de copa viva y la altura del árbol, con una bondad de ajuste de 0.88. Esto se contrapone con otros estudios (Jonckheere *et al.*, 2005; Mencuccini y Grace, 1995), donde con un modelo polinómico basado en DN se encontraron ajustes con  $R^2 = 0.95$  para este componente en *P. sylvestris*. Sin embargo, la

inclusión del DCV en el modelo se justifica por la relación existente entre la biomasa aérea y el tejido conductivo que la sustenta, lo cual podría utilizarse para caracterizar la arquitectura de copas y la acumulación de biomasa en el árbol. Según diversos estudios (Fassola *et al.*, 2008; Laclau, 2003; Pinazo *et al.*, 2007), la tasa de transpiración del follaje es proporcional al área foliar y la tasa de provisión de agua hacia la copa es proporcional al área de tejido conductivo, que en el DCV es de 90 % en *P. taeda*.

Para otras especies, sobre todo de plantaciones jóvenes como la del presente estudio, puede asumirse que la sección del DCV es casi totalmente conductiva, y puede ser utilizada como una expresión indirecta de la biomasa foliar o directa del área de albura resultante de distintos tratamientos silvícolas, como fue desarrollado en *P. taeda* por Fassola *et al.* (2005). Ellos encontraron que la sección del diámetro de copa viva presentó mejores ajustes que la sección del DN, ya que a esta altura muchos tejidos han dejado de ser conductivos. El modelo propuesto para estimar biomasa foliar tiene la inherente dificultad de la medición del DCV; pero de acuerdo con Fassola *et al.* (2008), incluye criterios con más fundamentos biológicos (y no solo matemáticos), para que dichos modelos permitan predecir la acumulación de tejidos en árboles, la arquitectura de la copa y consecuentemente la estructura de las ramas. Los componentes de biomasa aérea varían con la edad de rodal; cuando éste es joven, la biomasa se concentra de mayor a menor proporción en madera, ramas y follaje.

La biomasa aérea total ( $B_{total}$ ) y su partición se ajustó mediante un sistema de ecuaciones que utilizan el DN y altura de árboles mediante una estructura no lineal, con  $R^2$  de 0.87 para  $B_{total}$ . Este resultado es similar al encontrado en otros estudios (Schroeder *et al.*, 1997; Ter-Mikaelian y Korzukhin, 1997), donde las mejores relaciones de la biomasa aérea total se desarrollaron con modelos de regresión no lineal para otras especies. A medida que un rodal envejece, la proporción del componente rama y follaje incrementa, con la consecuente reducción en el componente madera, tal y como fue observado en bosques naturales de *P. patula* de 15 a 25 años, donde se encontró una biomasa aérea total de  $165.9 \text{ Mg ha}^{-1}$ , distribuyéndose 72, 16, 9 y 3 % para madera, corteza, ramas y follaje, respectivamente; además, el área foliar específica (área foliar/peso seco foliar) disminuye en árboles de mayor diámetro y follaje de mayor edad e incrementa en la parte inferior de la copa (Cano *et al.*, 1996; Castellanos *et al.*, 1996). En la plantación de *P. patula* de 14 años de edad, la biomasa en madera con corteza, ramas y follaje fue de 92.9, 4.7 y 2.4 %, respectivamente.

## 2.7 CONCLUSIONES

A diferencia de otros estudios (Jonckheere *et al.*, 2005), donde la estimación de biomasa de acículas por rama y para árbol completo se realizó utilizando diámetro normal como variable independiente, en este estudio el mejor modelo de tipo lineal (Ec. 7) utiliza variables relacionadas con ramas individuales, como área de la sección, altura de rama y sección específica de la copa a la cual pertenece la rama. Estas variables son más susceptibles a las variaciones del medio ambiente, sitio y manejo del rodal, como fue demostrado para rodales de bosques deciduos y *Pinus sylvestris* (Le Dantec *et al.*, 2000; Mencuccini y Grace, 1995). De esta manera, las ecuaciones generadas en este trabajo serán específicas para estimar la biomasa foliar del sitio de plantación o de otros con condiciones similares con los niveles de densidad encontrados, y si se aplican a condiciones diferentes a las encontradas, podrían dar estimaciones inciertas de biomasa foliar, según fue demostrado por Duursma *et al.* (2003) en bosques mixtos de coníferas.

Aunque la heterocedasticidad (heterogeneidad de varianzas asociadas al tamaño de las ramas) es una característica implícita de las variables dasométricas, que otros métodos de biomasa foliar poseen (Acosta *et al.*, 2003), los modelos aquí propuestos para *P. patula* reducen estos problemas, y porque se clasificó la copa en secciones, se produce una estimación media de follaje de 3.23 kg árbol<sup>-1</sup> e incluyen una variable de posición ( $X_i$ ) que determina la sección específica de la copa donde la rama pertenece. Esto, según Temesgen (2003) puede permitir detectar diferencias en la distribución del follaje en la copa, así como obtener funciones de distribución de biomasa foliar y se adquiere ventaja en las comparaciones de las predicciones totales.

La biomasa total del componente aéreo para *Pinus patula* se estimó con el diámetro normal y la altura del árbol, mediante un modelo no lineal con bondad de ajuste ( $R^2$ ) de 0.87. Al dividir la biomasa total entre el volumen total de madera en el fuste, se obtuvo un factor de expansión de biomasa, útil para calcular la biomasa total del componente aéreo con datos de DN y AT del inventario forestal de la plantación en estudio.

A una edad de 14 años, la biomasa se distribuye en 92.9, 4.7 y 2.4 % para madera, ramas y follaje, respectivamente. Según Araújo *et al.* (1999), cuando las condiciones de ambiente y de manejo silvícola son heterogéneas, se generan diferentes estimaciones de biomasa para una misma clase de datos de un inventario. Esto difícilmente ocurriría en la plantación de *P. patula* en Ixtlán, donde las condiciones ambientales de estructura y composición son homogéneas. En el

caso que las ecuaciones aquí descritas se aplicaran en otros sitios con variaciones en los gradientes éstas podrían confundirse con las variaciones resultantes del uso de diferentes ecuaciones de regresión (Malhi *et al.*, 2002), ya que las fuentes de error potenciales en la estimación de biomasa son debidas al método utilizado en la estimación de parámetros, así como en la selección aleatoria de las unidades de muestreo, diseño de muestreo y la variación inherente de las unidades de muestreo (Parresol, 1999; Parresol, 2001; Woods *et al.*, 1991).

## 2.8 LITERATURA CITADA

- Acosta M., M., F. Carrillo A. y O. S. Magaña T. 2003. Técnica de la silueta para estimar área foliar y biomasa aérea en especies forestales. *Ciencia Forestal en México* 28: 45-56.
- Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez y J. D. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36: 725-736.
- Araújo, T. M., N. Higuchi and J. A. Carvalho. 1999. Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest in the state of Pará, Brazil. *Forest Ecology and Management* 117: 43-52.
- Bailey, R. L. 1995. Upper-stem volumes from stem-analysis data: an overlapping bolt method. *Canadian Journal of Forest Research* 25: 170-173.
- Barnes, R. D., J. S. Birks, G. Battle and L. J. Mullin. 1994. The genetic control of ring width, wood density and tracheid length in the juvenile core of *Pinus patula*. *Southern African Forestry Journal* 169: 15-20.
- Bartelink, H. H. 1996. Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir. *Forest Ecology and Management* 86: 193-203.
- Brown, S. 2001. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution* 116: 363-372.
- Cano M., E. E., A. Velázquez M., J. J. Vargas H., C. Rodríguez F. y A. M. Fierros G. 1996. Área foliar específica en *Pinus patula*: efecto del tamaño del árbol, edad del follaje y posición en la copa. *Agrociencia* 30: 117-122.

- Castellanos, J. F., A. Velázquez M., J. Vargas H., C. Rodríguez F. y A. M. Fierros G. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*: efecto del tamaño del árbol, edad del follaje y posición en la copa. *Agrociencia* 30: 123-128.
- De Los Santos-Posadas, H. M. 1998. Estimation of individual branch and whole tree leaf biomass from loblolly pine. Master of Science, University of Georgia. Athens, Georgia. 86 p.
- Deene, M. and M. Hale. 1999. Cell wall and lumen percentages in relation to Wood density of *Nothofagus nervosa*. *IAWA Journal* 20: 23-36.
- Duursma, R. A., J. D. Marshall and A. P. Robinson. 2003. Leaf area index inferred from solar beam transmission in mixed conifer forests on complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* 118: 221-236.
- Dvorak, W. S., G. R. Hodge, J. E. Kietzka, F. Malan, L. F. Osorio and T.K. Stanger. 2000. *Pinus patula*. In: Conservation and Testing of Tropical and Subtropical Forest Tree Species by the CAMCORE Cooperative, College of Natural Resources, NCSU. Raleigh, NC. USA. pp: 148-173.
- Edwards, Jr. C. H. and D. Penney. 1997. Calculus with analytic geometry. 4<sup>th</sup> Edition. Prentice Hall. 960 p.
- Fassola, H. E., S. M. Lacorte, A. N. I. Pachas y R. Pezzuti. 2005. Factores que influncian la producción de biomasa forrajera de *Axonopus jesuiticus* Valls, bajo dosel de *Pinus taeda* L. en el nordeste de Corrientes. *RIA* 34: 21-38.
- Fassola, H., E. Crechi, S. Barth, A. Keller, M. Pinazo, R. Martiarena, A. Von Wallis e I. Figueredo. 2008. Relación entre la biomasa aérea y la sección transversal en la base de copa viva de *Pinus taeda* L. en el norte de la provincia de Misiones, Argentina. In: XIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM-EEA Montecarlo, INTA. 5-7 junio de 2008, El Dorado, Misiones, Argentina. s/p.
- Garzuglia, M. and M. Saket. 2003. Wood volume and woody biomass. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Roma, Italy. 30 p.
- Gholz, H. L. and W. P. Cropper. 1991. Carbohydrate dynamics in mature *Pinus elliottii* var. *elliottii* trees. *Canadian Journal of Forest Research* 21: 1742-1747.
- Gilmore, D. W. and E. K. Zenner. 2005. Foliage-sapwood area relationships for balsam fir in North-Central Minnesota. *Northern Journal of Applied Forestry* 22: 203-210.

- Gower, S. T. and J. M. Norman. 1991. Rapid estimation of leaf-area index in conifer and broad-leaf plantations. *Ecology* 72: 1896-1900.
- Gutiérrez-Guzmán, B., J. D. Etchevers-Barra, A. Velázquez-Martínez y J. Almaraz-Suárez. 2004. Influencia del aile (*Alnus firmifolia*) en el crecimiento de plantas de *Pinus patula*. *Terra Latinoamericana* 23: 89-96.
- Houghton, R. A., D. L. Skole and C. A. Nobre. 2000. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature* 403: 301-304.
- Jonckheere, I., B. Muys and P. Copping. 2005. Allometry and evaluation of in situ optical LAI determination in Scots pine: a case study in Belgium. *Tree Physiology* 25: 723-732.
- Kershaw, Jr. J. A. and D. A. Maguirre. 1995. Crown structure in western hemlock, Douglas-fir, and grand fir in western Washington: trends in branch-level mass and leaf area. *Canadian Journal of Forest Research* 25: 1897-1912.
- KüBner, R. and R. Mosandl. 2000. Comparison of direct and indirect estimation of leaf area index in mature Norway spruce stands of eastern Germany. *Canadian Journal of Forest Research* 30: 440-447.
- Laclau, P. 2003. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia. *Forest Ecology and Management* 180: 317-333.
- Le Dantec, V., E. Dufréne and B. Saugier. 2000. Interannual and spatial variation in maximum leaf area index of temperate deciduous stands. *Forest Ecology and Management* 134: 71-81.
- Malhi, Y., O. L. Phillips and J. Lloyd. 2002. An international network to understand the biomass and dynamics of Amazonian forests (RAIN FOR). *Journal of Vegetation Science* 13: 439-450.
- Margolis, H., R. Oren, D. Whitehead and M. R. Kaufmann. 1995. Leaf area dynamics of conifer forests. *In: Smith W. K. and T. M. Hinckley [Eds.]. Ecophysiology of coniferous forests.* Academic Press. pp: 181-223.
- Mencuccini, M. and J. Grace. 1995. Climate influences the leaf area/sapwood area ratio in Scots pine. *Tree Physiology* 15: 1-10.
- Monroy, R. C. y J. J. Návar. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques* 10: 29-43.

- Návar C., J. J., J. Nájera and E. Jurado. 2002. Biomass estimation equations in the Tamaulipas thornscrub of northeastern Mexico. *Journal of Arid Environments* 52: 167-179.
- Návar C., J. J., N. González B., J. J. Graciano L., V. Dale and B. Parresol. 2004. Additive biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, Mexico. *Madera y Bosques* 10: 17-28.
- Parresol, B. R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science* 45: 573-593.
- Parresol, B. R. 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 865-878.
- Perry, P. J. 1991. *The pines of Mexico and Central America*. Timber Press Inc. Portland, Oregon. U.S.A. 231 p.
- Pinazo, M. A., R. A. Martiarena, A. Von-Wallis, E. Crechi, N. M. Pahr y O. Knebel. 2007. Efectos de la intensidad de raleo sobre la compartimentalización y stock de carbono en plantaciones de *Pinus taeda* L. establecido sobre ultisoles de Misiones. *RIA* 36: 5-20.
- SAS Institute Inc. 2004. *SAS/STAT 9.1 User's guide*. SAS Institute, Cary, NC. USA. 4979 p.
- Schroeder, P., S. Brown, J. Mo, R. Birdsey and C. Cieszewsky. 1997. Biomass estimation for temperate broadleaf forest of the United States using inventory data. *Forest Science* 43: 424-434.
- Servicios Técnicos Forestales Ixtlán de Juárez. 2008. Informe de actividades de los Servicios Técnicos forestales de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. s/p.
- Temesgen, H. 2003. Evaluation of sampling alternatives to quantify tree leaf area. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 82-95.
- Ter-Mikaelian, M. T. and M. D. Korzukhin. 1997. Biomass equations for sixty five North American tree species. *Forest Ecology and Management* 97: 1-24.
- TIASA (Técnica Informática Aplicada S. A.). 1993. Programa de manejo integral forestal de Ixtlán de Juárez 1993-2002. Oaxaca, México. 290 p.
- Valdez-Lazalde, J. R. y T. B. Lynch. 2000. Ecuaciones para estimar volumen comercial y total en rodales aclareados de pino patula en Puebla, México. *Agrociencia* 34: 747-758.
- Valencia, M. S. y J. J. Vargas H. 2001. Correlaciones genéticas y selección simultánea del crecimiento y densidad de la madera de *Pinus patula*. *Agrociencia* 35: 109-119.

Woods, K. D., A. H. Feiveson and D. B. Botkin. 1991. Statistical analysis for biomass density and leaf-area index estimation. *Canadian Journal of Forest Research* 21: 974-989.

# CAPÍTULO III

## MODELOS PARA ESTIMAR EFICIENCIA DE CRECIMIENTO EN PLANTACIONES ACLAREADAS DE *Pinus patula*<sup>2</sup>

### 3.1 RESUMEN

La estrecha relación lineal entre el área foliar proyectada ( $AF$ ) de un árbol y el área de albura o tejido vivo del fuste ( $AF:A_{alb}$ ), puede utilizarse para evaluar la eficiencia de crecimiento ( $EC$ ) de un bosque. El objetivo fue estimar y analizar la relación  $AF:A_{alb}$  y la eficiencia de crecimiento en árboles de *Pinus patula* Schl. et Cham. plantados y sujetos a aclareos en Ixtlán, Oaxaca, México. En el verano de 2009 se derribaron 30 árboles en seis parcelas correspondientes a seis niveles de aclareo, en los que se estimó  $AF$  y área de albura, así como diversos indicadores de  $EC$ . Se encontró que el  $A_{alb}$  de la sección transversal del tocón (0.30 m) es la mejor sección del árbol para estimar tanto  $AF$  como  $EC$ . El aclareo incrementó la proporción de tejido conductivo en albura, se estimó que cada  $\text{cm}^2$  de esta abastece 0.082, 0.090 y  $0.149 \text{ m}^2$  de  $AF$  en las secciones de tocón (0.30 m), a 1.30 m de altura e inicio de copa viva, respectivamente. La  $EC$  se incrementó con el aclareo inicial (hecho en 2004), ya que los árboles aclareados produjeron  $12.7 \text{ dm}^3$  de madera por  $\text{m}^2$  de  $AF$ , vs. 11.0 de los árboles no aclareados. En cambio, la  $EC$  (medida por la cantidad de madera por metro cuadrado de  $AF$ ) disminuyó al aumentar  $AF$ , biomasa y volumen de madera en los árboles. El máximo incremento medio anual en volumen ( $IMA_V$ ) fue  $1.32 \text{ dm}^3 \text{ año}^{-1} \text{ m}^{-2}$  de  $AF$ , y puede predecirse como función de  $AF$  mediante el modelo:  $IMA_V = 1.953 \times AF^{0.695}$  en el que la  $EC$  disminuye conforme aumenta el  $AF$ .

**Palabras clave:** *Pinus patula*, aclareo de árboles, albura, eficiencia de crecimiento.

### 3.2 SUMMARY

The linear relationship between projected leaf area ( $LA$ ) of a tree and the sapwood area ( $SW$ ) or living tissue in the stem (i.e.,  $LA:SW$ ) can be used to evaluate forest growth efficiency ( $GE$ ). The aim of this research was to correlate the ratio  $LA:SW$  and  $GE$  of a *Pinus patula* Schl. et Cham.

---

<sup>2</sup> Artículo en revisión en la Revista Fitotecnia Mexicana

plantation, under thinning at Ixtlán, Oaxaca, México. In Summer 2009, 30 trees were cut down in six plots with six thinning levels, in order to estimate *LA* and *SW* area, as well as for measuring different *GE* indicators. Results showed that *SW* of the transversal section of the stump (0.30 m) is the best tree section for estimating both projected *LA* and *GE*. Thinning promoted the proportion of conductive tissue in sapwood, showing that each square centimeter of sapwood is supplying sap to 0.082, 0.090 and 0.149 m<sup>2</sup> of the projected *LA* in the stump, the stem diameter at 1.30 m and the living crown diameter sections, respectively. It was also found that *GE* increased due to the initial thinning intensity (made in 2004), since plots yielded 12.7 and 11 dm<sup>3</sup> of wood per m<sup>2</sup> of *LA*, in thinned and unthinned plots, respectively. However, the *GE* (measured by quantity of wood per square meter of *LA*) decreased as *LA*, biomass and wood volume increased in the trees. The maximum mean annual increment in volume (*MMI<sub>V</sub>*) was 1.32 dm<sup>3</sup> year<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup> of *LA*, and can be predicted as a function of *LA* in logarithmic model:  $IMA_V = 1.953 \times AF^{0.695}$ , in which *GE* decreases as the *LA* increases.

**Index words:** *Pinus patula*, tree thinning, sapwood, growth efficiency.

### 3.3 INTRODUCCIÓN

El manejo de la mayoría de masas naturales de *Pinus patula* en México se hace sin el uso de modelos de crecimiento o sin conocer el rendimiento esperado, datos que son necesarios para facilitar el proceso de toma de decisiones. La misma deficiencia sucede en plantaciones forestales que con el incremento de la superficie plantada, se requiere no sólo de dichas estimaciones sino también del uso de variables más sensibles a las variaciones entre sitios y entre condiciones de manejo silvícola porque ayudan a entender el crecimiento y el rendimiento del árbol.

El aclareo es la herramienta silvícola utilizada para el control de la densidad del rodal (parte del bosque con características homogéneas en especie, edad o altura) al nivel deseado (Alien *et al.*, 2002). El aclareo aplicado en forma selectiva favorece a los árboles grandes (que a veces son el objetivo de los mismos), y es útil en rodales viejos y jóvenes (Skov *et al.*, 2004). La intensidad del aclareo puede variar entre regiones o incluso entre sitios de una región (Brown *et al.*, 2004). Después del aclareo los árboles remanentes (residuales) reaccionan incrementando su tasa de crecimiento y reduciendo la longitud de traqueidas (Jaakkola *et al.*, 2005), también se hacen

menos susceptibles al insecto descortezador (*Dendroctonus adjunctus*) y más resistentes a los incendios (McDowell *et al.*, 2003), disminuyen el nivel de infestación foliar causada por hongos (Kanaskie y Maguirre, 2004), cambian la distribución de biomasa entre follaje y tallo (Guillespie *et al.*, 1994), y pueden modificar el cociente área foliar:área de albura en el tallo ( $AF:A_{alb}$ ) (Gajardo-Caviedes *et al.*, 2005).

La eficiencia de crecimiento ( $EC$  o eficiencia de ocupación del espacio de crecimiento) se define como la cantidad de madera en el fuste (volumen o biomasa) por unidad de área basal, área de albura ( $A_{alb}$ ), área foliar ( $AF$ ) o área de copa proyectada. Para determinar los indicadores de  $EC$  se requieren variables de  $AF$ , área foliar específica, índice de área foliar ( $IAF$ ), entre otras, que relacionadas con la producción de madera en el fuste, ayudan a entender los efectos de aclareos y otros tratamientos silvícolas, sobre el crecimiento y rendimiento maderable. En ocasiones la  $EC$  aumenta con el incremento en la densidad del rodal (Reid *et al.*, 2004), pero en la mayoría de casos la  $EC$  aumenta al disminuir la densidad (Curtis y Marshall, 2002). Estas diferencias en  $EC$  se han adjudicado al método empleado en la estimación de  $AF$  y a que la relación  $AF:A_{alb}$  no es constante a través de diferentes densidades del rodal (McDowell *et al.*, 2006).

El  $AF$  es un factor importante en la productividad del bosque, ya que a nivel de ecosistema regula la intercepción de luz, la absorción de carbono y la transpiración (Landsberg y Gower, 1997). Sin embargo, el  $AF$  es difícil de medir en forma directa, por ello que se utilizan ecuaciones alométricas para estimarla a nivel rama y a nivel árbol, así como otros atributos como biomasa total, biomasa de acículas y  $AF$  proyectada (Hoffmann y Usoltsev, 2002; Gilmore y Zenner, 2005). Debido a que la albura es la parte activa del xilema para el transporte de agua y nutrientes hacia las hojas, el área de dicha sección es un predictor efectivo de la tasa de transpiración y de  $AF$ , mediante el modelo teórico tubular (Quiñonez-Piñon y Valeo, 2004).

*Pinus patula* Schl. et Cham. es una especie de pino endémica de México con alto potencial productivo para plantaciones de rápido crecimiento (Dvorak *et al.*, 2000). En Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, el bosque de *P. patula* es el de mayor extensión (5000 ha) y de mayor importancia económica (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2008), y desde 1995 se inició la plantación de esta especie con fines comerciales. El objetivo del presente estudio fue estimar y analizar la relación área foliar:área de albura y la eficiencia de crecimiento de árboles de *P. patula* plantados en parcelas con diversos niveles de aclareo en Ixtlán de Juárez.

### 3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.4.1 Área de estudio

La plantación de *P. patula* Schl. et Cham. está ubicada a 12 km al noreste de Ixtlán, Oaxaca, a 17° 22' 38.69" LN y 96° 28' 44.8" LO, a 2550 m de altitud. Se plantó en 1995 en 5 ha de terrenos planos y con pendientes hasta de 40 %, después de preparar el suelo con maquinaria pesada. La plántula utilizada se obtuvo de semilla colectada de 50 árboles seleccionados del bosque natural de la misma comunidad.

En 2004 se delimitaron seis parcelas cuadradas de 400 m<sup>2</sup>, separadas entre sí por una franja de protección de 10 a 15 m de ancho. En cinco parcelas se aplicaron aclareos en intervalos de dos años: 2004, 2006 y 2008, y una parcela se dejó intacta como testigo. Antes y después del aclareo se midió: diámetro del tallo a 1.30 m (DN, cm), altura total del tallo (AT, m), área basal del tallo (AB, m<sup>2</sup>) y volumen por árbol y de aclareo (m<sup>3</sup>); todos los valores se convirtieron a datos por tratamiento y por hectárea. Se calculó el incremento medio anual en volumen por árbol y hectárea con la fórmula:  $IMA_V = \text{volumen}/\text{edad de plantación}$  (Will et al., 2002) para el periodo 1995-2009.

#### 3.4.2 Muestreo de acículas y madera

Con datos obtenidos en 2009 se generó la estructura diamétrica (distribución de frecuencias por categoría del diámetro a 1.30 m) y se caracterizó el nivel de dominancia de copa de cada tratamiento. En forma aleatoria se seleccionaron cinco árboles por parcela (30 total), sanos y no bifurcados; de ellos, tres se clasificaron en campo como suprimidos, siete intermedios, 15 codominantes y cinco dominantes. El derribo se realizó con una motosierra a una altura de 30 cm sobre el suelo.

Las variables medidas fueron: diámetro de tocón con corteza (DT, en cm), diámetro normal (DN) y diámetro al inicio de copa viva (DCV); altura del tocón (AT, en cm), a la punta (AT), de fuste limpio (AFL) y de copa viva (ACV). En cada árbol se separaron a las ramas del fuste, y de cada rama se registró: número de posición (contado desde la base), altura de inserción (AR, en m), diámetro basal a 1 cm del corte (DBR, en cm) con ayuda de un vernier marca Scala 222A® con aproximación de milímetro. El fuste completo se fraccionó en trozas de 1 m de largo, y en

cada troza se midió diámetro inferior y superior, y el árbol se cubicó por el método de trozas sobrepuestas (Bailey, 1995).

Para el muestreo de acículas se seleccionó aleatoriamente una submuestra de 20 árboles. La copa de cada árbol elegido se dividió en tres secciones de igual longitud. En cada sección se seleccionaron al azar de dos a tres ramas (145 en total), para así tratar de muestrear toda la longitud de la copa. Las acículas ya separadas de las ramas se metieron en bolsas de papel debidamente identificadas. En los puntos de medición de diámetro (DT, DN y DCV) y en la parte media en el fuste, se obtuvieron rodajas de 5 cm de espesor aproximadamente, que se identificaron y guardaron en costales de yute. El material se llevó a laboratorio, donde se midió el volumen y biomasa de cada rodaja, ésta última después de secado en estufa por 72 h a 102 °C. Con estos datos se calculó la densidad específica de la madera de cada rodaja y del promedio por árbol, promedio que según Deene y Hale (1999) es confiable, para luego ser multiplicado por el volumen de árbol y así estimar la biomasa ( $B_{\text{árbol}}$ , kg).

Las hojas frescas muestreadas fueron escaneadas en escáner de cama plana HP Scanjet G4050®. El AF (cm<sup>2</sup>) por imagen se obtuvo mediante el programa ImageJ® y los acumulados de la misma generaron el AF por rama. Las acículas se secaron a 75 °C por 72 h para medir biomasa foliar por rama ( $B_{\text{foliar}}$ , g). En cada rodaja se midió: diámetros sin corteza, de albura y de duramen (diferenciadas por el método translúcido) y con aplicación de azul de bromofenol a 1 %, que al cabo de 24 h colorea de azul el duramen y de amarillo la albura (Gilmore *et al.*, 1996); y ancho y área de albura ( $A_{\text{alb}}$ , al asumir circularidad concéntrica) mediante la expresión de Turner *et al.* (2000):

$$A_{\text{alb}} = \left\{ \left[ \pi \left( \frac{D_{sc}}{2} \right)^2 \right] - \left[ \pi \left( \left( \frac{D_{sc}}{2} \right) - A_{\text{ancho}} \right)^2 \right] \right\}$$

Donde:  $A_{\text{alb}}$  = área de albura en la rodaja de cada sección (cm<sup>2</sup>),  $D_{sc}$  = diámetro sin corteza de la rodaja (cm),  $\pi$  = 3.1416 y  $A_{\text{ancho}}$  = ancho promedio de albura (cm), medido en cuatro ejes.

El AF de ramas individuales ( $AF_{\text{rama}}$ ) se estimó mediante la siguiente ecuación lineal, bajo el supuesto de que el área de conducción total está afectada por la posición en la copa (Anexo 3.1):

$$AF_{\text{rama}} = 475.80 + 534.86(ABR) + 147.61(ABR)X_1 + 242.12(ABR)X_2$$

Donde:  $AF_{rama}$  = área foliar por rama ( $\text{cm}^2$ ),  $ABR$  = área basal de rama (cuadrado del diámetro basal de rama, en  $\text{cm}^2$ ) y  $X_{1,2} = 1$  si la rama estaba en la sección 1 (copa inferior), 2 (copa media) o 3 (copa superior) por defecto.

Con una bondad de ajuste  $R^2 = 0.87$  y un  $CV = 38 \%$ , el modelo estimó  $2806 \text{ cm}^2$  de  $AF$  promedio por rama, con error estándar de  $89 \text{ cm}^2$ . La suma de valores de  $AF_{rama}$  produjo el  $AF$  por árbol ( $AF_{árbol}$ ).

### 3.4.3 Análisis estadístico de los datos

Se aplicó un análisis de regresión entre el  $AF_{árbol}$  el  $A_{alb}$  de cada sección del fuste (tocón, DN y DCV), mediante modelos lineales simples. En los datos (Anexo 3.6) se comprobaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas con el procedimiento UNIVARIATE de SAS (SAS Institute Inc., 2004). También se usaron los procedimientos GLM, MODEL, TTEST (la prueba de medias entre tratamientos se hizo con la distribución t), ANOVA y CORR de SAS.

## 3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.5.1 Relación área foliar: área de albura ( $AF$ : $A_{alb}$ )

Las secciones del árbol que dieron las mejores bondades de ajuste fueron las de inicio de copa viva y diámetro de tocón ( $R^2 = 0.85$ ), que generaron el menor C.V. (22 %) y el menor error estándar de estimación (0.6). Las respectivas ecuaciones lineales simples fueron:  $AF = 0.082(A_{alb}) - 0.665$  y  $AF = 0.149(A_{alb}) - 0.173$  para la sección de tocón (Figura 3.1) y DCV, respectivamente. El menor ajuste ( $R^2 = 0.82$ ) se encontró en la sección de DN, con el consiguiente aumento en C.V. (24 %) y en error estándar (0.66), y su ecuación lineal de estimación fue  $AF = 0.090(A_{alb}) - 0.395$  (Anexo 3.2).

Estos resultados concuerdan con los encontrados por Cano (1993) en bosques naturales de *P. patula*, quien utilizó el mismo modelo lineal para estimar el  $AF$  proyectada en función de la  $A_{alb}$  en la sección de diámetro normal, donde el valor de la pendiente fue de 2.64 para árboles entre 21 y 38 años de edad. Debido a que las ecuaciones obtenidas en las tres secciones del fuste no mostraron diferencias ( $P \geq 0.63$ ) en el intercepto  $\beta_0$ , se ajustaron sin éste, lo que además facilitó la comparación con la literatura consultada (que presenta los modelos sin intercepto). Con el

modelo sin  $\beta_0$  se estimó que cada unidad de área de albura ( $\text{cm}^2$ ) abastece 0.079, 0.088 y 0.148  $\text{m}^2$  de  $AF$ , para las secciones de tocón, DN e inicio de copa viva, respectivamente. Estos resultados difieren de los encontrados por Stancioiu y O'Hara (2005) en árboles de 28 a 80 años de *Sequoia sempervirens* (D. Don) Endl., en los que reportaron relaciones de 0.25, 0.40 y 0.57  $\text{m}^2 \text{cm}^{-2}$  para DT, DN y DCV, respectivamente; tales diferencias en el cociente  $AF:A_{alb}$  pueden ser debidas a las variaciones entre especies y a que los árboles de este estudio son aún jóvenes (14 años), porque según Stancioiu y O'Hara (2005) dicho cociente tiende a mejorar con la edad del rodal.

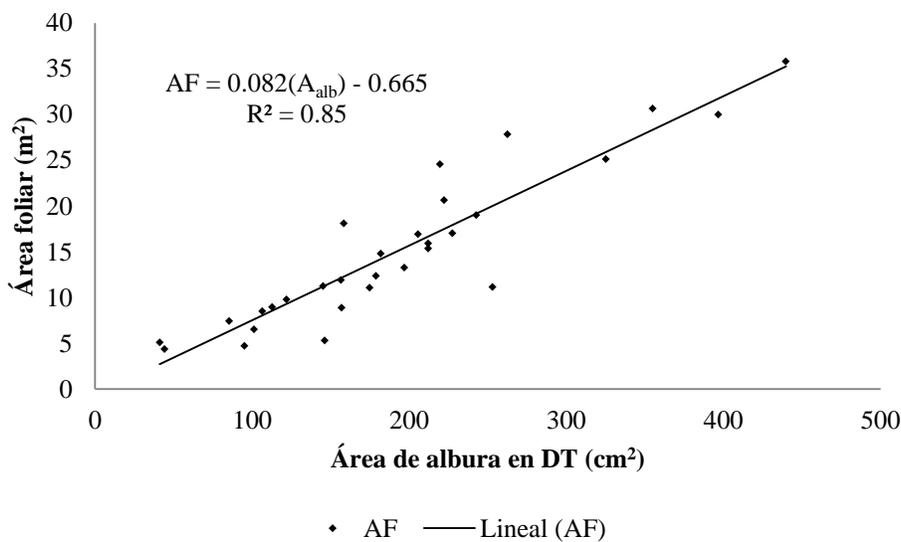


Figura 3.1 Cociente área foliar ( $AF$ ):área de albura ( $A_{alb}$ ) en la sección de diámetro de tocón (DT) en árboles de *P. patula*. La recta representa cinética lineal del cociente.

El efecto del aclareo sobre el  $AF$  estimada en el área de albura en el fuste, para cada sección del fuste, se evaluó mediante el modelo logarítmico  $AF = \lambda_0(A_{alb})^{\alpha_1}$  (Will *et al.*, 2002), donde  $\alpha_1$  es el parámetro de regresión estimado y  $\lambda_0$  la proporción de aclareo; así,  $\lambda_0 = k + \gamma$ , donde  $k$  es la proporción de aclareo y  $\gamma$  la proporción de no aclareo. Únicamente en la sección de inicio de copa viva se obtuvo un efecto significativo del aclareo ( $k$ ) en el  $AF$  proyectada ( $P = 0.04$ ), donde se encontró la mejor bondad de ajuste ( $R^2 = 0.85$ ) y el menor error estándar (0.58) ( $\lambda_0 = 0.139 - 0.024 \times \text{no aclareo}$ , y  $AF = 0.114 \times A_{alb}^{1.01}$ ) (Anexo 3.3).

En rodales de 75 años de *P. ponderosa* Laws, Simonin *et al.* (2006) encontraron que la porosidad (mayor conducción) del área de albura fue más alta en árboles sujetos a aclareos que en rodales no intervenidos, lo que significa que el aclareo incrementó la proporción de tejido conductivo en albura. Esta misma situación podría estar sucediendo en los árboles de *P. patula* usados en este estudio, ya que en el punto del DCV el promedio de  $A_{alb}$  de los individuos en parcelas aclareadas fue 110.7 cm<sup>2</sup> vs. 60.2 cm<sup>2</sup> en la parcela testigo, promedios que se estimaron mediante la ecuación de regresión ajustada para ese punto, con  $AF_{árbol}$  de 16.3 y 8.8 m<sup>2</sup> para los tratamientos aclareados y el testigo, respectivamente; además, la prueba de t mostró diferencias (P = 0.04) entre los árboles aclareados y los del testigo.

Cuadro 3.1 Volumen de aclareo, por árbol y porcentaje extraído de la densidad inicial por año de aclareo, densidad de árboles e indicadores de follaje en tratamientos de aclareo aplicados en *P. patula* en Ixtlán, Oaxaca.

Trat.	Aclareo (m <sup>3</sup> y %) <sup>†</sup>	Volumen extraído de aclareo (%) <sup>††</sup>			Densidad ha <sup>-1</sup>		IF 2009	Volumen	
		2004	2006	2008	Inicial	Residual	AF (m <sup>2</sup> /árbol)	Biomasa foliar	
								(kg/árbol)	(dm <sup>3</sup> /árbol)
1	46.6 (65.3)	30.9	9.3	25.1	3600	1250	24.2	5.0	220
3	68.1 (68.7)	49.2	1.6	17.9	5675	1775	20.4	4.0	160
4	47.3 (64.0)	41.3	sa	22.7	5000	1800	10.5	1.9	160
5	107.3 (58.0)	sa	sa	58.0	4525	1900	13.6	2.8	150
2	32.2 (39.7)	15.1	sa	24.6	3650	2200	13.6	2.9	120
6	Test. (22.0)	sa	sa	sa	4650	3625 <sup>¶</sup>	8.2	1.6	80
				Promedio	4517	2092	15.1	3.0	150

<sup>†</sup>volumen acumulado de los tres aclareos y entre paréntesis el porcentaje de densidad cortada con respecto a la densidad inicial, <sup>††</sup>porcentaje de densidad cortada con respecto a la densidad inicial por año de intervención, <sup>¶</sup>reducción por autoaclareo, sa = sin aclareo, Trat = tratamiento, AF = área foliar, IF = indicadores de follaje.

Estudios previos indican que la producción adicional de follaje debida al aclareo, podría ser explicada por un incremento en la disponibilidad de nutrientes, agua y luz, lo que puede generar un centro de copa más bajo porque hay mayor supervivencia de las ramas más bajas y mayor crecimiento de las ramas laterales (Baldwin *et al.*, 2000; Yu *et al.*, 2003). Este comportamiento se observó en *P. patula*, una especie intolerante y de difícil poda natural (Dvorak *et al.*, 2000), ya que el promedio de diámetro basal de rama fue superior en tratamientos con aclareo que sin aclareo (1.56 vs. 1.16 cm, respectivamente), y los valores más altos se encontraron en los Tratamientos 1 y 3 con la menor densidad residual (Cuadro 3.1).

Algunos estudios han determinado que la relación  $AF:A_{alb}$  varía por diferencias en el transporte de solutos en el xilema, lo cual podría estar asociado con el diámetro de vasos conductores, amplitud de anillos o velocidad del crecimiento (Eckmüllner y Sterba, 2000). En este sentido, al considerar que el crecimiento rápido puede generar mayor conductividad hidráulica al estar asociada con haces vasculares de diámetros más grandes, se podría esperar que los árboles de *P. patula* de parcelas aclareadas tengan una mayor relación  $AF:A_{alb}$ .

### 3.5.2 Eficiencia de crecimiento (EC)

La *EC* fue determinada mediante índices de crecimiento que relacionan el volumen o biomasa de madera con área de albura o área foliar. En el cociente volumen de madera en el fuste:área de albura en la sección de DN, el nivel de aclareo más alto (107.27 m<sup>3</sup>) del Tratamiento 5 tuvo un índice de 1.09 dm<sup>3</sup> cm<sup>-2</sup>, y así este tratamiento fue superior (P = 0.01) que el nivel de aclareo más bajo (32.19 m<sup>3</sup>, Tratamiento 2), que sólo produjo 0.92 dm<sup>3</sup> cm<sup>-2</sup>. El índice de crecimiento basado en la biomasa de madera en el fuste ( $B_{mad}$ ) por unidad de área de albura ( $A_{alb}$ ) en la sección transversal de DN, fue más alto (P = 0.03) en el Tratamiento 3 (con la mayor proporción de madera extraída en 2004) con 0.86 kg cm<sup>-2</sup>, que en el Tratamiento 1 (aclareo de 46.63 m<sup>3</sup>) con 0.6 kg cm<sup>-2</sup>.

El índice de crecimiento obtenido con el cociente volumen de madera en el fuste:AF, mostró su valor más alto con el aclareo de 47.27 m<sup>3</sup> (Tratamiento 4) donde se produjo 17.8 dm<sup>3</sup> de madera por m<sup>2</sup> de AF. Los valores más bajos se encontraron en los Tratamientos 1 y 2, ambos inferiores al Tratamiento 4 (P = 0.04 y P = 0.05, respectivamente); el valor mínimo fue de 9.6 dm<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y ocurrió en el Tratamiento 2 (Figura 3.2).

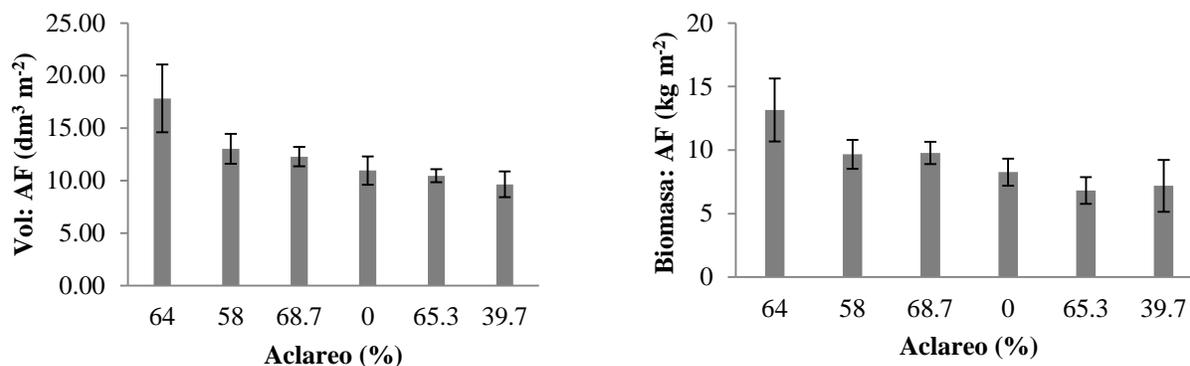


Figura 3.2 Volumen (*Vol*) y biomasa de madera producida por unidad de área foliar (*AF*) en función de la intensidad de aclareo aplicado (porcentaje de densidad extraída con respecto a la densidad inicial de plantación) a *P. patula*. Las barras verticales representan el error estándar.

La biomasa de madera por unidad de *AF* mostró una tendencia similar, con el valor más alto ( $13.15 \text{ kg m}^{-2}$ ) en el Tratamiento 4, que superó ( $P = 0.04$ ) al Tratamiento 1 cuyo nivel de aclareo fue de  $46.63 \text{ m}^3$  y que sólo produjo  $6.82 \text{ kg}$  de biomasa por unidad de *AF* (Figura 3.2). En todos los índices determinados, los tratamientos con más alta eficiencia de crecimiento fueron los de mayor intensidad de aclareo, tanto en los que se aplicó en su totalidad en 2008 (Tratamiento 5), como donde el volumen extraído se aplicó en 2004 con intensidades de  $71.6 \%$  (Tratamiento 3) y  $64.6 \%$  (Tratamiento 4). Las parcelas con las mínimas intensidades de aclareo (Tratamientos 1 y 2) y menores volúmenes de extracción en el primer aclareo de 2004, tuvieron una *EC* incluso más baja ( $P < 0.05$ ) que el testigo (Cuadro 3.1).

Muchos investigadores han observado una disminución en la *EC* con un aumento en el tamaño del árbol o del *AF* (Ryan *et al.*, 1997; McDowell *et al.*, 2002; Will *et al.*, 2002; Mainwaring y Maguire, 2004). Esta situación se presentó en el Tratamiento 1 donde están los árboles de mayor volumen o biomasa maderable y mayor *AF*, aunque su eficiencia de crecimiento fue la más baja, incluso menor que en el testigo (Tratamiento 6). Este comportamiento es similar al encontrado por McDowell *et al.* (2003) en *P. ponderosa*. Ello podría deberse a que en este estudio los tratamientos de menor densidad residual (Tratamientos 1 y 2) tenían los árboles más grandes después de las cortas, y posiblemente estos árboles hayan tenido una fracción reducida de

carbono asimilado para la producción de madera en el fuste y una fracción aumentada de carbono destinado al subsuelo para que las raíces estructurales puedan mantener la estabilidad en los espacios que se abrieron con los aclareos.

Otro aspecto que podría estar asociado con los mecanismos de reducción de la *EC* conforme aumenta el tamaño del árbol, es la conductividad hidráulica la cual se reduce conforme crece el árbol, según lo encontrado por Magnani *et al.* (2000) y McDowell *et al.* (2002). Los tratamientos con aclareo tuvieron en promedio 160 dm<sup>3</sup>/árbol, el doble que el testigo con 80 dm<sup>3</sup>/árbol (Cuadro 3.1), como resultado de la elevada densidad residual (3625 árboles ha<sup>-1</sup>) de éste. Esto pudo haberse originado por la competencia asimétrica, que según Schwinning y Weiner (1998) y Binkley *et al.* (2004) sucede cuando hay competencia severa y sólo un pequeño número de árboles grandes (dominantes) obtienen la mayor parte de los recursos disponibles y los utilizan eficientemente, mientras que los árboles suprimidos usan los recursos ineficientemente. Esta diferencia se nota con mayor claridad al comparar los volúmenes por árbol del Tratamiento 6 – testigo- y del 1 (220 dm<sup>3</sup>/árbol), este último con la menor densidad residual (1250 árboles ha<sup>-1</sup>), mayor tiempo de respuesta al aclareo y mayor cantidad de biomasa foliar por individuo (5 kg/árbol).

El efecto de aumentar la intensidad de aclareo en el crecimiento del árbol depende del tiempo de respuesta. Los mayores volúmenes de aclareo en 2004 (Tratamientos 3 y 4) y 2008 (Tratamiento 5) tuvieron *EC* más altas que el testigo, y aquellos con los menores volúmenes cortados en 2004 mostraron *EC* más bajas que el testigo (Tratamientos 1 y 2) (Cuadro 3.1, Figura 3.2).

Según McDowell *et al.* (2003), al establecerse una plantación o bosque en suelo “virgen” tiende a existir una mayor proporción de carbono por árbol. Es posible que esto haya ocurrido en este estudio, ya que los suelos de la plantación se encontraban en su fase de descanso después de su uso agrícola, con la consecuentemente alta proporción de carbono por árbol en el suelo; ello también originó una respuesta poco clara de la época de aclareo en el crecimiento.

Otro índice que determina la *EC* está basado en el incremento medio anual en volumen (*IMA<sub>v</sub>*) y el *AF*. El Tratamiento 4 tuvo la *EC* más alta, donde cada m<sup>2</sup> de *AF* formó 1.32 dm<sup>3</sup> de madera por año, valor que supera al Tratamiento 2 (*P* = 0.03), el cual tuvo menor volumen de aclareo y

presentó el valor más bajo de  $0.68 \text{ dm}^3 \text{ año}^{-1}$  de madera por  $\text{m}^2$  de *AF* (Figura 3.3). El hecho que el testigo haya mostrado la *EC* más alta que algunos tratamientos con aclareo es una respuesta típica, según McDowell *et al.* (2007), ya que el sitio ocupa su máxima capacidad de soporte a través de la fase de autoaclareo.

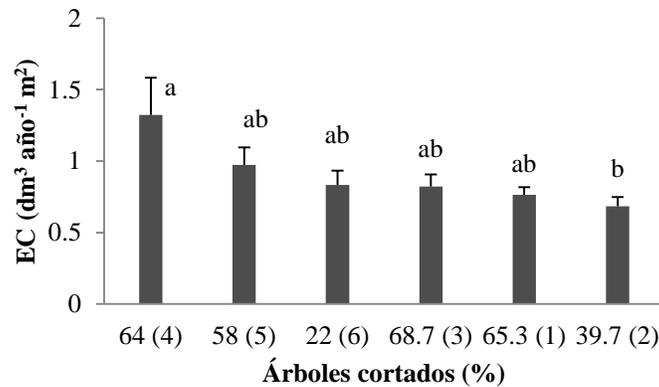


Figura 3.3 Comparación de medias para la eficiencia de crecimiento (*EC*) en función de la intensidad del aclareo (medido en porcentaje de árboles cortados) aplicado a *P. patula*. Los números entre paréntesis representan número de tratamiento (ver texto) y las líneas verticales el error estándar (Tukey, 0.03; CV = 33 %; E.E. = 0.29) (Anexo 3.4).

El  $IMA_V$  se ajustó mediante un modelo logarítmico que utiliza *AF* como variable independiente (Figura 3.4). El coeficiente de ajuste del modelo fue 0.70, y sus dos parámetros fueron significativos ( $P \leq 0.001$ ). Debido que la pendiente ( $\beta_1$ ) de la ecuación es  $< 1$ , la *EC* disminuyó con el aumento de  $AF_{\text{árbol}}$  (correlación negativa entre ambas,  $r = -0.4$ ).

Este comportamiento del *AF* está probablemente regulado por el incremento en la disponibilidad de recursos asociados a una menor competencia residual, ya que en experimentos controlados de *P. ponderosa*, Naumburg *et al.* (2001) encontraron una reducción en la tasa de fotosíntesis neta y en la biomasa de toda la planta en respuesta a la sombra. Además, el incremento de agua, nutrientes y otros recursos podría también ser crítico en la respuesta del *AF* (McDowell *et al.*, 2007). El *AF* disminuyó al reducirse la densidad luego de ser aplicados los

aclareos, porque se redujo la proporción de copas por los espacios abiertos. Esto se observó en los Tratamientos 1 y 3, donde se encontró el  $AF$  por árbol más alta, asociada con una menor  $EC$ . Esto originó que el  $AF$  y volumen de madera por árbol tuvieran una correlación positiva ( $r = 0.85$ ;  $P = 0.03$ ), y que la biomasa foliar se incrementara con el volumen de madera ( $r = 0.83$ ;  $P = 0.03$ ), lo cual coincide con lo encontrado por McDowell *et al.* (2006) en *P. ponderosa*, y podría deberse a la subutilización de los recursos del sitio para la producción de madera y secuestro de carbono.

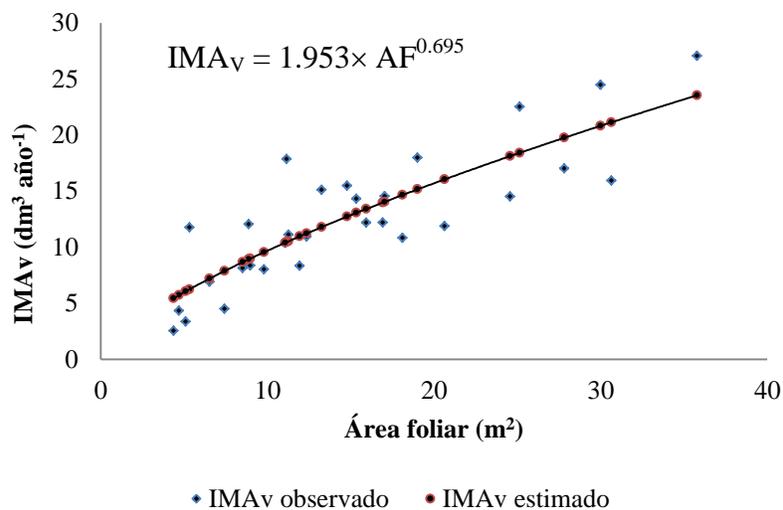


Figura 3.4 Estimación del incremento medio anual en volumen ( $IMA_v$ ) en función de área foliar ( $AF$ ) en árboles de *P. patula* en Ixtlán, Oaxaca (Anexo 3.5).

### 3.5.3 Incrementos con relación al aclareo

Incremento es el cociente entre las diferencias de tamaño de una condición final e inicial y el tiempo involucrado, que equivale a una tasa de crecimiento. Cuando se aplica para un periodo determinado, se denomina incremento corriente anual, si este periodo es un año, o si se obtiene el promedio anual de un periodo dado, se conoce como incremento corriente (ICA) y cuando se calcula para la edad total del rodal se denomina incremento medio anual (IMA). En los tratamientos evaluados se determinaron dos periodos de ICA: antes del aclareo (años 1995-2004)

y después del aclareo (años 2004-2008), e IMA (años 1995-2008), para las variables diámetro normal (DN), altura (AT), área basal (AB) y volumen (V) (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2 Incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en tratamientos con aclareos y el control en *P. patula* de Ixtlán, Oaxaca.

Variable	Años		Años		Razón de aclareo		Años	
	1995-2004		2004-2008		(2004-08/1995-04)		1995-2008	
	Aclareo	Testigo	Aclareo	Testigo	Aclareo	Testigo	Aclareo	Testigo
ICA <sub>DN</sub> (cm año <sup>-1</sup> )	1.08	0.90	2.04	1.03	1.89	1.14		
ICA <sub>AT</sub> (m año <sup>-1</sup> )	0.84	0.80	1.77	1.27	2.11	1.59		
ICA <sub>AB</sub> (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	4.14	3.48	1.81	4.72	0.44	1.36		
ICA <sub>V</sub> (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	15.39	12.51	34.68	44.25	2.25	3.54		
IMA <sub>DN</sub> (cm año <sup>-1</sup> )							0.16	0.08
IMA <sub>AT</sub> (m año <sup>-1</sup> )							1.10	0.90
IMA <sub>AB</sub> (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )							3.42	3.86
IMA <sub>V</sub> (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )							21.33	22.28

DN = diámetro normal, AT = altura, AB = área basal, V = volumen.

El efecto más evidente de los aclareos se observa en DN, ya que la razón de aclareo del 40 al 69 % de la densidad inicial de plantación (medición después del aclareo/medición antes del aclareo) en los tratamientos con aclareo, generó un valor de 1.89 vs. 1.14 del testigo, lo que da una diferencia de 0.75 que indica que los árboles de tratamientos aclareados engrosaron su fuste 75 % más que los árboles del testigo. Visto de otra manera, antes de aplicar las cortas la diferencia entre los tratamientos aclareados (ICA = 1.08 cm) y el testigo (ICA = 0.9 cm) era sólo de 0.18 cm año<sup>-1</sup>, mientras que después de aplicados los aclareos la tasa de crecimiento se incrementó a 1.01 cm año<sup>-1</sup>. Las mayores diferencias entre ambas condiciones (aclareo vs. testigo) ocurrieron en los tratamientos con mayor intensidad de corte, T3 y T1 (Figura 3.5). Los resultados aquí encontrados están acordes con otros estudios, como el de Youngblood (2010) quien aplicó tratamientos independientes y mezclados de aclareo y quema en bosques secos de coníferas en el oeste de EE. UU., y encontró que el diámetro medio se incrementó en comparación con el testigo, lo cual originó un pequeño pero significativo cambio en la estructura diamétrica del rodal.

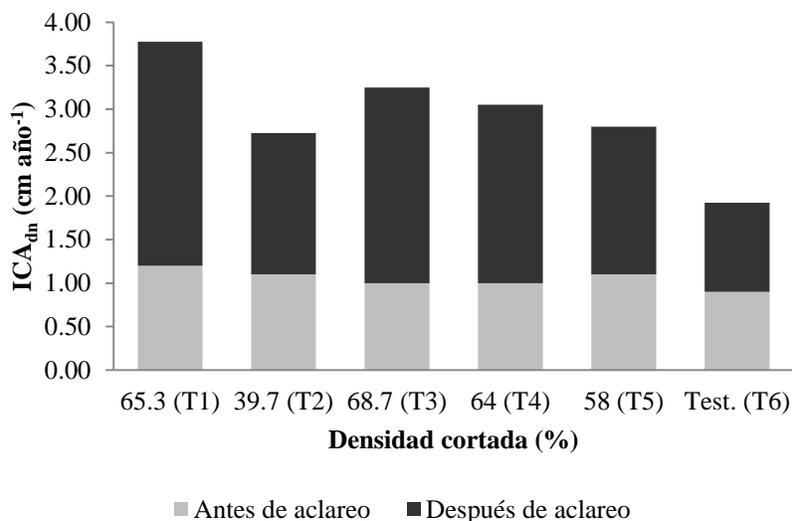


Figura 3.5 Incremento corriente anual en diámetro normal ( $ICA_{dn}$ ) antes y después de los aclareos en *P. patula* en Ixtlán, Oaxaca. Entre paréntesis el tratamiento respectivo. El porcentaje de densidad cortada se calculó con respecto a la densidad inicial de plantación.

El engrosamiento del fuste durante todo el periodo de crecimiento de plantación ( $IMA_{DN}$ ) para los tratamientos aclareados fue el doble que para el testigo,  $0.16$  vs.  $0.08$   $cm$   $año^{-1}$  respectivamente (Cuadro 3.2), lo que representa un aumento de 100 %. En contraste, en un experimento de aclareos a largo plazo en rodales de 67 y 86 años de *Picea abies* hecho en Finlandia por Jaakkola *et al.* (2005), quienes en densidades iniciales entre 1024 y 1750 árboles  $ha^{-1}$  aplicaron intensidades de aclareo bajas y altas, y encontraron que las altas intensidades incrementaron la tasa de engrosamiento entre 31 y 34 % con respecto a las bajas intensidades.

La altura de árboles también se incrementó con la aplicación de aclareos cortando entre 40 y 69 % de la densidad inicial de plantación, ya que el testigo creció 159 % (razón de aclareo 1.59) en los dos periodos de medición de  $ICA_{AT}$ , mientras que en los tratamientos con aclareo lo hicieron en 211 %, lo que representa un incremento en altura de 52 % en relación al testigo. Este comportamiento también se refleja en el  $IMA_{AT}$ , donde los tratamientos aclareados incrementaron su altura en 22 % respecto al testigo. Estos resultados concuerdan con los de Zhang *et al.* (2006) quienes mediante intensidades altas de aclareo ( $2.13 \times 2.13$  m o 2212 árboles  $ha^{-1}$ ) aplicadas en rodales de pino, lograron incrementar la altura del árbol en 13.1 %, y el

diámetro y volumen comercial del fuste por árbol se incrementó en más de 20 % y de 75 %, respectivamente.

Sin embargo, el efecto del aclareo en el crecimiento de altura no siempre es claro, ya que esta variable tiene una baja heredabilidad genética, está influida fuertemente por los factores de sitio y difiere enormemente entre especies, por lo que no es una característica que pueda ser controlada mediante el manejo de la densidad. Esto fue comprobado por Liu *et al.* (2003) quienes con aclareos redujeron la densidad en *Pinus contorta*, y determinaron que eso incrementó el diámetro pero redujo el crecimiento en altura; ello también depende del tiempo de respuesta, ya que al año de aplicarse los aclareos los árboles aumentaron su área foliar total y ello permitió restablecer el crecimiento en altura.

Las diferencias de efectos entre intensidades de aclareo en cuanto a área basal y volumen ( $ICA_{AB}$  e  $ICA_V$ , respectivamente) mostraron una reducción de 92 % (0.44-1.36) y de 129 % (2.25-3.54) para los tratamientos aclareados, en relación al testigo. Este fenómeno también puede observarse en el crecimiento medio, el cual en los tratamientos de baja intensidad de aclareo mostró un decremento de 12 % para  $IMA_{AB}$  y de 5 % para  $IMA_V$  en relación al testigo (Cuadro 3.2). Con estos resultados se comprueba que la finalidad del aclareo no es el incremento del volumen o área basal del rodal, ya que dichas variables se redujeron. Esto se explica porque inmediatamente después del aclareo tanto el AB como el volumen total del rodal se reducen, ya que la cantidad de follaje incrementará hasta que haya crecimiento de la copa. En una plantación de 15 años de edad de *Pseudotsuga menziesii* en EE. UU., Hummel y Hummel (2004) establecieron aclareos y testigos en densidades iniciales de 1.5 x 1.5 m y de 3 x 3 m, y a los 5 años de aplicados los aclareos determinaron que el volumen de las parcelas aclareadas ( $82.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) de alta densidad casi fue el doble que las del testigo ( $44.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ), y para bajas densidades, los valores respectivos fueron de 177.9 y  $298.2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , con un rendimiento en volumen comercial de 9.6 y 11.6 millares de pie tabla para las parcelas de alta y baja densidad, respectivamente.

### 3.6 CONCLUSIONES

Por razones prácticas y estadísticas se recomienda utilizar el área de albura de la sección transversal del tocón (DT) para estimar el área foliar proyectada y la eficiencia del crecimiento en bosques sujetos a aclareo. Cada unidad de albura ( $\text{cm}^2$ ) en las secciones del tocón, diámetro normal (DN) e inicio de copa viva (DCV), abastece a 0.082, 0.090 y 0.149  $\text{m}^2$  de área foliar (AF) proyectada, respectivamente, y puesto que el aclareo induce incrementos en la proporción de tejido conductivo en albura se debe emplear el diámetro del tocón para detectar diferencias del efecto del aclareo en el área foliar.

La eficiencia de crecimiento calculada con base en volumen, biomasa de madera e incremento medio anual en volumen, se incrementó con el aclareo, sobre todo cuando fue aplicado con mayor intensidad y con mayor tiempo de respuesta (cinco años en este estudio, en los aclareos efectuados en 2004, pues las parcelas bajo aclareo produjeron 12.7  $\text{dm}^3$  de madera por metro cuadrado de área foliar proyectada, vs. 11  $\text{dm}^3 \text{ m}^{-2}$  del testigo no aclareado. En cambio, los tratamientos aclareados y con menor densidad residual mostraron una eficiencia del crecimiento inferior al testigo. Además, esta eficiencia disminuyó con el aumento en tamaño y edad de los árboles, el tamaño referido como área foliar, biomasa o volumen de madera. Es decir, los árboles de mayor tamaño y con mayor área foliar no son necesariamente los más eficientes en el crecimiento maderable, ya que por un periodo de años subutilizan los recursos del sitio para la producción de madera y secuestro de carbono (McDowell *et al.*, 2006). El incremento medio anual en volumen en los árboles de *Pinus patula* se puede predecir mediante el modelo logarítmico  $IMA_V = 1.953 \times AF^{0.695}$ , cuya cinética muestra que la eficiencia de crecimiento se reduce conforme aumenta el área foliar (AF) y que su valor máximo es de 1.32  $\text{dm}^3 \text{ año}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .

La variable de *Pinus patula* más afectada por el aclareo fue el diámetro normal ( $ICA_{DN}$ ), el cual se incrementó en 75 % por efecto de la reducción de la densidad de árboles. La altura de árbol ( $ICA_{AT}$ ) mostró un incremento de 52 % en los tratamientos aclareados, en relación al testigo. Sin embargo, en comparación con el testigo el crecimiento en área basal ( $ICA_{AB}$ ) y en volumen de los árboles se redujo por efecto del aclareo en 92 y 129 % respectivamente, diferencias que se minimizan en el crecimiento medio anual (IMA) para la edad completa de la plantación a 12 y 5 % para AB y volumen, respectivamente. De esta manera, la aplicación de aclareos en las condiciones de la plantación sólo se justifica en la obtención de madera para aserrío o triplay.

### 3.7 LITERATURA CITADA

- Alien, C. D., M. Savage, D. A. Falk, K. F. Sucklin, T. W. Swetnam, T. Schulke, P. B. Stacey, P. Morgan, M. Huffman and J. T. Klingel. 2002. Ecological restoration of southwestern ponderosa pine ecosystems, a broad perspective. *Ecology Applied* 12: 1418-1433.
- Bailey, R. L. 1995. Upper-stem volumes from stem-analysis data: an overlapping bolt method. *Canadian Journal of Forest Research* 25: 170-173.
- Baldwin, V. C., K. D. Peterson, A. Clark, R. B. Ferguson, M. R. Strub and D. R. Bower. 2000. The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 3-year-old loblolly pine. *Forest Ecology and Management* 137: 91-102.
- Binkley, D., J. L. Stape and M. G. Ryan. 2004. Thinking about efficiency of resource use in forests. *Forest Ecology and Management* 193: 5-16.
- Brown, R. T., J. K. Agée and J. F. Franklin. 2004. Forest restoration and fire: principles in the context of place. *Conservation Biology* 18: 903-912.
- Cano M., E. E. 1993. Relación alométrica entre el área foliar y el área de la albura en *Pinus patula* Schl et Cham., en Zacatlán, Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 89 p.
- Castellanos-Bolaños, J. F., E. J. Treviño-Garza, O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, M. Musalem-Santiago y R. López-Aguillón. 2008. Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 14: 51-63.
- Curtis, R. O. and D. D. Marshall. 2002. Level-of-growing-stock cooperative study in Douglas-fir. Rep. 14. Stampede Creek: 30 Year Results. USDA For. Serv. Res. Pap. PNW-RP-543. USA. 120 p.
- Deene, M. and M. Hale. 1999. Cell wall and lumen percentages in relation to wood density of *Nothofagus nervosa*. *IAWA Journal* 20: 23-36.
- Dvorak, W. S., G. R. Hodge, J. E. Kietzka, F. Malan, L. F. Osorio and T. K. Stanger. 2000. *Pinus patula*. In: Conservation and Testing of Tropical and Subtropical Forest Tree Species by the CAMCORE Cooperative, College of Natural Resources, NCSU. Raleigh, NC. USA. pp: 148-173.

- Eckmüller, O. and H. Sterba. 2000. Crown condition, needle mass, and sapwood area relationships of Norway spruce (*Picea abies*). *Canadian Journal of Forest Research* 30: 1646-1654.
- Gajardo-Caviedes, P. A., M. A. Espinoza, U. T. González and D. G. Ríos. 2005. The influence of thinning and tree size on the sapwood area/leaf area ratio in coigue. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 1679-1686.
- Gilmore, D. W. and E. K. Zenner. 2005. Foliage-sapwood area relationships for balsam fir in Northwestern central Minnesota. *Northern Journal of Applied Forestry* 22: 203-210.
- Gilmore, D. W., R. S. Seymour and D. A. Maguire. 1996. Foliage-sapwood area relationships for *Abies balsamea* in central Maine, USA. *Canadian Journal of Forest Research* 26: 2071-2079.
- Guillespie, A., H. L. Alen and J. Vose. 1994. Amount and vertical distribution of foliage of young loblolly pine as affected by canopy position and silvicultural treatment. *Canadian Journal of Forest Research* 24: 1337-1344.
- Hoffmann, C. W. and V. A. Usoltsev. 2002. Tree-crown biomass estimation in forest species of the Ural and of Kazakhstan. *Forest Ecology and Management* 158: 59-69.
- Hummel, S. and R. Hummel. 2004. Five-year thinning response of an overgrown Douglas-fir Christmas tree plantation. *Western Journal of Applied Forestry* 19: 171-175.
- Jaakkola, T., H. Mäkinen, M. P. Saren and P. Saranpää. 2005. Does thinning intensity affect the tracheid dimensions of Norway spruce? *Canadian Journal of Forest Research* 35: 2685-2698.
- Kanaskie, A. and D. Maguire. 2004. Trends in Swiss needle cast damage in thinned and unthinned Douglas-fir plantations with varying intensity of Swiss needle cast in the Coast Range of Oregon. *In: 2004 Annual Report. Swiss Needle Cast Cooperative, College of Forestry, Oregon State University, Corvallis. OR. USA. pp: 17-23.*
- Landsberg, J. J. and S. T. Gower. 1997. *Applications of Physiological Ecology to Forest Production*. Academic Press. San Diego, CA. USA. 354 p.
- Liu, X., U. Silins, V. J. Lieffers and R. Man. 2003. Stem hydraulic properties and growth in lodgepole pine stands following thinning and sway treatment. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 1295-1304.

- Magnani, F., M. Mencuccini and J. Grace. 2000. Age-related decline in stand productivity: the role of structural acclimation under hydraulic constraints. *Plant Cell & Environment* 23: 251-264.
- Mainwaring, D. B. and D. A. Maguire. 2004. The effect of local stand structure on growth and growth efficiency in heterogeneous stands of ponderosa pine and lodgepole pine in central Oregon. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 2217-2229.
- McDowell, N. G., H. Barnard, B. J. Bond, T. Hinckley, R. Hubbard, H. Ishii, B. Kostner, F. C. Meinzer, J. D. Marshall, F. Magnani, N. Phillips, M. G. Ryan and D. Whitehead. 2002. The relationship between tree height and leaf area:sapwood area ratio. *Oecologia* 132: 12-20.
- McDowell, N. G., H. D. Adams, J. D. Bailey and T. E. Kolb. 2007. The role of stand density on growth efficiency, leaf area index, and resin flow in southwestern ponderosa pine forests. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 343-356.
- McDowell, N. G., H. D. Adams, J. D. Bailey, M. Hess and T. E. Kolb. 2006. Homeostatic maintenance of ponderosa pine gas exchange in response to stand density changes. *Ecology Applied* 16: 1164-1182.
- McDowell, N. G., J. R. Brooks, S. Fitzgerald and B. J. Bond. 2003. Carbon isotope discrimination and growth response of old ponderosa pine trees to stand density reductions. *Plant Cell & Environment* 26: 631-644.
- Naumburg, E., L. E. DeWald and T. E. Kolb. 2001. Shade responses of five grasses native to southwestern U.S. *Pinus ponderosa* forests. *Canadian Journal of Botany* 79: 1001-1009.
- Quiñonez-Piñon, R. and C. Valeo. 2004. Sapwood area as a scaling factor for transpiration rates. *In: American Geophysical Union, Spring Meeting 2004. Montreal, Canada. 17-21 May, 2004. pp: 1818-1851.*
- Reid, D. E., V. J. Iffers and U. Silins. 2004. Growth and crown efficiency of height repressed lodgepole pine; are suppressed trees more efficient? *Trees (Berl.)* 18: 390-398.
- Ryan, M. G., D. Binkley, and J. H. Fownes. 1997. Age-related decline in forest productivity: pattern and process. *Advanced Ecology Research* 27: 213-262.
- SAS Institute Inc. 2004. SAS/STAT 9.1 User's guide. SAS Institute, Cary, NC. USA. 4979 p.
- Schwinning, S. and J. Weiner. 1998. Mechanisms determining the degree of size asymmetry in competition among plants. *Oecologia* 113: 447-455.

- Simonin, K., T. E. Kolb, M. Montes-Helu and G. W. Koch. 2006. Restoration thinning and the influence of tree size and leaf area to sapwood area ratio on *Pinus ponderosa* Laws water relations. *Tree Physiology* 26: 493-503
- Skov, K. R., T. E. Kolb and K. F. Wallin. 2004. Tree size and drought affect ponderosa pine physiological response to thinning and burning treatments. *Forest Science* 50: 81-91.
- Stancioiu, P. T. and K. L. O'Hara. 2005. Sapwood area–leaf area relationships for coast redwood. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 1250-1256.
- Turner, D. P., S. A. Acker, J. E. Means and S. L. Garman. 2000. Assessing alternative allometric algorithms from estimating leaf area of Douglas-fir trees and stands. *Forest Ecology and Management* 126: 61-76.
- Will, R. E., G. T. Munger, Y. J. Zhang and B. E. Borders. 2002. Effects of annual fertilization and complete competition control on current annual increment, foliar development, and growth efficiency of different aged *Pinus taeda* stands. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 1728-1740.
- Youngblood, A. 2010. Thinning and burning in dry coniferous forests of the western United States: effectiveness in altering diameter distribution. *Forest Science* 56:46-60.
- Yu, S., J. L. Chambers, Z. Tang and J. P. Barnett. 2003. Crown characteristics of juvenile loblolly pine 6 years after application of thinning and fertilization. *Forest Ecology and Management* 180: 345-352.
- Zhang, S. Y., G. Chauret, D. E. Swift and I. Duchesne. 2006. Effects of precommercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 945-953.

## CAPÍTULO IV

### ¿LOS ACLAREOS AFECTAN LA ACUMULACIÓN DE BIOMASA AÉREA EN UNA PLANTACIÓN DE *Pinus patula*?<sup>3</sup>

#### 4.1 RESUMEN

El aclareo puede modificar la distribución y cantidad de biomasa aérea, en función del tiempo de respuesta y de las condiciones de crecimiento. En este trabajo se analizó el efecto de aclareos en la distribución y contenido de biomasa aérea acumulada de *Pinus patula* mediante muestreos destructivos de 30 árboles en 2009, después de estar sometidos a diferentes intensidades de aclareo desde 2004, más un testigo intacto. La eliminación entre 40 y 69 % (entre 1450 y 3900 árboles ha<sup>-1</sup>) de la densidad inicial de plantación afectó significativamente ( $P < 0.05$ ) la cantidad y distribución de biomasa foliar y la cantidad de madera con corteza en el fuste a nivel de árbol individual, pero no por hectárea en algunos componentes del árbol. Las altas intensidades de aclareo (65.3 y 68.7 %) y las respectivas densidades residuales bajas generaron la mayor acumulación de biomasa foliar (5.4 kg/árbol y 8.0 t ha<sup>-1</sup>), que superaron ( $P < 0.05$ ) al testigo sin aclareo (1.5 kg/árbol). La biomasa de madera con corteza en fuste bajo aclareo también superó ( $P < 0.05$ ) al testigo (98 vs. 35.3 kg/árbol), pero a nivel hectárea la acumulación de biomasa fue similar entre ambas condiciones debido a la excesiva densidad residual del testigo; lo mismo ocurrió en la biomasa total de ramas y en la distribución en el fuste. Sin embargo, las parcelas con aclareo generan productos más adecuados para expandir el tiempo medio de residencia del carbono. Este resultado es relevante para considerar los efectos del aclareo sobre la adicionalidad de carbono en plantaciones forestales.

**Palabras clave:** *Pinus patula*, acumulación de biomasa, plantación forestal, intensidad de aclareo, edad de aclareo.

---

<sup>3</sup> Artículo en revisión en la revista Agrocienza

## 4.2 SUMMARY

Thinning can change the distribution and quantity of aboveground biomass, depending on thinning age and growth conditions. In this paper the thinning effect on the distribution and amount of aboveground biomass accumulated in *Pinus patula*, was analyzed by destructive sampling of 30 trees in 2009, after being subjected to different thinning intensities since 2004, leaving an intact control. Removing between 40 and 69 % (between 1450 and 3900 trees ha<sup>-1</sup>) of the initial planting density caused a significant effect ( $P < 0.05$ ) on the amount and distribution of leaf biomass and on the amount of stem wood with bark at tree-individual level, but not per hectare basis in some other parts of the tree. The high intensity of thinning (65.3 y 68.7 %) and the corresponding low residual densities generated the highest gain ( $P < 0.05$ ) in foliar biomass accumulation (5.4 kg/tree, 8.0 t ha<sup>-1</sup>) compared to the control without thinning (1.5 kg/tree). In wood-bark stem biomass, thinned trees also outperformed ( $P < 0.05$ ) the control (98 vs. 35.3 kg/tree), but on hectare level biomass accumulation was similar in both conditions due to excessive residual density of the control; the same result was attained on total biomass of branches and on the biomass distribution in the stem. However, thinned stands generate more suitable wood products to expand the mean residence time of carbon. This is a relevant result for considering carbon additionality as effect of thinning practices.

**Key words:** *Pinus patula*, biomass accumulation, forest plantation, thinning intensity, thinning age.

## 4.3 INTRODUCCIÓN

Los modelos empíricos y los modelos de procesos (tubería, arquitectura hidráulica o aproximaciones mecanicistas) ayudan a explicar la estructura de las diferentes partes del árbol, donde la arquitectura de copa se considera como una función de factores biológicos, físicos o mecánicos, además de modelar su efecto en la funcionalidad y crecimiento de los componentes de un árbol. Por otro lado, los modelos alométricos de biomasa para árboles individuales son típicamente específicos a las condiciones de sitio, manejo y especie. En muchas ocasiones la estimación de los componentes de biomasa aérea permite incrementar su habilidad predictiva al

incluir variables de copa (área y longitud de copa) y la altura, en adición al diámetro normal (Antonio *et al.*, 2007).

Las relaciones significativas entre la copa y biomasa aérea con el diámetro (DN), edad y densidad son útiles en el manejo del rodal (masa forestal con características homogéneas). La cantidad de biomasa que un árbol puede acumular y distribuir entre sus estructuras, depende de varios factores. Según Cano *et al.* (1996) y Castellanos *et al.* (1996), la edad y clase de copa en *P. patula* afectaron la partición de biomasa, porque el área foliar específica disminuye con el diámetro de los árboles y la edad del follaje e incrementa en la porción inferior de la copa. La forma de la copa y diámetro del tallo tienden a variar con la altura, lo cual genera variaciones en la biomasa, variaciones que están estrechamente correlacionadas con el DN ( $r > 0.91$ ) y la edad ( $r > 0.81$ ) (Alves y Santos, 2002; Pérez y Kanninen, 2003).

El aclareo es la herramienta mediante la cual se controla la densidad del rodal y se modifican los patrones de partición de biomasa. El efecto más evidente es el incremento en diámetro, sobre todo cuando se cortan árboles dominantes (Leak, 2007). Lo mismo fue observado por Youngblood (2010) en bosques secos de coníferas, donde el aclareo incrementó el diámetro medio y originó un cambio significativo en la variación del diámetro del rodal. Así, el aclareo aplicado a árboles de diámetro pequeño permite obtener mayor volumen de madera comercial, que cuando se aplica a árboles de diámetro medio y grande; los sitios no intervenidos pueden mostrar tasas más altas de crecimiento en biomasa que los aclareos realizados en árboles de diámetro medio y pequeño (Hoover y Stout, 2007).

Otros efectos del aclareo se han encontrado al aplicar altas intensidades de corta a rodales viejos de *Picea abies* en Finlandia, pues la tasa de crecimiento en DN se incrementó entre 31 y 34 % con respecto a las bajas intensidades (Jaakkola *et al.*, 2005). Los aclareos intensivos (espaciamiento residual de  $2.13 \times 2.13$  m) en *Pinus banksiana* causaron incrementos de amplitud de copa, diámetro de ramas, ahusamiento y altura (13.1 %), DN (20 %) y volumen comercial del fuste (75 %), con respecto al testigo (Zhang *et al.*, 2006).

Varios factores pueden afectar la distribución de biomasa. Según Graciano *et al.* (2006), la fertilización con P aplicada a plantas jóvenes de *Eucalyptus grandis* generaron un incremento en follaje y un decremento en raíz, mientras que la aplicación de N incrementó la biomasa en raíz sin modificar el follaje. Los árboles poseen una jerarquía en la prioridad de partición de biomasa, en la cual el incremento del tallo tiene menor prioridad que el follaje y raíces finas, para así

mejorar la competencia por luz y por agua y nutrientes (Oliver y Larson, 1996). Al incrementar la densidad de plantación, la competencia intraespecífica por el uso del suelo y subsuelo se incrementa potencialmente y cambia las prioridades de partición (Burkes *et al.*, 2003). Otros factores que afectan la partición de biomasa son calidad del sitio y disponibilidad de nutrientes (Wang *et al.*, 1998).

El aumento de la superficie plantada y la importancia comercial y ambiental de *Pinus patula* Schl. *et* Cham. hacen necesario conocer la variación vertical de los componentes de biomasa, así como el efecto de tratamientos silvícolas sobre la misma. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue analizar el efecto de aclareos aplicados de forma bianual desde una edad de nueve años (2004), sobre la distribución y acumulación de biomasa aérea en árboles de *Pinus patula* Schl. *et* Cham. plantados en Ixtlán, Oaxaca, México.

## 4.4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.4.1 Antecedentes de la plantación

La plantación de *P. patula* Schl. *et* Cham. fue establecida en 1995 en Ixtlán, Oaxaca, a 17° 22' 38.69" LN y 96° 28' 44.8" LO, en terrenos con 40 % de pendiente y altitud promedio de 2550 m. Se utilizó plántula obtenida de semilla colectada de 50 árboles seleccionados del bosque natural de la misma comunidad. La preparación del sitio se hizo con maquinaria pesada y se plantó a densidades entre 3600 y 5675 árboles ha<sup>-1</sup>.

En 2004 se delimitaron seis parcelas de 20 x 20 m, separadas entre sí por una franja de protección de 10 a 15 m de ancho. En cinco parcelas se aplicaron aclareos en intervalos de dos años (2004, 2006 y 2008), y una parcela se dejó intacta como testigo. Antes y después del aclareo se midió: diámetro normal (DN, cm), altura de árbol (AT, m), área basal (AB, m<sup>2</sup>) y volumen por árbol (V, m<sup>3</sup>); todos los valores se convirtieron a datos por parcela y por hectárea.

### 4.4.2 Muestreo de árboles y variables medidas

En 2009 se seleccionaron aleatoriamente y derribaron cinco árboles por parcela (30 total), sanos y no bifurcados. Después del derribo se midieron las variables: diámetro (cm) de tocón con corteza, diámetro normal (DN, a 1.30 m) y diámetro al inicio de copa viva; longitudes (m) del

tocón, a la punta del fuste (AT), del fuste limpio y de copa viva. En cada árbol se separó a las ramas del fuste, y de cada rama se registró: número de posición (a partir de la base), altura de inserción (m), diámetro basal a 1 cm del corte (cm), con un vernier Scala 222A® (Gimbel Mexicana S.A. de C.V., México, D. F.).

El fuste completo se fraccionó en trozas de 1 m de largo; cada troza se pesó en verde (PV, kg) con una báscula electrónica Torrey®, serie EQB/EQM (Houston, TX, USA), con capacidad de 100 kg, y en cada troza se midió diámetro inferior y superior con corteza (cm), grosor de corteza (cm), y por diferencia se calculó el diámetro sin corteza (cm): luego, el árbol se cubió por el método de trozas sobrepuestas (Bailey, 1995). En la primera troza se obtuvieron dos rodajas (inferior y superior) de 5 cm de espesor; en el resto de las trozas sólo la superior.

En cada rodaja se determinó el PV (g) en campo y el volumen verde por desplazamiento de agua (VV, cm<sup>3</sup>) en laboratorio. Las rodajas se secaron a 102 °C en estufa Shel Lab FX14® (Cornelius, OR., USA.) hasta peso constante, luego se registró el peso seco (PS, g) en balanza analítica Sartorius® modelo SAR TALENT1 (Miami, FL, USA) con capacidad de 1620 g. Con esta información se determinó la gravedad específica de la madera por rodaja ( $GE = PS/VV$ , en g cm<sup>-3</sup>). Con el producto GE por rodaja (en kg m<sup>-3</sup>) y el VV con y sin corteza de cada troza, se calculó el PS de madera y de corteza en cada sección, y los respectivos valores acumulados por altura de sección del fuste (kg).

El volumen de rama (cm<sup>3</sup>) se calculó con la fórmula del cono. En la parte media de la copa, del lado norte, se eligieron aleatoriamente tres ramas de crecimiento medio. De ellas se obtuvieron tres secciones de 5 cm de longitud, que se identificaron y metieron en bolsas de papel. En laboratorio se obtuvo el VV de cada sección por desplazamiento de agua, con ayuda de una probeta de 250 mL, y se registraron los PV y PS en la misma balanza analítica antes mencionada (este último después del secado en estufa a 102 °C). Con estos datos se pudo estimar la GE de cada muestra, y luego se calculó la GE promedio de rama por árbol (en kg m<sup>-3</sup>). Para la biomasa de ramas individuales y de sección de fuste, se utilizó el mismo procedimiento empleado en el componente madera.

En el muestreo de acículas se seleccionó aleatoriamente una submuestra de 20 árboles. La copa se dividió en tres secciones de igual longitud. En cada sección se eligieron al azar de cuatro a cinco ramas (314 en total), que representaran todo el fuste. Las acículas se separaron de las ramas y se metieron en bolsas de papel identificadas. El follaje se secó a 75 °C por 72 h y la biomasa

foliar por rama ( $B_{foliar}$ , g) se midió en la misma balanza analítica antes mencionada. La  $B_{foliar}$  de ramas individuales se estimó mediante la siguiente ecuación lineal, bajo el supuesto de que el área de conducción total está afectada por la posición en la copa (De Los Santos-Posadas, 1998):

$$B_{foliar} = 2.7 - 32.4 \times DBR^2 + 3.3 \times DBR^2 \times AR + 17.7 \times (DBR^2 \times X_1) + 15.5 \times (DBR^2 \times X_2)$$

Donde:  $B_{foliar}$  = biomasa foliar por rama (g),  $DBR$  = diámetro basal de rama (cm),  $AR$  = altura de rama (m), y  $X_{1, 2} = 1$  si la rama estaba en la sección 1 (copa inferior), 2 (copa media) o 3 (copa superior, por omisión ya que el parámetro respectivo fue 0).

Con los 145 datos de biomasa foliar en ramas se hizo un análisis de regresión para un modelo, el cual tuvo una bondad de ajuste  $R^2$  de 0.80 y un error estándar de 1.7. Este modelo se utilizó para estimar la biomasa de acículas de 1328 ramas. La biomasa de acículas por sección de fuste se calculó con base en la altura de inserción de la rama en el fuste ( $AR$ ), utilizando el modelo de  $B_{foliar}$ .

#### 4.4.3 Análisis estadístico de los datos

La biomasa de los componentes (madera con corteza, follaje y ramas) se sumó en función de la sección del fuste de cada árbol, para obtener gráficos de distribución de biomasa acumulada. En los datos se comprobaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas con el procedimiento UNIVARIATE de SAS (SAS Institute Inc., 2004). Los análisis de regresión se realizaron con los procedimientos GLM y MODEL y el método SUR (por sus siglas en inglés, Seemingly Unrelated Regressions) de SAS.

## 4.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.5.1 Biomasa acumulada de madera con corteza ( $BAM_{CC}$ )

A nivel árbol, el mayor contenido de biomasa en madera con corteza y mayor variabilidad ( $98.0 \text{ kg} \pm 52.1$ ) se obtuvo en la Parcela 1 de menor densidad residual ( $1250 \text{ árboles ha}^{-1}$ ), y el valor mínimo en la parcela testigo ( $35.3 \text{ kg} \pm 24.3$ ), el cual posee la máxima densidad residual. En cambio, la biomasa por hectárea de este componente presentó el valor más alto en la Parcela 3

(156.2 t), que tiene la mayor intensidad de aclareo (68.7 %). Debido a la alta densidad residual del testigo (3625 árboles ha<sup>-1</sup>), su biomasa fue la segunda más alta (128.0 t ha<sup>-1</sup>).

La biomasa más baja por unidad de superficie se presentó en la Parcela 2 (96.1 t ha<sup>-1</sup>), con mayor densidad residual entre las aclareadas (2200 árboles ha<sup>-1</sup>) y menor intensidad de aclareo (39.7%) (Cuadro 4.1). Estos resultados son contrarios a los de Costas *et al.* (2004) quienes a mayor densidad de árboles observaron mayor biomasa por unidad de superficie y menor biomasa individual, en *Pinus taeda*.

Cuadro 4.1 Acumulación de biomasa aérea por componente y total a nivel árbol y por hectárea, en parcelas aclareadas de *P. patula* en Ixtlán, Oaxaca.

Parc.	DR. (ha)	Nivel de aclareo		<u>Biomasa (kg por árbol) ± D.E.</u>				<u>Biomasa por hectárea (t)</u>			
		(m <sup>3</sup> ) <sup>¶</sup>	(%) <sup>§</sup>	Mad.	Fol.	Ram.	Tot.	Mad.	Fol.	Ram.	Tot.
3	1775	68.1	68.7	88.0 ±	4.5 ±	9.1 ±	101.5				
				25.0	1.7	4.6	± 31.2	156.2	8.0	16.1	180.2
Test	3625	0	0	35.3 ±	1.5 ±	2.9 ±	39.7 ±				
				24.3	0.9	2.5	27.3	128.0	5.5	10.6	144.1
1	1250	46.6	65.3	98.0 ±	5.4 ±	10.8 ±	114.2				
				52.1	2.9	6.4	± 61.4	122.5	6.7	13.5	142.7
5	1900	107.3	58.0	61.0 ±	3.2 ±	5.1 ±	69.3 ±				
				20.8	1.9	2.5	24.7	115.9	6.1	9.8	131.7
4	1800	47.3	64.0	58.1 ±	2.3 ±	4.1 ±	64.5 ±				
				17.5	1.0	3.1	20.1	104.7	4.1	7.4	116.2
2	2200	32.2	39.7	43.7 ±	2.3 ±	4.4 ±	50.4 ±				
				20.5	1.4	3.0	24.6	96.1	5.1	9.6	110.8

DR = densidad residual en el aclareo 2008; <sup>¶</sup>Volumen acumulado extraído en los tres aclareos; <sup>§</sup>Porcentaje de densidad extraída con respecto a la densidad inicial de plantación; D.E. = desviación estándar, Parc = parcela; Mad = madera con corteza; Fol = follaje; Ram = ramas sin acículas; Tot = total; Test = testigo.

Debido a que la producción de biomasa aérea total está determinada por la naturaleza genética de los árboles y por las condiciones ambientales y de manejo del sitio (Corbett, 2001), el aclareo genera efectos sobre el tamaño de los árboles y la cantidad total de biomasa aérea en *P. patula*. El tiempo que tarda un sitio aclareado en recuperar su potencial de crecimiento se le llama tiempo de respuesta al aclareo, el cual para *Pinus contorta* var. *latifolia* se determinó en cuatro años (Blevins *et al.*, 2005). En este estudio, sólo la Parcela 3 de mayor intensidad de aclareo (68.7 %) superó al testigo en biomasa por componente o en total por ha (Cuadro 4.1); de esta forma los aclareos realizados desde 2004, en términos de biomasa, están justificados al eliminar al menos el 68.7 % de la densidad inicial de plantación.

El objetivo de los aclareos aplicados a una masa forestal es producir un mayor volumen comercial de madera por unidad de superficie (Hummel y Hummel, 2004). Ello se logra porque al reducir la densidad de plantación, los árboles residuales obtienen mayor espacio de crecimiento y pueden crecer más en diámetro, con lo cual se puede aumentar la proporción extraída de productos maderables con calidad para aserrío de largas dimensiones y para triplay. Esta calidad en la madera puede mejorarse al combinar el aclareo con poda de ramas inferiores, porque así se incrementa la proporción de madera libre de nudos (Montagu *et al.*, 2003).

El efecto del aclareo sobre la  $BAM_{CC}$  se evaluó mediante el modelo de regresión que evalúa la biomasa de madera como una función de sus dimensiones combinadas (Reed y Tomé, 1998) y que describe el ahusamiento del fuste:

$$BAM_{CC} = \beta_0 \times (DN^2 \times AT)^{\beta_1} - [\alpha_0 \times d^2 \times (AT - Am)]$$

Donde:  $BAM_{CC}$  = biomasa acumulada de madera con corteza (kg),  $DN$  = diámetro normal con corteza (cm),  $AT$  = altura total (m),  $d$  = diámetro de la sección de fuste con corteza (cm), y  $Am$  = altura de la sección de fuste (m).

La primera parte de la ecuación que incluye a  $DN$  y  $AT$ , determina la biomasa de madera en el fuste por árbol, cuyos parámetros de regresión se diferenciaron para biomasa sin aclareo y para aclareo ( $\beta_0 = \beta_{00} + \beta_{0A} \times Aclareo$ ). La segunda parte de la ecuación describe la acumulación de biomasa de madera con base en el ahusamiento del fuste, donde igualmente se diferenciaron los parámetros de regresión en biomasa, sin aclareo y con aclareo ( $\alpha_0 = \alpha_{00} + \alpha_{0A} \times Aclareo$ ). Las

ecuaciones de regresión ajustadas resultantes para la condición aclareada y el testigo fueron, respectivamente (Anexo 4.1):

$$BAM_{CC} = 0.0106 \times (DN^2 \times AT)^{1.026} - [0.014 \times d^2 \times (AT - Am)]$$

$$BAM_{CC} = (0.0106 - 0.00071) \times (DN^2 \times AT)^{1.026} - [(0.014 - 0.00074) \times d^2 \times (AT - Am)]$$

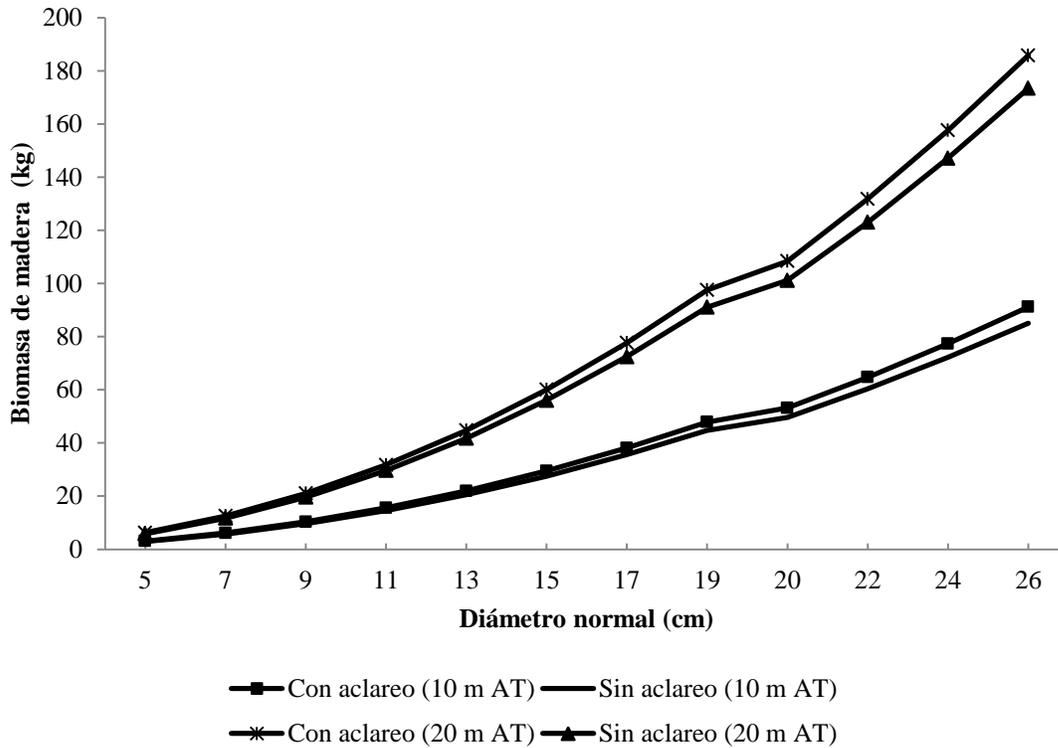


Figura 4.1 Biomasa de madera acumulada por árbol estimada en función al diámetro normal a una altura base de 10 y 20 m en *P. patula* bajo aclareo y en un testigo sin aclareo, en Ixtlán, Oaxaca.

El modelo ajustado presentó un  $R^2$ -aj de 0.96 y un error estándar de 6.5. Todos los parámetros estimados tuvieron significancia estadística ( $P < 0.006$ ), con excepción de  $\alpha_{0A}$  ( $P = 0.34$ ), lo cual implica que las intensidades de aclareo aplicadas a *Pinus patula* no han afectado la acumulación de biomasa de madera en el fuste, pero sí afectaron la biomasa por árbol ( $\beta_{0A}$ ,  $P < 0.0069$ ). Esta condición se muestra en la Figura 4.1 (Anexo 4.2), donde para alturas base (utilizadas sólo de

referencia) de 10 y 20 m, la biomasa por árbol de los tratamientos de aclareo fue superior a la del testigo.

Un árbol de parcela aclareada tuvo un promedio de 69.8 kg de biomasa en madera vs. 35.3 kg que formó un árbol de parcela sin aclareo; sin embargo, la biomasa acumulada entre ambas condiciones dieron valores similares, de 119.1 y 128 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Según Oliver y Larson (1996) y Peri *et al.* (2010), la asignación de biomasa al tallo tiene menor prioridad que el conjunto follaje-ramas-raíces finas. Esto es lo que pudo haber ocurrido en *P. patula*, ya que en forma individual los árboles de parcelas aclareadas tuvieron más biomasa en madera que los del testigo sin aclareo, pero como éstos están a mayor densidad de plantación y con mayor competencia por recursos del suelo y subsuelo las prioridades de partición cambian, de modo que la biomasa total acumulada se mantiene sin cambio (Burkes *et al.*, 2003).

Según Návar *et al.* (2002 y 2004), una característica deseable de las ecuaciones alométricas de regresión de los componentes del árbol es que la suma de las predicciones para los componentes sea igual a la predicción para el total de los árboles. En este caso, al emplear modelos que predicen la biomasa total o de una sección del fuste o copa, se está forzando la aditividad de las funciones de biomasa mediante los coeficientes de regresión para estimar el componente total, con regresiones lineales generalizadas (método SUR).

De acuerdo con Monroy y Návar (2004), este tipo de regresiones, comparada con los procedimientos de regresión lineal simple, para los parámetros por lo general obtienen mayores valores de t (para BAM<sub>CC</sub>, entre -2.7 y 96.1), menor varianza y menor efecto de heterocedasticidad, una característica implícita en las variables que estiman la biomasa de recursos forestales (Acosta *et al.*, 2003). De esta manera, el procedimiento SUR aquí empleado es más eficiente, en particular para el modelo de BAM<sub>CC</sub> porque aumentó la precisión de los parámetros al utilizar de manera simultánea el producto del número de árboles por el número de compartimentos en la estimación de la varianza total (*i. e.*, 90 datos: 30 árboles × 3 secciones (madera, follaje y ramas)).

#### **4.5.2 Biomasa acumulada en acículas (BAA)**

La biomasa foliar por árbol presentó su valor más alto en la Parcela 1 (5.4 kg ± 2.9), la de menor densidad residual y sometida a alta intensidad de aclareo (65.3 %); el testigo, con la mayor densidad residual (100 %), mostró la menor cantidad de biomasa (1.5 kg ± 0.9). La biomasa por

hectárea fue mayor en la Parcela 3 (8.0 t), cuya intensidad de aclareo fue la mayor (68.7 %), mientras que la menor cantidad de biomasa por hectárea se obtuvo en la Parcela 4 (4.1 t). La Parcela 2 con la menor intensidad de aclareo (39.7 %) tuvo 5.1 t ha<sup>-1</sup>, sólo un poco abajo del testigo (Cuadro 4.1).

El resultado de la Parcela 4 es un tanto extraño, ya que los árboles tuvieron la biomasa foliar más baja a pesar de haber tenido una alta intensidad de aclareo (64.0 %). Esto se atribuye al corto tiempo de respuesta al aclareo (un año) y a que no fue intervenida en 2006. En *P. patula* de bosques naturales se encontró que el área foliar específica disminuye al aumentar el diámetro del árbol (lo que significaría un aumento de biomasa) y la edad del follaje e incrementa en la parte inferior de la copa (Cano *et al.*, 1996). En contraste, en la plantación de *P. patula* se encontraron resultados opuestos ya que las parcelas con mayor intensidad de aclareo tuvieron los árboles con mayor diámetro y mayor biomasa en acículas; esto podría deberse a que contaron con mayor tiempo de respuesta al aclareo, pues según Hoover y Stout (2007) los efectos del aclareo pueden ser significativos hasta largo plazo.

La biomasa foliar acumulada se evaluó con el modelo de regresión, bajo el supuesto que el área de conducción de árboles de parcelas aclareadas y del testigo es proporcional a la biomasa foliar (Medhurst y Beadle, 2002):

$$BAA = \beta_0 \times DN^2 \times [e^{(-\beta_1 \times LCV)}]^{\beta_2}$$

Donde: *BAA* = biomasa acumulada de acículas (kg), *LCV* = longitud de copa viva (m), *DN* ya definido, y  $\beta_{0,1,2}$  = parámetros de regresión estimados.

Para analizar el efecto del aclareo sobre la biomasa foliar, la pendiente de la ecuación se diferenció en biomasa sin aclareo y en biomasa con aclareo ( $\beta_1 = \beta_{11} + \beta_{1A} \times \text{Aclareo}$ , y  $\beta_2 = \beta_{22} + \beta_{2A} \times \text{Aclareo}$ ). La ecuación ajustada para estimar la biomasa foliar en condición de aclareo y en el testigo, presentó un R<sup>2</sup>-aj de 0.89 y un error estándar de 0.69, y fueron (Anexo 4.3):

$$BAA = 0.0226 \times DN^2 \times [e^{(-0.186 \times LCV)}]^{2.2763}$$

$$BAA = 0.0226 \times DN^2 \times [e^{(-0.186 + 0.1822 \times LCV)}]^{(2.2763 - 1.5106)}$$

Todos los parámetros de regresión mostraron significancia estadística ( $P < 0.0003$ ), lo que indica que los aclareos modificaron las tasas de acumulación de biomasa foliar. La parte inferior de la copa de árboles sin aclareo tuvo más biomasa foliar que los árboles aclareados; sin embargo, en la parte media de la copa (4 y 6 m arriba del inicio de copa) la biomasa foliar de árboles aclareados fue de 8 a 9 veces mayor que la de árboles sin aclareo; estas diferencias entre ambas condiciones se mantienen en la punta de la copa, aunque la superioridad se redujo a 4 veces (Figura 4.2).

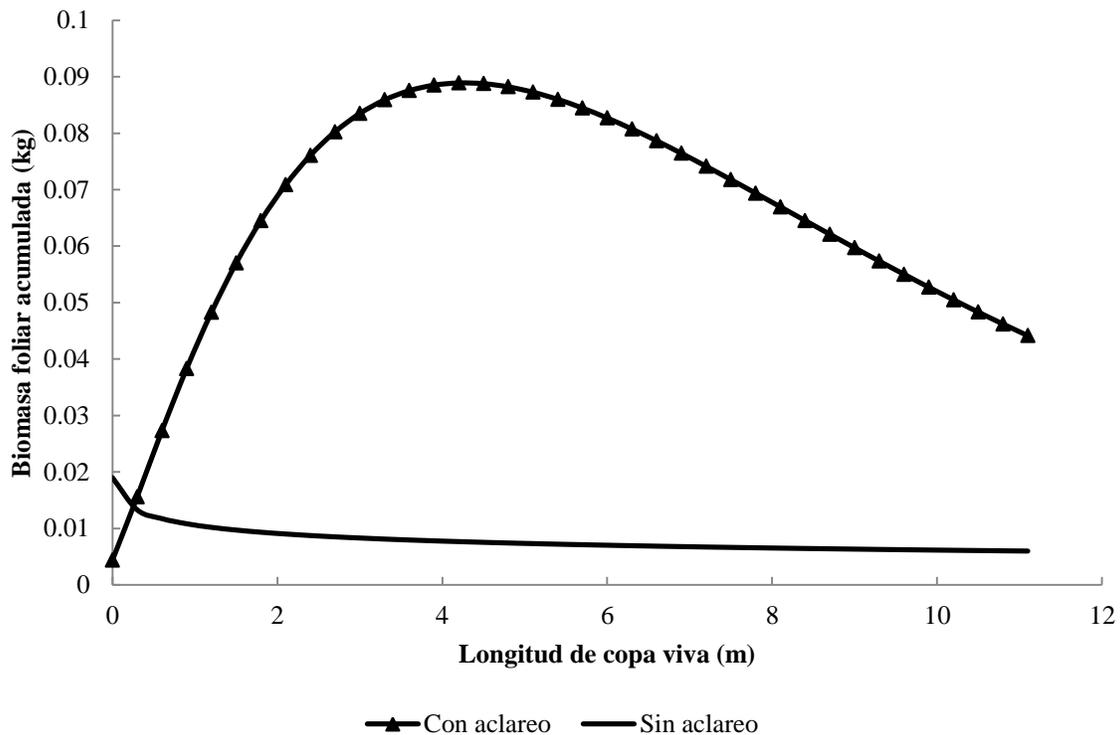


Figura 4.2 Estimación de biomasa acumulada en acículas, en la copa viva de *P. patula*, para las parcelas aclareadas y el testigo sin aclarear, en Ixtlán, Oaxaca.

En una plantación de siete años de *Conocarpus erectus* se encontraron resultados similares, pues a dos años de aplicadas las intensidades de aclareo para remover hasta 67 % de las existencias, se incrementó la proporción de follaje con respecto a la biomasa total aérea y mejoró el crecimiento de la copa (Abohassan *et al.*, 2010). En unidades porcentuales con respecto a la biomasa aérea total, en *P. patula* se observó, a nivel árbol y por hectárea, que la fracción de biomasa foliar en las parcelas aclareadas fue de 4.4 % mientras que en el testigo fue de 3.7 %.

Los árboles de parcelas aclareadas tuvieron en promedio 3.5 kg de biomasa foliar vs. 1.5 kg del testigo, diferencia que en acumulación de biomasa equivale a 6.0 vs. 5.5 t ha<sup>-1</sup>. La cinética de acumulación de biomasa foliar en el fuste muestra a la Parcela 6 (testigo) con valores inferiores que las parcelas bajo aclareo, y que las de mayor acumulación de biomasa foliar corresponden a las intensidades de aclareo mayores (P3 y P1) (Figura 4.3).

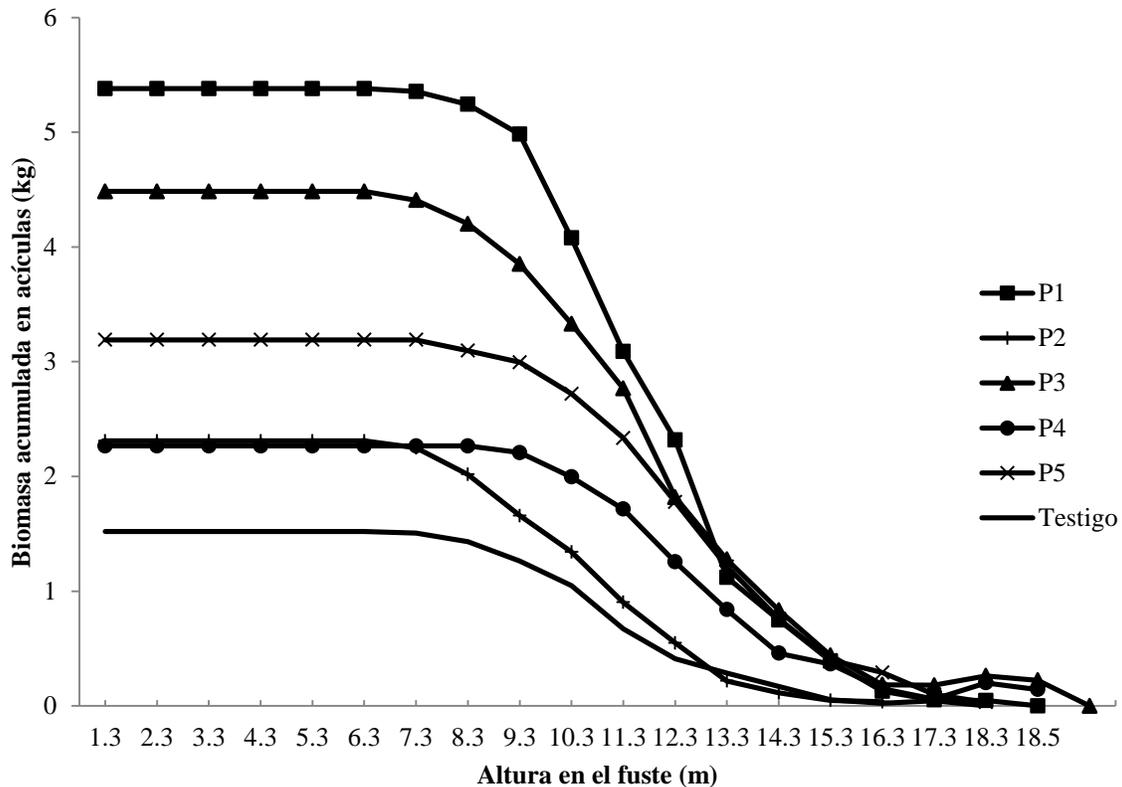


Figura 4.3 Promedio de biomasa foliar acumulada a diferentes alturas del fuste de *P. patula*, en parcelas aclareadas (P1 a P5) y en el testigo sin aclarear, en Ixtlán, Oaxaca.

Según Dey *et al.* (1996) cuando se producen heridas a los árboles o se reduce la densidad inicial se pueden producir efectos muy marcados sobre la disponibilidad de fotosintatos, lo que puede afectar la dinámica de crecimiento del follaje y la asignación de recursos a los otros órganos. Situación que ocurre en las parcelas bajo aclareo de este estudio, ya que además de incrementar el crecimiento del fuste, el aclareo tiende a expandir la copa de los árboles generando una mayor cantidad de follaje (Chan *et al.*, 2006).

### 4.5.3 Biomasa acumulada en ramas (BAR)

A nivel árbol, las parcelas con mayor intensidad de aclareo (P3 y P1) generaron la mayor cantidad de biomasa en ramas con  $9.1 \pm 4.6$  y  $10.8 \pm 6.4$  kg/árbol, respectivamente. El testigo mostró el valor más bajo de este componente con  $2.9 \pm 2.5$  kg/árbol. Por hectárea, la mayor cantidad de biomasa en ramas ( $16.1 \text{ t ha}^{-1}$ , Parcela 3) correspondió a la mayor intensidad de aclareo (68.7 %), y la menor a la Parcela 4 ( $7.4 \text{ t ha}^{-1}$ ) con aclareo de 64.0 %. La biomasa en ramas para árboles sin aclareo fue de  $10.6 \text{ t ha}^{-1}$ . Aunque a nivel árbol la biomasa en ramas de las parcelas aclareadas mostró un valor de  $6.7$  kg/árbol vs.  $2.9$  kg/árbol del testigo, los valores por hectárea fueron similares, con  $11.3$  y  $10.6 \text{ t ha}^{-1}$  (Cuadro 4.1).

Según Niinemets y Lukjanova (2003), los incrementos en radiación incidente sobre las ramas debidas al aclareo están asociados con incrementos en la longitud del fuste y con la extensión de la ramas, tal como se observó aquí en la biomasa de ramas por árbol de *P. patula* en la condición de aclareo. Los resultados indican que en altas calidades de estación como la de este estudio, los aclareos no afectan la masa neta de carbono ganada por ha, pero sugieren que con aclareo se concentra más carbono en fustes más grandes de los cuales se pueden elaborar productos maderables útiles en construcción, incrementando el tiempo medio de residencia del carbono.

Para estimar *BAR* se utilizó el modelo de regresión propuesto por Fassola *et al.* (2008), y modificado bajo el supuesto teórico de conducción que el área de tejido vivo conductivo es proporcional a la biomasa de ramas:

$$BAR = \beta_0 \times DCV^2 \times [e^{(-\beta_1 \times LCV)}] \beta_2$$

Donde: *BAR* = biomasa acumulada en ramas (kg), *DCV* = diámetro de copa viva (m), *LCV* = longitud de copa viva (m), *e* = logaritmo neperiano = 2.7172, y  $\beta_{0,1,2}$  = parámetros de regresión estimados.

De la misma forma que se hizo para los componentes de biomasa anteriores, el efecto del aclareo sobre la biomasa en ramas se analizó separando la pendiente de la ecuación ( $\beta_2 = \beta_{22} + \beta_{2A} \times \text{Aclareo}$ ) en biomasa sin aclareo y biomasa aclareada. Las ecuaciones que estiman la *BAR* en condición de aclareo y en testigo tuvieron un  $R^2$ -aj de 0.90 y un error estándar de 1.3, y fueron (Anexo 4.4):

$$BAR = 0.0531 \times DCV^2 \times [e^{(-0.576 \times LCV)}]^{20.1878}$$

$$BAR = 0.0531 \times DCV^2 \times [e^{(-0.576 \times LCV)}]^{(20.1878 - 1.778)}$$

Todos los parámetros mostraron significancia estadística ( $P < 0.0001$ ), excepto  $\beta_{2A}$  ( $P = 0.57$ ), lo que indica que las intensidades aplicadas de aclareo no afectaron la acumulación de biomasa en ramas de *P. patula*. En promedio, el inicio de copa viva se presentó a 7.6 m de altura del fuste, punto cercano al cual las curvas de acumulación de biomasa en ramas cambian de inclinación y donde se empieza a reducir la distancia entre las cinéticas de parcelas aclareadas y el testigo (Figura 4.4).

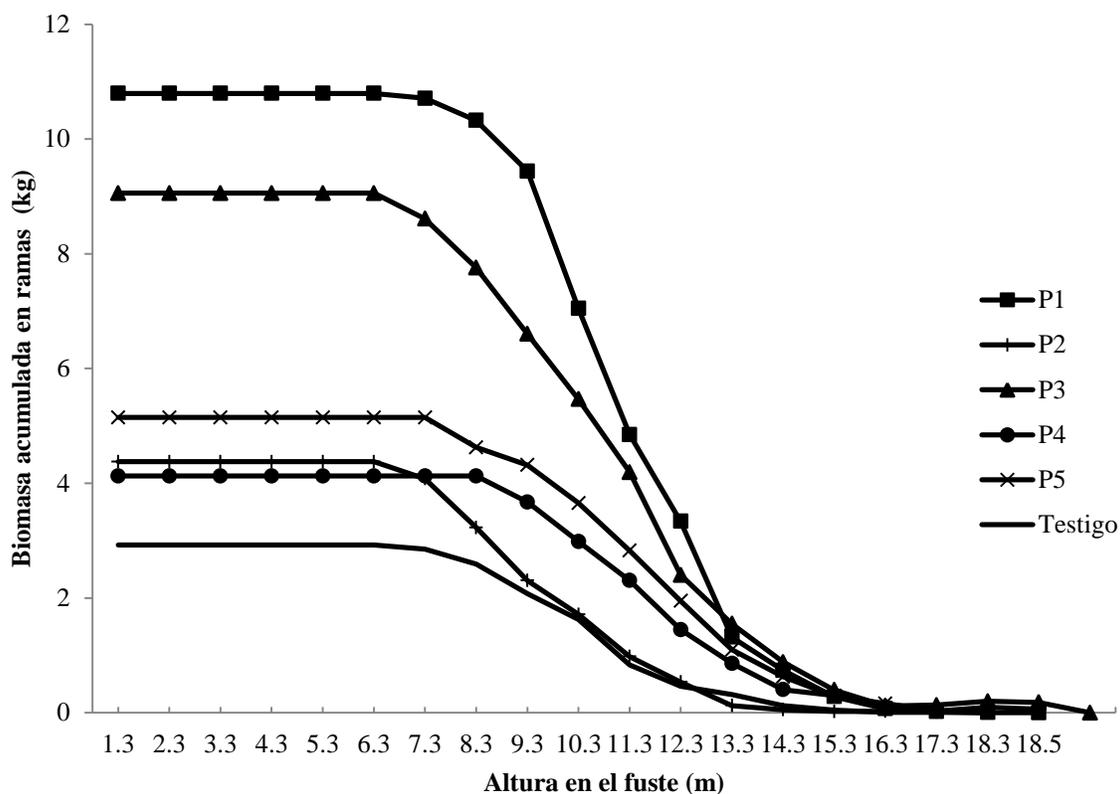


Figura 4.4 Promedio de acumulación de biomasa en ramas de *P. patula* a diferentes alturas del fuste, en parcelas sometidas a aclareo (P1 a P5) y en el testigo sin aclarear, en Ixtlán, Oaxaca.

Según Alves y Santos (2002), la forma de la copa de los árboles dominantes (los de mayor altura en el rodal) es más variable que la de árboles suprimidos (de menor altura o rezagados), ya que los primeros pueden ser más flexibles en la distribución de la biomasa entre las estructuras del árbol. Esta condición no sucedió en la plantación bajo estudio, la cual presentó características homogéneas debido a la eliminación periódica de árboles suprimidos y de ramas inferiores, lo cual evitó una clara diferenciación de copas y de biomasa en ramas.

#### **4.5.4 Biomasa aérea total (BAT)**

Las Parcelas 1 y 3 tuvieron la BAT por árbol (114.2 y 101.5 kg, respectivamente), y corresponden con las que recibieron las mayores intensidades de aclareo, y por ende registraron la menor densidad residual. El valor mínimo fue para el testigo (39.7 kg/árbol) (Cuadro 4.1).

Por unidad de superficie, la BAT máxima se encontró en la Parcela 3 (180.2 t ha<sup>-1</sup>), única que produjo 25 % más de biomasa que el testigo, y así rebasa la capacidad potencial del sitio en un periodo de respuesta al aclareo de 5 años. La Parcela 1, con el mismo tiempo de respuesta, se ubicó cerca de alcanzar el nivel del testigo (a 1 %), y además mostró la mayor variabilidad (D. E. = 61.4) por incluir en la muestra árboles de todas las categorías de copa. Ambos casos tuvieron patrones similares de corta, aclareo con intensidad alta en 2004, baja en 2006 y media en 2008. Un comportamiento similar se encontró en una plantación de *Eucalyptus nitens* de 15 años, en la que mediante aclareos aplicados a los seis años se incrementó el promedio individual por árbol en tallo, copa y biomasa total aérea, pero se redujo en 31 % el promedio de BAT (Muñoz *et al.*, 2008).

Las Parcelas (4 y 2), que no fueron intervenidas en 2006 y tuvieron intensidades de aclareo altas en 2004 y bajas en 2008 (Cuadro 3.1), se ubicaron a 19.4 y 23.1 %, respectivamente, de alcanzar el potencial de crecimiento del sitio, con el mismo tiempo de respuesta. La Parcela 5 que sólo fue aclareada fuertemente (58 % de densidad extraída) en 2008, estuvo a 8.6 % de alcanzar la biomasa del testigo, con un tiempo de respuesta al aclareo de un año.

La recuperación del potencial del sitio depende de factores como las densidades inicial y residual, calidad de sitio, especie, edad, aclareos y otros tratamientos silvícolas, etc., definidos por Zasada *et al.* (2009) quienes en un estudio determinaron que al corto plazo las bajas intensidades de aclareo con mayores tiempos de respuesta favorecen la acumulación de biomasa,

pero las altas intensidades de aclareo no influyeron en el incremento de volumen ni en la habilidad para absorber bióxido de carbono, como ocurriría a largo plazo.

#### 4.6 CONCLUSIONES

Las intensidades de aclareo aplicadas a *Pinus patula* en forma bianual desde 2004, mediante extracciones de 39.7 a 68.7 % (entre 32.2 y 107.3 m<sup>3</sup>) de la densidad inicial de plantación, afectaron la cantidad y distribución de biomasa foliar. La mayor cantidad de este componente (5.4 kg/árbol y 8.0 t ha<sup>-1</sup>) se generó con altas intensidades de aclareo y, en consecuencia, con bajas densidades residuales. Así, los árboles bajo aclareo tenían una biomasa foliar de 3.5 kg/árbol vs. 1.5 kg del testigo.

Los aclareos también influyeron en la cantidad de biomasa de madera con corteza en el fuste a nivel árbol, pues las parcelas aclareadas y el testigo acumularon 98 y 35.3 kg/árbol, respectivamente. Sin embargo, la biomasa contenida por hectárea fue similar entre ambas condiciones debido a la excesiva densidad residual del testigo, lo que permite deducir que sólo la intensidad de aclareo de 68.7 % logró recuperar el potencial del sitio en un periodo de 5 años.

Aunque la biomasa en ramas alcanzó un valor de 6.7 kg/árbol para la condición de aclareo y de 2.9 kg/árbol para el testigo sin aclarear, por hectárea la biomasa total de ramas y su distribución en el fuste fueron similares en ambas condiciones. En plantaciones de *P. patula* sería entonces recomendable aplicar aclareos con intensidades iguales o superiores a 68.7 % respecto a la densidad inicial de plantación, lo cual permitiría obtener un mayor volumen comercial de madera por un aumento significativo en el crecimiento en diámetro de los árboles residuales. Los resultados indican que en altas calidades de estación como la de este estudio, los aclareos no afectan la masa neta de carbono ganada por ha, pero sugieren que con aclareo se concentra más carbono en fustes más grandes de los cuales se pueden elaborar productos maderables útiles en construcción, incrementando el tiempo medio de residencia del carbono.

Bajo las densidades y características del sitio de crecimiento, *Pinus patula* requiere de un periodo de respuesta al aclareo de 5 años para recuperar el potencial de crecimiento del sitio, con intensidades de aclareo iguales o superiores a 67 % de la densidad inicial de plantación, para así garantizar que la productividad en biomasa total aérea de la condición aclareada al menos sea igual que el testigo.

#### 4.7 LITERATURA CITADA

- Abohassan, A., S. F. A. Tewfik and A. O. El Wakeel. 2010. Effect of thinning on the above ground biomass of (*Conocarpus erectus* L.) trees in the western region of Saudi Arabia. JKAU: Meteorology, Environment Arid Land & Agriculture Science 21: 3-17.
- Acosta M., M., F. Carrillo A. y O. S. Magaña T. 2003. Técnica de la silueta para estimar área foliar y biomasa aérea en especies forestales. Ciencia Forestal en México 28: 45-56.
- Alves, L. V. and F. A. M. Santos. 2002. Tree allometry and crown shape of four tree species in Atlantic Rain Forest, south-east Brazil. Journal of Tropical Ecology 18: 245-260.
- Antonio, N., M. Tomé, J. Tomé, P. Soares and L. Fontes. 2007. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. Canadian Journal of Forest Research 37: 895-906.
- Bailey, R. L. 1995. Upper-stem volumes from stem-analysis data: an overlapping bolt method. Canadian Journal of Forest Research 25: 170-173.
- Blevins, D. P., C. E. Prescott, H. L. Allen and T. A. Newsome. 2005. The effects of nutrition and density on growth, foliage biomass, and growth efficiency of high-density fire-origin lodgepole pine in central British Columbia. Canadian Journal of Forest Research 35: 2851-2859.
- Burkes, E. C., R. E. Will, G. A. Barron-Gafford, R. O. Teskey and B. Shiver. 2003. Biomass partitioning and growth efficiency of intensive managed *Pinus taeda* and *P. elliottii* stands at different planting densities. Forest Science 49: 224-234.
- Cano M., E. E., A. Velázquez M., J. J. Vargas H., C. Rodríguez F. y A. M. Fierros G. 1996. Área foliar específica en *Pinus patula*: efecto del tamaño del árbol, edad del follaje y posición en la copa. Agrociencia 30: 117-122.
- Castellanos, J. F., A. Velázquez M., J. Vargas H., C. Rodríguez F. y A. M. Fierros G. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*: efecto del tamaño del árbol, edad del follaje y posición en la copa. Agrociencia 30: 123-128.
- Chan, S. S., D. J. Larson, K. G. Maas-Hebner, W. H. Emmingham, S. R. Johnston and D. A. Mikowski. 2006. Overstory and understory development in thinned and underplanted Oregon coast range Douglas-fir stands. Canadian Journal of Forest Research 36: 2696-2712.

- Corbett, P. S. 2001. Carbon sequestration through rubber (*Hevea*) production on grassland in Papua New Guinea. *Journal of Rubber Research* 4: 222-254.
- Costas, R., P. McDonagh, E. Weber, P. Irschick y J. Palavecino. 2004. Efectos de la densidad de plantación y tratamiento de poda sobre la producción de *Pinus taeda* L. a los 6 años de edad. *Revista Forestal Venezolana* 48: 117-125.
- De Los Santos-Posadas, H. M. 1998. Estimation of individual branch and whole tree leaf biomass from loblolly pine. Master of Science, University of Georgia. Athens, Georgia. 86 p.
- Dey, S. K., D. Chaudhuri, K. G. Vinod, J. Pothan and R. M. Sethuraj. 1996. Estimation of biomass in *Hevea* clones by regression methods: relation of girth and biomass for mature trees of clone RRIM 600. *Indian Journal of Natural Rubber Research* 9: 40-43.
- Fassola, H., E. Crechi, S. Barth, A. Keller, M. Pinazo, R. Martiarena, A. Von W. e I. Figueredo. 2008. Relación entre la biomasa aérea y la sección transversal en la base de copa viva de *Pinus taeda* L. en el norte de la provincia de Misiones, Argentina. *In: XIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales*. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM-EEA Montecarlo, INTA. 5-7 junio de 2008, El Dorado, Misiones, Argentina. s/p.
- Graciano, C., J. J. Guiamet and J. F. Goya. 2006. Fertilization and water stress interactions in young *Eucalyptus grandis* plants. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 1028-1035.
- Hoover, C. and S. Stout. 2007. The carbon consequences of thinning techniques: stand structure makes a difference. *Journal of Forestry* 105: 266-271.
- Hummel, S. and R. Hummel. 2004. Five-year thinning response of an overgrown Douglas-fir Christmas tree plantation. *Western Journal of Applied Forestry* 19: 171-175.
- Jaakkola, T., H. Mäkinen M. P. Sarén and P. Saranpää. 2005. Does thinning affect the tracheid dimension of Norway spruce? *Canadian Journal of Forest Research* 35: 2685-2698.
- Leak, W. B. 2007. Thinning northern hardwoods in New England by dominant-tree removal-early results. *North Journal of Applied Forestry* 24: 312-313.
- Medhurst, J. L. and C. L. Beadle. 2002. Sapwood hydraulic conductivity and leaf area-sapwood area relationships following thinning of a *Eucalyptus nitens* plantation. *Plant, Cell and Environment* 25: 1011-1019.
- Monroy R., N. y J. J. Nívar C. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques* 10: 29-43.

- Montagu, K. D., D. E. Kearney and R. G. B. Smith. 2003. The biology and silviculture of pruning planted eucalypts for clear wood production-a review. *Forest Ecology and Management* 179: 1-13.
- Muñoz, F., R. Rubilar, M. Espinosa, J. Cancino, J. Toro and M. Herrera. 2008. The effect of pruning and thinning on above ground aerial biomass of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden. *Forest Ecology and Management* 255: 365-373.
- Návar C., J. J., J. Nájera, E. Méndez and V. Dale. 2002. Estimating stand biomass in the Tamaulipan thornscrub of northeastern México. *Annals of Forest Science* 59: 813-821.
- Návar C., J. J., N. González B., J. J. Graciano L., V. Dale and B. Parresol. 2004. Additive biomass equations for pine species of forest plantations of Durango, México. *Madera y Bosques* 10: 17-28.
- Niinemets, Ü. and A. Lukjanova. 2003. Total foliar area and average leaf age may be more strongly associated with branching frequency than with leaf longevity in temperate conifers. *New Phytologist* 158: 75-89.
- Oliver C. D. and B. C. Larson. 1996. *Forest stand dynamic*. Biol. Resour. Manage. Ser. Wiley, New York, USA. 520 p.
- Pérez, C. L. D. and M. Kanninen. 2003. Above ground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science* 15: 199-213.
- Peri, P. L., V. Gargaglione, G. Martínez P. and M. V. Lencinas. 2010. Carbon accumulation along a stand development sequence of *Nothofagus antarctica* forests across a gradient in site quality in southern Patagonia. *Forest Ecology and Management* 260: 229-237.
- Reed, D. D. and M. Tomé. 1998. Total aboveground biomass and net dry matter accumulation on plant component in young *Eucalyptus globulus* in response to irrigation. *Forest Ecology and Management* 103: 21-32.
- SAS Institute Inc. 2004. *SAS/STAT 9.1 User's guide*. SAS Institute, Cary, NC. USA. 4979 p.
- Wang, J. R., C. D. B. Hawkins and T. Letchford. 1998. Relative growth rate and biomass allocation of paper birch (*Betula papyrifera*) populations under different soils moisture and nutrient regimes. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 44-55.
- Youngblood, A. 2010. Thinning and burning in dry coniferous forests of the western United States: effectiveness in altering diameter distribution. *Forest Science* 56: 46-60.

- Zasada, M. K. Bronisz, S. Bijak, A. Dudek, A. Bruchvald, R. Wojtan, R. Tomusiak, A. Bronisz, L. Wróblewski and K. Michalak. 2009. Effect of the cutting age and thinning intensity on biomass and carbon sequestration- The Gubin Forest District case study. *Folia Forestalia Polonica* 51: 138-144.
- Zhang, S. Y., G. Chauret, D. E. Swift and I. Duchesne. 2006. Effects of precommercial thinning on tree growth and lumber quality in a jack pine stand in New Brunswick, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 945-953.

## CAPÍTULO V DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

El establecimiento de plantaciones forestales de rápido crecimiento requiere del conocimiento del efecto de tratamientos silvícolas sobre la productividad de la plantación. Los aclareos realizados correctamente en tiempo y forma, pueden ser una herramienta valiosa para aumentar la productividad primaria neta y la productividad comercial de las plantaciones forestales en el país.

Dada la importancia comercial y ambiental de la especie en estudio y de la necesidad de conocer el comportamiento de la misma ante la aplicación de tratamientos silvícolas, el estudio realizado en la plantación de *Pinus patula* establecida en 1995 en terrenos de uso comunal en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, en el que se evaluó el efecto sobre el crecimiento de aclareos aplicados en forma bianual desde 2004, permite concluir de manera general lo siguiente:

En *P. patula* de 14 años sin tratamientos de aclareo, la biomasa aérea se distribuyó en 92.9, 4.7 y 2.4 % para madera, ramas y follaje, respectivamente. Pero al disminuir la densidad de los árboles mediante aclareos para reducir la competencia intraespecífica, se logró incrementar el grosor del tallo (de 1.08 a 2.04 cm año<sup>-1</sup>) y reducir el nivel de ramificación de los árboles, y por ende se aumentó la biomasa maderable, lo que se debió a cambios en la partición de la biomasa.

Además, los cambios en la partición de biomasa se estimaron mediante modelos alométricos basados en variables como área de la sección de fuste y de rama, área de tejido vivo conductivo (albura), altura de rama y sección de la copa, porque son más susceptibles a las variaciones de sitio, clima y manejo de la plantación. Así se obtuvieron ecuaciones específicas para estimar la biomasa foliar del sitio de plantación mediante variables de fácil medición (diámetro, longitud y altura de rama); además, con este tipo de variables se generó una estimación media de follaje de 3.2 kg árbol<sup>-1</sup>, que permitió obtener factores de expansión de biomasa con base en datos de inventario, como diámetro y altura de árbol.

Debido a que las condiciones ambientales, de estructura y composición son homogéneas en el sitio de plantación de *P. patula*, las ecuaciones generadas para la biomasa aérea total, así como las ecuaciones específicas para cada componente, generan estimaciones de biomasa homogéneas para una misma clase de datos de un inventario en dicha plantación. En el caso que dichos modelos se aplicaran en otras condiciones de ambiente y de manejo silvícola o heterogéneas,

deberá tenerse cuidado en el método a utilizar para la estimación de parámetros, en la selección aleatoria de las unidades, en el diseño de muestreo, y en la variación de dichas unidades, para no confundir estas variaciones con las resultantes del uso de diferentes ecuaciones de regresión.

Para evaluar la eficiencia de crecimiento (*EC*) y poder detectar diferencias del aclareo en área foliar proyectada (*AF*) de esta especie, puede utilizarse el área de albura de la sección transversal a 30 cm del suelo (tocón) o al inicio de copa viva para estimar *AF*, sin detrimento estadístico de la relación lineal. Sin embargo, cuando se desee estudiar el efecto específico del aclareo en *AF*, debe emplearse el área de albura en la sección transversal al inicio de copa viva, ya que en este punto existe mayor proporción de albura y es más sensible a las modificaciones en la copa; además, porque el aclareo tiende a incrementar la proporción de tejido conductivo en albura, lo que necesariamente modificará la cantidad de *AF* que puede ser abastecida por unidad de área de albura.

La *EC*, tanto con base en volumen, biomasa de madera e incremento medio anual en volumen, incrementó con la intensidad y edad de aclareo, al producir las parcelas bajo aclareo 12.7 dm<sup>3</sup> de madera por metro cuadrado de *AF*, vs. 11 dm<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> de árboles en parcela no aclareada. Esta eficiencia disminuyó con el aumento en tamaño (en *AF*, biomasa o volumen de madera) y edad de los árboles.

Las intensidades de aclareo entre 40 y 69 % de la densidad inicial de plantación aplicadas a *P. patula* aumentaron el crecimiento de diámetro en 75 % y en 52 % para altura, con respecto al testigo. Durante la fase de aclareo el crecimiento en área basal y volumen de los árboles se redujo en 92 y 129 % respectivamente, pérdidas que fueron compensadas en el crecimiento medio anual de la plantación, donde a nivel de hectárea dichas variables se mantuvieron sin cambios entre árboles con y sin aclareo. Por ello, los aclareos realizados sólo se justifican para obtener productos de mejor calidad maderable como aserrío y triplay, donde se requiere de mayor volumen comercial.

Finalmente, los aclareos aplicados afectaron significativamente la cantidad y distribución de biomasa foliar, y la cantidad de biomasa de madera con corteza en el fuste, a nivel árbol. Pero no afectaron la distribución de biomasa maderable en el fuste, ni la cantidad y distribución de biomasa en ramas. Esto permite deducir que bajo las condiciones actuales de crecimiento, *P. patula* requiere de aclareos iguales o superiores a 67 % de su densidad inicial de plantación, para recuperar el potencial de crecimiento del sitio en un periodo de respuesta al aclareo de 5 años.

## ANEXOS

Anexo 2.1 Parámetros estimados para los modelos no lineales de estimación de biomasa foliar por rama.

### MODELO 1

The MODEL Procedure  
Nonlinear OLS Summary of Residual Errors

Equation	DF Model	DF Error	SSE	MSE	Root MSE	R-Square	Adj R-Sq
BAR	4	310	275027	887.2	29.7856	0.8194	0.8176

Nonlinear OLS Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Approx Std Err	t Value	Approx Pr >  t
C0	0.102676	0.0434	2.37	0.0186
C1	0.72596	0.0539	13.48	<.0001
C2	2.020948	0.1562	12.94	<.0001
C3	0.988288	0.1251	7.9	<.0001

Number of Observations    Statistics for System

Used	314	Objective	875.8830
Missing	0	Objective*N	275027

### MODELO 2

The MODEL Procedure  
Nonlinear OLS Summary of Residual Errors

Equation	DF Model	DF Error	SSE	MSE	Root MSE	R-Square	Adj R-Sq
BAR	2	312	351184	1125.6	33.5498	0.7694	0.7686

Nonlinear OLS Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Approx Std Err	t Value	Approx Pr >  t
C0	1.225471	0.1866	6.57	<.0001
C1	1.080308	0.0334	32.34	<.0001

Number of observations    Statistics for System

Used	314	Objective	1118
Missing	0	Objective*N	351184

### MODELO 3

#### The MODEL Procedure

##### Nonlinear OLS Summary of Residual Errors

Equation	DF Model	DF Error	SSE	MSE	Root MSE	R-Square	Adj R-Sq
BAR	4	310	288459	930.5	30.5043	0.8106	0.8087

##### Nonlinear OLS Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Approx Std Err	t Value	Approx Pr >  t
C1	1.942714	0.0696	27.89	<.0001
C2	0.827993	0.1701	4.87	<.0001
C3	-0.69942	1.2671	-0.55	0.5813
C4	1.993382	0.2144	9.3	<.0001

##### Number of Observations    Statistics for System

Used	314	Objective	918.6600
Missing	0	Objective*N	288459

### MODELO 4

#### The MODEL Procedure

##### Nonlinear OLS Summary of Residual Errors

Equation	DF Model	DF Error	SSE	MSE	Root MSE	R-Square	Adj R-Sq
BAR	3	311	288649	928.1	30.4652	0.8104	0.8092

##### Nonlinear OLS Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Approx Std Err	t Value	Approx Pr >  t
C1	1.938878	0.07	27.71	<.0001
C2	1.889537	0.0714	26.47	<.0001
C3	0.916783	0.1042	8.8	<.0001

##### Number of Observations    Statistics for System

Used	314	Objective	919.2628
Missing	0	Objective*N	288649

Anexo 2.2 Parámetros estimados para los modelos lineales de estimación de biomasa foliar por rama.

**MODELO 5**

The GLM Procedure

Dependent Variable: BAR

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	1067042.203	1067042.203	730.6	<.0001
Error	312	455674.896	1460.496		
Corrected Total	313	1522717.099			

R-Square    Coeff Var    Root MSE    BAR Mean  
 0.700749    63.67595    38.21644    60.01707

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr>F
ABR	1	1067042.203	1067042.203	730.6	<.0001
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr>F
ABR	1	1067042.203	1067042.203	730.6	<.0001

Parameter	Estimate	Standard Error	t Value	Pr >  t
Intercept	4.35581728	2.98191864	1.46	0.1451
ABR	16.58073027	0.61342732	27.03	<.0001

**MODELO 6**

R-Square    Coeff Var    Root MSE    BAR Mean  
 0.735258    60.08496    36.06123    60.01707

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ABR	1	1067042.203	1067042.203	820.54	<.0001
ABR*SECCION	2	52546.997	26273.499	20.2	<.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ABR	1	340109.7588	340109.7588	261.54	<.0001
ABR*SECCION	2	52546.9971	26273.4985	20.2	<.0001

Parameter	Estimate		Standard Error	t Value	Pr >  t
Intercept	3.80950926		3.25019962	1.17	0.2421
ABR	14.79971853	B	2.32377169	6.37	<.0001
ABR*SECCION 1	-0.32114935	B	2.1917543	-0.15	0.8836
ABR*SECCION 2	5.151103	B	2.16628192	2.38	0.018
ABR*SECCION 3	0	B	.	.	.

## MODELO 7

R-Square    Coeff Var    Root MSE    BAR Mean  
0.802526    51.97698    31.19506    60.01707

Source	DF	Type I SS Mean	Square F	Value Pr	> F
ABR	1	1067042.203	1067042.203	1096.5	<.0001
HDR	1	103045.507	103045.507	105.89	<.0001
ABR*SECCION	2	51931.658	25965.829	26.68	<.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ABR	1	30720.4236	30720.4236	31.57	<.0001
HDR	1	102430.1672	102430.1672	105.26	<.0001
ABR*SECCION	2	51931.6577	25965.8288	26.68	<.0001

Parameter	Estimate		Standard Error	t Value	Pr >  t
Intercept	2.70322507		2.81367833	0.96	0.3374
ABR	-				
ABR	32.23761452	B	5.00606855	-6.44	<.0001
HDR	3.36100567		0.32759792	10.26	<.0001
ABR*SECCION 1	17.7186368	B	2.58583866	6.85	<.0001
ABR*SECCION 2	15.52893614	B	2.1295344	7.29	<.0001
ABR*SECCION 3	0	B	.	.	.

Anexo 2.3 Análisis de varianza para los modelos de estimación de biomasa foliar por árbol en las parcelas aclareadas.

The ANOVA Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
MODELO	7	Model1 Model2 Model3 Model4 Model5 Model6 Model7

Number of observations 210

The ANOVA Procedure

Dependent Variable: BIOMASA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	6	3.0542557	0.5090426	0.11	0.9949
Error	203	916.0678701	4.5126496		
Corrected Total	209	919.1221258			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	BIOMASA Mean
0.003323	67.23652	2.124300	3.159444

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F	
MODELO	6	3.05425575	0.50904262	0.11	0.9949	0.9949

The ANOVA Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for BIOMASA

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	203
Error Mean Square	4.51265
Critical Value of Studentized Range	4.21174
Minimum Significant Difference	1.6335

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	MODELO
A	3.2342	30	Model3
A			
A	3.2337	30	Model1
A			
A	3.2304	30	Model4
A			
A	3.2282	30	Model7
A			
A	3.171	30	Model5
A			
A	3.143	30	Model2
A			
A	2.8756	30	Model6

Anexo 2.4 Modelos de regresión para estimar biomasa de madera en el fuste por árbol en las parcelas aclareadas.

**MODELO 8**

The MODEL Procedure  
Nonlinear OLS Summary of Residual Errors

Equation	DF Model	DF Error	SSE	MSE	Root MSE	R-Square	Adj R-Sq
BM	2	28	20934.9	747.7	27.3437	0.8564	0.8512

Nonlinear OLS Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Approx Std Err	t Value	Approx Pr >  t
a0	0.003937	0.00365	1.08	0.2896
a1	0.920384	0.0795	11.57	<.0001

Number of Observations		Statistics for System	
Used	30	Objective	697.8317
Missing	0	Objective*N	20935

**MODELO 9**

Dependent Variable: PS

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	121621.4947	121621.4947	141.1	<.0001
Error	28	24134.1402	861.9336		
Corrected Total	29	145755.6349			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	PS Mean
0.834421	23.27090	29.35871	126.1606

Source	DF	Type I SS	Mean Square	Pr >	F Value	Pr > F
D2H	1	121621.495	121621.4947		141.10	<.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	Value	F Value	Pr > F
D2H	1	121621.495	121621.4947		141.10	<.0001

Parameter	Estimate	Standard Error	t Value	Pr >  t
Intercept	4.275681055	11.57649964	0.37	0.7147
D2H	0.025888961	0.00217945	11.88	<.0001

## MODELO 10

Dependent Variable: PS

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	126667.0717	42222.3572	57.51	<.0001
Error	26	19088.5632	734.1755		
Corrected Total	29	145755.6349			

R-Square    Coeff Var    Root MSE    PS Mean  
0.869037    21.47713    27.09567    126.1606

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
D2	1	109228.6616	109228.6616	148.78	<.0001
HT	1	8949.3698	8949.3698	12.19	0.0017
D2H	1	8489.0403	8489.0403	11.56	0.0022

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
D2	1	3922.539744	3922.539744	5.34	0.029
HT	1	1203.248653	1203.248653	1.64	0.2118
D2H	1	8489.040282	8489.040282	11.56	0.0022

Parameter	Estimate	Standard Error	t Value	Pr >  t
Intercept	144.0881794	98.98447936	1.46	0.1575
D2	-0.8255668	0.35716465	-2.31	0.029
HT	-8.0947979	6.32307397	-1.28	0.2118
D2H	0.0738738	0.02172506	3.4	0.0022

## MODELO 11

Dependent Variable: PS

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	4	126691.2868	31672.8217	41.53	<.0001
Error	25	19064.3481	762.5739		
Corrected Total	29	145755.6349			

R-Square    Coeff Var    Root MSE    PS Mean  
 0.869203    21.88856    27.61474    126.1606

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
DN	1	102632.0585	102632.0585	134.59	<.0001
D2	1	7702.8906	7702.8906	10.1	0.0039
HT	1	10446.3214	10446.3214	13.7	0.0011
D2H	1	5910.0163	5910.0163	7.75	0.0101

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
DN	1	24.215075	24.215075	0.03	0.86
D2	1	1184.025827	1184.025827	1.55	0.2243
HT	1	724.843115	724.843115	0.95	0.3389
D2H	1	5910.016265	5910.016265	7.75	0.0101

Parameter	Estimate	Standard Error	t Value	Pr >  t
Intercept	145.0356981	101.0207442	1.44	0.1635
DN	-1.5484323	8.6894098	-0.18	0.86
D2	-0.7416514	0.5951963	-1.25	0.2243
HT	-7.3852748	7.5750521	-0.97	0.3389
D2H	0.0715484	0.0257008	2.78	0.0101

Anexo 2.5 Modelos de regresión para estimar biomasa en ramas por árbol en las parcelas aclareadas.

**MODELO 12**

The MODEL Procedure

Nonlinear SUR Summary of Residual Errors

Equation	DF Model	DF Error	SSE	MSE	Root MSE	R-Square	Adj R-Sq
BR	3	27	59.6676	2.2099	1.4866	0.904	0.8969

Nonlinear SUR Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Approx Std Err	t Value	Approx Pr >  t
a0	0.002779	0.00177	1.57	0.1283
a1	2.660948	0.2543	10.47	<.0001
a2	0.442499	0.3261	1.36	0.186

Number of Observations    Statistics for System

Used	30	Objective	0.9000
Missing	0	Objective*N	27.0000

**MODELO 13**

The MODEL Procedure

Nonlinear SUR Summary of Residual Errors

Equation	DF Model	DF Error	SSE	MSE	Root MSE	R-Square	Adj R-Sq
BR	3	27	47.8176	1.771	1.3308	0.923	0.9173

Nonlinear SUR Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Approx Std Err	t Value	Approx Pr >  t
-----------	----------	----------------	---------	----------------

a0	0.005657	0.00296	1.91	0.0664
a1	2.238266	0.2815	7.95	<.0001
a2	0.515674	0.1747	2.95	0.0065

---

Number of Observations		Statistics for System	
Used	30	Objective	0.9000
Missing	0	Objective*N	27.0000

Anexo 2.6 Modelos de regresión para estimar biomasa foliar por árbol en las parcelas aclareadas.

**MODELO 14**

The MODEL Procedure

Nonlinear SUR Summary of Residual Errors

Equation	DF Model	DF Error	SSE	MSE	Root MSE	R-Square	Adj R-Sq
BF	3	27	16.415	0.608	0.7797	0.8836	0.8749

Nonlinear SUR Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Approx Std Err	t Value	Approx Pr >  t
a0	0.000191	0.000216	0.88	0.3842
a1	2.137818	0.2097	10.19	<.0001
a2	1.558892	0.4296	3.63	0.0012

Number of Observations    Statistics for System

Used	30	Objective	0.9000
Missing	0	Objective*N	27.0000

Anexo 2.7 Estimación de biomasa total por árbol y partición de biomasa aérea en árboles de *P. patula*.

The MODEL Procedure

Nonlinear SUR Summary of Residual Errors

Equation	DF Model	DF Error	SSE	MSE	Root MSE	R-Square	Adj R-Sq
BTOT	2	28	21782.9	778	27.8919	0.872	0.8674
BM	1	29	351.9	12.1339	3.4834	0.9976	0.9976
BR	1	29	190.2	6.5586	2.561	0.6939	0.6939
BF	1	29	35.6543	1.2295	1.1088	0.7471	0.7471

Nonlinear SUR Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Approx Std Err	t Value	Approx Pr >  t
a0	0.001917	0.00132	1.46	0.1563
a1	1.977233	0.1175	16.83	<.0001
c0	0.929651	0	.	.
d0	0.047053	0.00301	15.65	<.0001
e0	0.024768	0.00129	19.22	<.0001

Number of Observations    Statistics for System

Used	30	Objective	2.8220
Missing	0	Objective*N	84.6591

Anexo 2.8 Factores de expansión de biomasa variable (FEB) obtenidos del cociente entre biomasa total aérea y volumen total de madera en el fuste aplicables para todo el rango de variación de diámetro normal (DN) y altura total (AT) de *P. patula*.

DN (cm)	Altura total (m)														
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
5	286.7	316.6	345.0	372.2	398.3	423.5	447.9	471.6	494.6	517.1	539.0	560.5	581.5	602.1	622.3
6	303.1	334.7	364.7	393.5	421.1	447.7	473.5	498.5	522.9	546.7	569.8	592.5	614.7	636.5	657.9
7	317.7	350.8	382.3	412.4	441.3	469.3	496.3	522.5	548.1	573.0	597.3	621.0	644.3	667.1	689.5
8	330.9	365.4	398.2	429.5	459.7	488.8	516.9	544.3	570.9	596.8	622.1	646.9	671.1	694.9	718.2
9	343.0	378.7	412.7	445.3	476.5	506.6	535.8	564.2	591.7	618.6	644.9	670.5	695.6	720.3	744.5
10	354.2	391.1	426.2	459.8	492.1	523.2	553.3	582.6	611.1	638.8	665.9	692.4	718.4	743.8	768.8
11	364.6	402.6	438.8	473.4	506.6	538.6	569.7	599.8	629.1	657.7	685.5	712.8	739.6	765.7	791.4
12	374.4	413.5	450.6	486.1	520.2	553.1	585.0	615.9	646.0	675.3	704.0	732.0	759.4	786.3	812.7
13	383.7	423.7	461.7	498.1	533.0	566.8	599.4	631.1	662.0	692.0	721.4	750.1	778.2	805.8	832.8
14	392.4	433.4	472.3	509.5	545.2	579.7	613.1	645.6	677.1	707.8	737.9	767.2	796.0	824.2	851.9
15	400.8	442.6	482.3	520.3	556.8	592.1	626.2	659.3	691.5	722.9	753.6	783.6	812.9	841.7	870.0
16	408.8	451.4	491.9	530.7	567.9	603.8	638.6	672.4	705.2	737.3	768.5	799.1	829.1	858.4	887.3
17	416.4	459.8	501.1	540.6	578.5	615.1	650.5	684.9	718.4	751.0	782.9	814.0	844.6	874.5	903.8
18	423.7	467.9	509.9	550.1	588.7	625.9	662.0	697.0	731.0	764.2	796.7	828.4	859.4	889.8	919.7
19	430.7	475.7	518.4	559.2	598.5	636.3	673.0	708.6	743.2	776.9	809.9	842.1	873.7	904.6	935.0
20	437.5	483.2	526.6	568.0	607.9	646.4	683.6	719.7	754.9	789.2	822.7	855.4	887.5	918.9	949.7
21	444.1	490.4	534.4	576.5	617.0	656.0	693.8	730.5	766.2	801.0	835.0	868.2	900.8	932.7	964.0
22	450.4	497.4	542.1	584.8	625.8	665.4	703.8	741.0	777.2	812.5	846.9	880.6	913.6	946.0	977.8
23	456.6	504.2	549.5	592.8	634.4	674.5	713.4	751.1	787.8	823.6	858.5	892.7	926.1	958.9	991.1
24	462.6	510.8	556.7	600.5	642.6	683.3	722.7	760.9	798.1	834.3	869.7	904.3	938.2	971.4	1004.1
25	468.3	517.2	563.6	608.0	650.7	691.9	731.7	770.4	808.1	844.8	880.6	915.6	950.0	983.6	1016.6
26	474.0	523.4	570.4	615.3	658.5	700.2	740.5	779.7	817.8	854.9	891.2	926.7	961.4	995.4	1028.9
27	479.5	529.5	577.0	622.5	666.2	708.3	749.1	788.7	827.3	864.8	901.5	937.4	972.5	1007.0	1040.8
28	484.8	535.4	583.5	629.4	673.6	716.2	757.5	797.5	836.5	874.5	911.6	947.8	983.4	1018.2	1052.4
29	490.0	541.2	589.7	636.2	680.8	723.9	765.6	806.1	845.5	883.9	921.4	958.0	994.0	1029.2	1063.7
30	495.1	546.8	595.9	642.8	687.9	731.4	773.6	814.5	854.3	893.1	931.0	968.0	1004.3	1039.9	1074.8
31	500.1	552.3	601.9	649.3	694.8	738.8	781.3	822.7	862.9	902.0	940.3	977.7	1014.4	1050.3	1085.6
32	505.0	557.7	607.7	655.6	701.6	746.0	789.0	830.7	871.3	910.8	949.5	987.2	1024.2	1060.5	1096.1

Anexo 2.9 Base de datos para los análisis estadísticos del capítulo dos.

ÁRBOLES DERRIBADOS EN PARCELAS ACLAREADAS

(ND = número de derribo, ETI = identificación en campo, AT = altura total, DN = diámetro normal, DC = diámetro de copa, D = dominante, CD = codominante, I = intermedio, S = suprimido).

PARCELA	ND	ETI	AT (m)	DN (cm)	DC	ÁREA COPA (m <sup>2</sup> )	TIPO COPA
1	1	6	16.0	21.0	4.775	17.91	CD
	2	18	12.0	17.2	3.725	10.90	S
	3	23	12.5	19.6	4.275	14.35	S
	4	40	17.0	25.6	5.45	23.33	CD
	5	45	18.0	25.4	4.975	19.44	D
2	6	42	13.7	18.9	3.875	11.79	CD
	7	36	14.0	16.3	4.35	14.86	CD
	8	59	13.0	11.3	2.675	5.62	CD
	9	89	11.0	11.7	2.725	5.83	I
	10	105	14.0	18.4	4.1	13.20	CD
3	11	4	14.6	21.7	5.125	20.63	CD
	12	19	14.6	17.6	4.275	14.35	CD
	13	38	15.0	21.7	4.75	17.72	CD
	14	51	12.5	11.4	3.55	9.90	I
	15	75	17.5	21.8	4.775	17.91	D
4	16	2	14.0	16.0	3.575	10.04	I
	17	29	16.5	19.5	4.475	15.73	D
	18	31	14.0	19.4	4.175	13.69	I
	19	59	12.5	12.2	3.3	8.55	S
	20	80	15.5	17.0	3.075	7.43	CD
5	21	12	15.5	16.5	3.65	10.46	CD
	22	53	15.0	18.4	3.6	10.18	CD
	23	70	15.5	17.5	4.625	16.80	CD
	24	117	13.5	13.5	3.55	9.90	I
	25	149	17.0	15.8	3.15	7.79	D
6	26	8	14.5	14.4	2.655	5.54	CD
	27	37	12.5	8.2	2.33	4.26	CD
	28	64	11.0	8.0	2.5	4.91	I
	29	115	12.0	14.7	2.75	5.94	I
	30	142	15.5	18.7	3.15	7.79	D

### BIOMASA FOLIAR EN RAMAS INDIVIDUALES

(NP = número de parcela, NAD = número de árbol derribado, VERT = verticilo, NR = número de rama, DBR = diámetro basal de rama, LR = longitud de rama, AR = altura de rama.

NP	NAD	VERT	NR	DBR (cm)	LR (m)	AR (m)	Biomasa (g)
1	1	1	1	2.730	1.320	7.100	30.10
1	1	2	2	3.000	3.560	7.600	55.15
1	1	3	4	3.100	3.780	7.830	83.97
1	1	4	7	3.050	3.430	8.450	121.22
1	1	5	10	2.660	2.900	8.970	119.81
1	1	7	13	3.490	3.750	9.700	261.90
1	1	8	17	2.720	2.790	10.110	140.61
1	1	11	29	2.370	2.340	11.480	172.01
1	1	13	34	2.660	2.420	12.300	201.73
1	1	14	35	2.260	1.870	12.750	87.11
1	1	15	38	1.510	1.470	13.190	62.46
1	1	16	41	2.090	1.590	13.660	71.21
1	1	17	44	1.990	1.630	14.060	69.23
1	1	18	48	1.550	1.280	14.360	33.57
1	1	19	51	0.590	0.315	14.740	1.44
1	1	20	55	1.220	0.810	15.220	9.95
1	1	20	58	0.660	0.320	15.590	1.75
1	1	21	61	1.830	0.685	16.275	57.66
1	2	4	11	1.720	1.900	7.910	25.81
1	2	5	14	2.220	2.850	8.230	80.42
1	2	6	16	2.090	2.300	8.540	98.57
1	2	7	19	2.440	3.140	8.990	101.97
1	2	9	22	1.830	1.770	9.540	92.96
1	2	11	30	1.330	1.330	10.040	34.64
1	3	1	1	2.270	2.750	7.760	25.70
1	3	2	2	2.000	3.120	8.200	32.81
1	3	3	5	4.050	4.100	8.590	302.57
1	3	4	9	2.440	3.150	8.900	86.91
1	3	5	11	2.700	3.470	9.620	138.46
1	3	6	16	2.000	2.320	9.940	86.59
1	3	7	19	2.010	2.230	10.140	54.47
1	3	8	21	2.370	2.240	10.760	99.77
1	3	9	25	0.990	1.270	11.280	14.66
1	3	10	28	1.830	2.150	11.910	57.66
1	3	11	31	1.720	1.950	12.260	52.59
1	3	12	34	2.100	1.340	12.660	47.66
1	3	13	36	1.700	1.320	12.900	51.33
1	3	14	38	1.050	0.960	13.110	21.59
1	3	15	40	1.220	0.550	13.510	5.71

1	3	16	42	1.100	0.520	13.850	10.72
1	3	17	45	0.380	0.060	14.310	1.12
1	3	18	47	0.660	0.400	14.710	2.91
1	3	19	50	0.720	0.510	15.020	3.18
1	3	20	53	1.330	0.560	15.580	18.06
1	4	1	1	3.300	3.200	8.160	34.84
1	4	2	2	4.160	4.680	8.560	295.16
1	4	3	5	3.270	3.750	8.910	171.24
1	4	4	8	1.380	1.730	9.420	19.74
1	4	5	10	3.610	4.130	9.840	254.56
1	4	6	14	5.300	3.850	10.450	493.50
1	4	7	20	1.980	1.900	11.130	115.39
1	4	8	21	2.160	1.810	11.470	96.80
1	4	9	26	3.380	3.269	11.530	282.02
1	4	10	27	1.490	1.630	11.680	44.60
1	4	11	36	2.110	2.200	12.080	87.94
1	4	12	38	2.090	1.880	12.500	72.8
1	4	13	40	2.440	2.110	12.970	108.75
1	4	14	44	0.620	0.520	13.420	9.28
1	4	15	48	0.670	0.460	13.890	9.73
1	4	16	50	1.200	0.570	14.400	30.86
1	4	17	54	1.160	0.460	14.820	13.72
1	4	18	59	1.500	1.240	15.240	36.99
1	4	19	64	0.590	0.170	15.870	0.14
1	4	20	68	1.990	0.730	16.600	37.05
2	6	1	1	3.200	3.270	6.790	52.32
2	6	2	5	1.610	2.140	7.100	9.62
2	6	3	7	2.980	3.180	7.580	33.19
2	6	4	10	2.610	2.500	8.000	5.04
2	6	5	15	2.660	3.100	8.550	84.75
2	6	6	19	2.440	2.760	8.670	86.33
2	6	7	22	1.730	1.200	8.980	37.46
2	6	8	26	3.090	2.420	9.370	208.17
2	6	9	31	1.100	0.610	9.980	8.83
2	6	10	33	1.660	0.520	10.260	54.87
2	6	11	36	2.050	1.920	10.860	60.94
2	6	12	39	1.770	1.720	11.060	56.42
2	6	13	46	1.830	1.350	11.850	35.75
2	6	14	50	0.590	0.260	12.350	1.52
2	6	15	52	1.610	1.180	12.920	25.86
2	6	16	55	1.090	0.640	13.260	11.52
2	6	17	58	0.720	0.400	13.570	1.94

2	6	18	61	0.720	0.130	13.830	0.67
2	6	19	64	1.330	0.340	14.170	32.21
2	7	2	3	3.110	4.420	6.550	131.37
2	7	3	4	2.980	4.100	7.150	24.24
2	7	4	8	3.580	3.600	7.450	188.77
2	7	5	10	1.220	1.380	7.880	10.82
2	7	6	12	1.570	1.320	8.280	18.18
2	7	7	13	1.920	2.250	8.650	74.78
2	7	8	16	1.520	0.930	9.170	7.14
2	7	9	19	2.500	2.300	9.670	91.21
2	7	10	21	2.620	3.000	10.220	26.74
2	7	11	25	2.150	1.970	10.940	41.55
2	7	12	27	2.020	2.200	11.260	89.57
2	7	13	30	1.500	1.550	11.430	51.64
2	7	14	32	0.710	0.690	11.820	7.40
2	7	16	38	0.860	0.810	12.410	18.14
2	7	17	41	1.600	1.460	12.720	66.73
2	7	18	44	1.100	0.900	12.930	22.70
2	7	19	48	1.410	0.980	13.480	26.24
2	7	20	51	0.810	0.610	13.990	13.75
2	7	21	54	1.000	0.740	14.280	14.67
2	7	22	57	1.010	0.620	14.390	9.02
2	7	23	60	0.470	0.270	14.800	1.52
2	7	24	62	0.650	0.240	15.240	1.00
2	7	25	65	1.710	0.700	15.940	36.25
2	8	2	2	1.700	2.200	7.070	26.91
2	8	3	5	1.410	1.940	7.390	30.59
2	8	4	8	1.070	1.260	7.830	10.92
2	8	5	11	1.600	1.930	8.290	46.06
2	8	6	16	1.770	1.490	8.720	63.09
2	8	7	20	0.830	0.790	8.940	1.33
2	8	8	21	1.600	1.430	9.570	60.35
2	8	9	23	1.160	1.100	10.130	40.04
2	8	10	29	0.800	0.900	10.690	18.88
2	8	11	32	1.440	1.110	10.970	65.14
2	8	12	37	1.220	0.630	11.150	42.07
2	8	13	39	0.760	0.570	11.450	12.49
2	8	14	44	0.800	0.660	11.950	9.07
2	8	15	48	0.620	0.350	12.490	2.07
2	8	16	52	1.240	0.560	13.050	53.33
3	12	1	1	3.120	3.550	7.750	90.14
3	12	2	2	2.380	2.580	8.230	36.6

3	12	3	4	2.800	2.690	8.980	117.99
3	12	5	10	1.610	2.130	9.720	76.99
3	12	6	12	2.630	2.480	10.110	39.6
3	12	8	17	2.000	2.040	10.840	38.92
3	12	9	19	1.730	1.740	11.150	24.46
3	12	10	22	2.060	2.270	11.520	74.74
3	12	11	25	2.500	2.150	12.080	178.51
3	12	12	28	1.460	1.550	12.480	32.28
3	12	13	31	1.220	1.400	12.770	21.39
3	12	14	36	1.880	1.690	13.220	61.75
3	12	15	42	1.730	1.550	13.470	53.02
3	12	16	47	0.770	0.670	13.710	12.61
3	12	17	51	0.870	0.760	14.070	12.32
3	12	18	55	1.550	1.260	14.590	32.26
3	12	19	58	1.270	1.120	14.730	18.76
3	12	20	62	2.040	0.530	15.260	10.82
3	13	2	4	3.240	4.100	8.220	164.01
3	13	3	6	3.000	4.140	8.510	236.94
3	13	5	10	1.600	0.300	9.260	72.10
3	13	6	13	2.700	3.270	9.710	152.67
3	13	7	18	2.900	3.000	10.310	177.27
3	13	8	21	1.630	1.910	10.760	91.35
3	13	9	24	2.400	2.800	11.120	125.07
3	13	11	29	1.400	1.620	11.920	60.45
3	13	12	30	1.920	1.570	12.250	34.79
3	13	13	38	1.300	1.450	12.370	88.20
3	13	15	44	0.460	0.150	13.200	1.03
3	13	16	46	0.930	0.780	13.550	7.73
3	13	17	49	1.500	1.000	14.070	30.16
3	13	18	53	1.500	0.890	14.570	14.03
3	13	19	56	1.200	0.620	15.600	6.33
3	13	20	60	0.620	0.280	16.000	1.64
3	13	21	63	0.670	0.290	16.290	38.52
3	15	2	4	3.080	3.800	9.490	219.33
3	15	3	10	2.860	3.880	10.340	160.49
3	15	4	15	3.650	3.820	11.060	305.88
3	15	6	17	3.480	3.050	11.960	258.56
3	15	7	23	2.290	2.400	12.740	117.28
3	15	8	28	2.100	2.420	13.440	80.58
3	15	12	38	1.600	1.540	17.320	35.28
4	16	2	2	2.790	3.020	8.870	114.41
4	16	3	3	2.490	2.820	9.790	49.99

4	16	5	8	2.800	2.770	10.920	239.44
4	16	6	10	2.400	2.680	11.230	128.49
4	16	7	15	1.400	1.600	11.840	51.33
4	16	8	19	2.500	2.490	12.230	168.93
4	16	9	23	1.020	1.100	12.720	40.67
4	16	10	25	1.740	1.840	12.900	91.94
4	16	11	30	1.010	1.230	13.100	34.86
4	16	12	33	0.960	1.220	13.530	28.75
4	16	13	35	0.740	0.830	14.170	13.34
4	16	14	40	1.360	1.220	14.450	31.15
4	16	15	43	1.200	1.210	14.900	25.66
4	16	16	47	0.430	0.470	15.390	5.93
4	16	17	51	0.490	0.550	15.670	3.34
4	16	18	55	0.480	0.300	15.900	1.27
4	16	19	59	1.170	0.540	16.440	14.61
4	18	1	2	0.040	0.050	7.510	0.61
4	18	2	3	3.400	3.680	7.520	32.21
4	18	3	4	2.690	3.620	7.820	40.6
4	18	4	6	0.060	0.040	7.710	2.56
4	18	6	10	2.750	2.690	8.670	41.29
4	18	7	15	2.300	2.800	9.030	110.49
4	18	8	16	2.510	3.320	9.280	119
4	18	9	20	2.640	2.980	9.620	158.57
4	18	10	27	2.400	2.680	10.000	94.16
4	18	11	32	0.030	0.020	10.400	14.32
4	18	12	35	2.750	3.020	11.000	156.12
4	18	13	39	2.160	2.430	11.130	110.4
4	18	14	41	2.880	2.520	11.450	133.3
4	18	14	42	0.940	0.940	11.450	162.09
4	18	15	43	0.620	1.920	11.670	9.62
4	18	16	46	0.300	0.220	12.130	2.52
4	18	17	50	0.700	0.730	12.500	12.53
4	18	18	54	0.770	0.440	12.830	6.39
4	18	20	60	0.760	0.740	13.270	0.47
4	18	21	64	1.400	1.010	13.730	44.8
4	18	22	69	1.240	1.090	14.140	37.71
4	18	23	72	0.460	0.360	14.700	2.28
4	18	24	75	0.630	0.330	15.470	2.58
4	18	25	76	1.420	0.510	15.980	78.4
4	19	2	2	1.800	2.180	11.200	32.26
4	19	3	5	2.130	2.320	11.750	46.02
4	19	4	9	1.350	1.670	12.140	24.71
4	19	5	11	2.370	2.260	12.690	85.31

4	19	7	16	1.200	0.830	13.410	13.42
4	19	8	17	1.220	1.350	14.400	31.26
4	19	9	22	1.250	1.370	14.730	32.91
4	19	10	27	0.500	0.650	14.820	10.75
4	19	11	31	0.350	0.420	15.120	4.48
4	19	12	35	0.200	0.060	15.420	4.89
4	19	14	38	0.500	0.430	15.880	4.33
4	19	15	42	1.090	0.490	16.370	17.47
5	22	4	6	2.240	2.880	8.820	71.40
5	22	5	7	2.300	2.470	9.070	73.95
5	22	7	11	2.460	2.830	10.040	109.67
5	22	10	16	1.610	1.880	11.140	77.08
5	22	11	19	2.260	2.770	11.420	183.42
5	22	12	22	0.580	0.980	11.840	23.83
5	22	13	24	2.320	2.420	13.260	122.25
5	22	14	28	1.740	2.210	13.500	109.24
5	22	15	30	2.500	2.400	13.740	229.51
5	22	16	33	1.720	2.320	13.930	59.07
5	22	17	35	1.170	1.430	14.470	42.85
5	22	18	37	0.900	0.920	14.710	20.23
5	22	19	42	1.400	1.490	15.050	69.54
5	22	20	43	1.710	1.870	15.320	91.15
5	22	21	46	0.720	0.840	15.600	20.50
5	22	22	48	1.400	1.410	16.190	12.79
5	22	23	51	0.400	0.530	16.470	9.42
5	22	24	54	0.900	0.860	16.630	21.69
5	22	25	57	0.990	0.880	16.860	16.12
5	22	26	59	0.700	0.680	17.090	1.03
5	22	27	62	0.540	0.350	17.500	3.76
5	22	28	64	1.210	0.440	17.940	56.92
5	23	6	8	3.290	4.220	9.350	258.30
5	23	7	11	3.660	4.260	9.770	275.43
5	23	8	14	2.690	2.790	10.400	241.94
5	23	10	20	1.030	1.570	11.190	29.62
5	23	12	27	2.300	2.560	11.720	186.13
5	23	14	32	2.760	2.910	12.190	278.91
5	23	15	37	2.300	2.160	12.500	229.88
5	23	16	40	0.600	0.300	13.050	9.82
5	23	17	46	1.420	1.410	13.500	57.88
5	23	18	49	1.310	1.400	13.910	64.96
5	23	19	54	2.030	1.560	14.300	99.02
5	23	20	59	0.860	0.840	14.730	25.27

5	23	21	63	0.260	0.070	15.150	3.14
5	23	23	71	1.040	1.070	15.870	23.64
5	23	24	76	0.600	0.560	16.250	9.34
5	23	25	79	0.700	0.550	16.570	6.07
5	23	26	82	0.440	0.350	16.950	2.82
5	23	27	86	0.700	0.320	17.270	62.36
5	24	3	5	1.630	1.910	10.620	50.55
5	24	6	14	1.230	1.800	11.950	51.270
5	24	9	18	1.000	1.330	13.450	31.57
5	24	10	21	1.240	1.580	13.940	64.62
5	24	11	24	0.600	0.840	14.500	14.86
5	24	12	27	0.620	0.710	14.730	11.53
5	24	13	31	0.300	0.230	15.400	1.51
5	24	15	38	1.100	0.550	16.640	37.58
6	26	2	3	2.560	3.550	8.900	73.50
6	26	3	5	1.170	1.290	9.380	51.31
6	26	4	10	1.610	1.830	9.900	57.58
6	26	5	14	2.140	2.090	10.320	69.71
6	26	6	18	2.600	2.130	10.560	108.99
6	26	9	23	1.510	1.670	11.190	39.23
6	26	10	25	2.200	1.740	12.190	126.88
6	26	11	28	0.720	0.610	12.610	11.97
6	26	13	30	1.450	1.450	13.350	38.92
6	26	14	33	1.240	0.210	13.840	18.35
6	26	15	36	1.050	0.770	14.070	14.30
6	26	16	41	0.530	0.240	14.490	1.21
6	26	17	43	2.010	0.520	15.010	6.23
6	27	3	4	1.380	1.840	8.850	27.15
6	27	4	8	1.400	1.630	9.430	24.19
6	27	5	14	0.980	0.990	9.900	16.35
6	27	6	15	0.460	0.430	10.200	3.50
6	27	7	18	1.150	1.160	10.860	29.51
6	27	8	22	1.280	1.300	13.270	34.31
6	27	9	24	1.180	1.020	13.720	25.92
6	27	10	28	1.240	1.070	14.160	29.11
6	27	11	33	0.950	0.870	14.730	12.53
6	27	12	37	0.600	0.410	15.090	2.58
6	27	13	39	0.970	0.670	15.760	29.16
6	28	1	3	1.600	2.700	6.580	28.75
6	28	3	5	0.900	1.620	7.290	16.04
6	28	4	7	1.270	2.100	7.810	37.74
6	28	5	10	1.450	2.270	8.140	59.38

6	28	6	13	1.240	1.900	8.390	14.63
6	28	7	17	0.950	1.490	8.710	28.26
6	28	9	20	1.070	1.460	9.870	25.5
6	28	10	22	0.780	1.150	10.270	14.86
6	28	11	27	0.390	0.460	10.570	5.82
6	28	12	28	0.670	0.840	11.020	12.12
6	28	13	30	0.650	0.720	11.330	8.97
6	28	14	34	0.460	0.440	11.910	2.18
6	28	15	37	0.300	0.380	12.330	1.72
6	28	16	39	1.180	0.470	12.800	27.45
6	29	2	3	2.380	3.100	7.220	73.68
6	29	3	8	2.700	3.320	8.190	167.26
6	29	4	13	1.280	2.190	8.580	41.16
6	29	5	18	1.230	1.920	8.800	31.42
6	29	7	23	0.170	0.290	9.880	1.58
6	29	8	25	1.360	1.800	10.210	42.88
6	29	9	36	0.060	0.150	10.500	4.01
6	29	10	38	0.600	0.970	10.860	9.06
6	29	11	39	0.500	0.520	11.120	5.94
6	29	12	41	0.950	1.230	12.630	18.63
6	29	13	45	0.630	0.640	13.120	5.45
6	29	15	51	1.720	1.040	14.450	9.14

### BIOMASA EN COMPONENTE AÉREO DE ÁRBOLES DERRIBADOS

(AFL = altura de fuste limpio, LCV = longitud de copa viva, DCV = diámetro de copa viva, DT = diámetro de tocón, VCC = volumen con corteza, VSC = volumen sin corteza, PV = peso verde, BM = biomasa en madera con corteza, BR = biomasa en ramas, BF = biomasa en hojas, BTOT = biomasa total aérea).

Parcela	AFL (m)	LCV (m)	DCV (cm)	DT (cm)	VCC (m <sup>3</sup> )	VSC (m <sup>3</sup> )	PV (kg)	BM (kg)	BR (kg)	BF (kg)	BTOT (kg)
1	7.10	9.48	15.16	21.35	0.25	0.20	242.60	108.94	11.53	6.22	126.70
1	6.27	6.21	10.58	16.90	0.11	0.08	99.46	55.77	3.46	1.47	60.71
1	7.76	8.12	11.75	19.10	0.19	0.16	186.59	123.75	5.71	3.16	132.62
1	8.16	8.74	15.98	27.60	0.33	0.27	340.88	260.95	13.45	7.17	281.57
1	7.18	11.32	19.00	26.30	0.39	0.33	403.95	313.50	19.83	9.51	342.84
2	6.79	7.68	14.20	22.02	0.17	0.12	150.95	52.01	6.77	3.66	62.44
2	6.25	9.99	12.40	16.35	0.13	0.11	134.34	47.93	6.85	3.67	58.45
2	6.25	7.10	8.20	12.90	0.06	0.05	58.21	87.99	1.42	0.89	90.30
2	6.20	6.16	8.03	14.12	0.07	0.06	67.03	53.87	0.78	0.46	55.11
2	5.80	9.44	10.30	19.60	0.17	0.14	179.16	125.59	6.05	2.93	134.57
3	5.48	9.42	16.38	25.88	0.27	0.24	261.02	212.80	14.61	4.79	232.20
3	7.75	7.81	13.30	20.75	0.20	0.16	177.23	157.93	5.62	3.33	166.88
3	7.58	9.01	14.25	21.35	0.23	0.19	240.34	173.48	7.23	4.07	184.78
3	8.31	9.72	12.48	15.70	0.16	0.14	180.04	137.62	4.52	2.92	145.06
3	8.77	10.75	16.22	22.03	0.34	0.29	363.36	268.70	13.31	7.53	289.54
4	8.38	8.36	10.30	19.15	0.16	0.14	128.12	110.01	2.92	2.90	115.83
4	8.31	10.56	12.90	21.40	0.23	0.18	241.80	184.25	5.20	3.15	192.60
4	7.51	8.77	12.78	19.30	0.18	0.15	187.05	125.15	9.12	3.34	137.61
4	10.82	5.85	7.10	14.10	0.10	0.09	99.36	79.10	1.97	1.44	82.51
4	9.38	7.03	8.93	17.85	0.15	0.13	130.86	110.84	1.81	1.13	113.78
5	6.80	7.51	14.25	16.88	0.15	0.13	164.72	105.43	5.01	1.75	112.18
5	7.62	10.62	12.20	19.15	0.20	0.17	200.64	157.17	6.00	3.75	166.92
5	7.67	9.90	12.88	20.85	0.22	0.19	228.65	178.73	8.94	5.89	193.56
5	8.80	8.14	10.60	14.80	0.10	0.09	109.74	67.01	3.77	1.96	72.74
5	10.04	8.26	9.95	17.65	0.16	0.13	164.92	119.02	2.03	2.21	123.27
Testigo	8.39	6.92	8.75	13.35	0.11	0.10	106.82	86.10	1.72	1.65	89.46
Testigo	7.87	8.19	5.73	8.20	0.04	0.04	41.06	30.01	0.70	0.86	31.57
Testigo	6.58	6.52	6.30	8.60	0.04	0.03	38.28	28.67	0.89	0.46	30.02
Testigo	6.80	7.95	9.80	15.05	0.10	0.08	99.89	71.64	5.53	1.55	78.72
Testigo	6.09	11.46	12.93	19.23	0.19	0.16	188.19	150.85	5.79	3.02	159.67

Anexo 3.1 Parámetros estimados, residuales e intervalos de confianza para el modelo que estima área foliar por rama en árboles de *P. patula*.

The GLM Procedure

Dependent Variable: AF

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	1080625381	360208460	308.72	<.0001
Error	141	164515626	1166777		
Corrected Total	144	1245141008			

R-Square    Coeff Var    Root MSE    AF Mean  
 0.867874    38.49308    1080.175    2806.153

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ABR	1	1067142064	1067142064	914.61	<.0001
ABR*SECCION	2	13483317	6741659	5.78	0.0039

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ABR	1	322840110.4	322840110.4	276.69	<.0001
ABR*SECCION	2	13483317.2	6741658.6	5.78	0.0039

Parameter	Estimate	Standard Error	t Value	Pr >  t	95% Confidence Limits	Limits
Intercept	475.79	133.80	3.56	0.0005	211.28	740.31
ABR	534.86	B 92.78	5.76	<.0001	351.43	718.28
ABR*SECCION 1	147.61	B 88.66	1.66	0.0982	-27.66	322.89
ABR*SECCION 2	242.11	B 88.65	2.73	0.0071	66.86	417.37
ABR*SECCION 3	0	B .	.	.	.	.

NOTE: The X'X matrix has been found to be singular, and a generalized inverse was used to solve the normal equations. Terms whose estimates are followed by the letter 'B' are not uniquely estimable.

The GLM Procedure

Observation	Observed	Predicted	Residual	95% Confidence Mean Predicted	Limits for Value
1	2834.681	5562.27042	-2727.59	5185.99541	5938.54543
2	5405.023	5304.97801	100.045	4946.12862	5663.8274
3	6612.202	4840.07209	1772.13	4529.73326	5150.41092
4	2914.392	1695.27725	1219.11	1351.22228	2039.33222
5	144.34	661.92857	-517.589	427.97345	895.88369
6	2285.817	2267.04213	18.7749	1755.64977	2778.43449
7	4313.162	5304.97801	-991.816	4946.12862	5663.8274
8	1503.938	2774.09269	-1270.15	2543.60652	3004.57885
9	5505.131	5101.91303	403.218	4776.75683	5427.06922
10	1907.07	1421.96401	485.106	1144.27537	1699.65266
11	287.332	598.81514	-311.483	355.94289	841.68739
12	1003.489	485.95977	517.529	223.42295	748.49659
13	1372.244	3992.58199	-2620.34	3712.11053	4273.05345
14	4276.445	4539.24305	-262.798	4228.69335	4849.79275
15	700.421	1237.234	-536.813	998.87072	1475.59727
16	2139.881	2021.54159	118.339	1584.92074	2458.16243
17	62.615	552.81722	-490.202	302.46532	803.16911
18	14201.33	12286.67915	1914.65	11379.19954	13194.15876
19	8377.311	7773.48368	603.827	7233.08126	8313.88611
20	984.776	1775.22647	-790.45	1547.4636	2002.98934
21	11510.19	9369.78857	2140.4	8702.26332	10037.31382
22	20115.69	22301.05557	-2185.37	20667.97124	23934.1399
23	5899.679	3521.54368	2378.14	3271.79808	3771.28928
24	4629.116	4101.16784	527.948	3828.18227	4374.1534
25	11236.25	9351.97219	1884.27	8733.4129	9970.53149
26	2223.816	2200.68434	23.1317	1975.01194	2426.35674
27	4266.263	3934.89495	331.368	3669.20411	4200.5858
28	3385.091	3869.62896	-484.538	3606.67086	4132.58706
29	5019.295	5101.91303	-82.618	4776.75683	5427.06922
30	430.406	715.94938	-285.543	488.26577	943.633
31	1446.387	1245.99522	200.392	1001.36756	1490.62287
32	1560.997	1679.23146	-118.234	1339.42881	2019.03412
33	27.045	661.92857	-634.884	427.97345	895.88369
34	1485.723	2593.84132	-1108.12	1979.12476	3208.55789
35	6249.99	7464.32331	-1214.33	6947.94044	7980.70618
36	706.565	2244.76805	-1538.2	2017.87533	2471.66077
37	4212.226	6536.15972	-2323.93	6090.13669	6982.18275

38	3053.028	5124.80508	-2071.78	4777.83923	5471.77093
39	4137.411	5304.97801	-1167.57	4946.12862	5663.8274
40	4508.352	5101.91303	-593.561	4776.75683	5427.06922
41	2324.662	2801.28685	-476.625	2570.34602	3032.22768
42	10903.88	7894.36507	3009.51	7383.16777	8405.56237
43	618.892	1415.9385	-797.047	1181.80704	1650.06996
44	3012.754	2617.14352	395.61	2388.88925	2845.39779
45	4178.461	3741.42791	437.033	3483.61076	3999.24506
46	2656.717	2910.0635	-253.347	2677.10744	3143.01957
47	2352.58	2267.04213	85.5379	1755.64977	2778.43449
48	262.491	661.92857	-399.438	427.97345	895.88369
49	1293.817	1862.15344	-568.336	1472.01647	2252.2904
50	691.483	1111.2106	-419.728	884.18203	1338.23918
51	275.85	752.85469	-477.005	528.67485	977.03454
52	26.744	752.85469	-726.111	528.67485	977.03454
53	1385.297	1421.96401	-36.667	1144.27537	1699.65266
54	5548.934	7076.67852	-1527.74	6590.03583	7563.3212
55	3081.278	2991.39376	89.8842	2751.46593	3231.32159
56	3160.177	5808.96126	-2648.78	5440.74245	6177.18007
57	2680.865	2464.85621	216.009	2238.11582	2691.5966
58	678.427	1010.65701	-332.23	791.26579	1230.04822
59	1605.441	2448.14507	-842.704	2219.40745	2676.88269
60	1970.313	2464.85621	-494.543	2238.11582	2691.5966
61	2823.544	2464.85621	358.688	2238.11582	2691.5966
62	2469.546	1585.09618	884.45	1269.46101	1900.73135
63	402.035	818.10756	-416.073	598.46861	1037.74651
64	1906.318	1298.41145	607.907	1044.98538	1551.83753
65	2298.677	4341.32581	-2042.65	4042.1692	4640.48242
66	3830.354	2489.71944	1340.63	2262.77635	2716.66254
67	1473.74	2801.28685	-1327.55	2570.34602	3032.22768
68	3010.021	2076.63212	933.389	1623.52002	2529.74423
69	1626.85	1761.06498	-134.215	1399.22289	2122.90706
70	4718.936	2540.22289	2178.71	2312.81446	2767.63131
71	2971.953	1998.67056	973.282	1772.46763	2224.87349
72	1790.711	3339.73128	-1549.02	3095.89149	3583.57106
73	328.496	938.45096	-609.955	721.30742	1155.59451
74	664.64	1679.23146	-1014.59	1339.42881	2019.03412
75	5160.093	5232.63585	-72.5429	4878.59141	5586.68029
76	9125.402	6058.42846	3066.97	5647.27199	6469.58493
77	5885.254	4550.26001	1334.99	4255.43437	4845.08565
78	4070.768	3902.26196	168.506	3637.94699	4166.57693
79	1677.233	1845.03793	-167.805	1459.76486	2230.311
80	3333.262	4491.52307	-1158.26	3246.53132	5736.51481

81	5697.377	5788.16906	-90.7921	5396.20356	6180.13456
82	2515.252	1998.67056	516.581	1772.46763	2224.87349
83	4103.661	2828.48101	1275.18	2597.06574	3059.89629
84	1273.169	1465.28764	-192.119	1178.09466	1752.48061
85	79.358	598.81514	-519.457	355.94289	841.68739
86	8472.514	8365.18797	107.326	7778.1974	8952.17855
87	6513.408	4086.08082	2427.33	3800.78898	4371.37267
88	708.019	476.57442	231.445	212.09319	741.05564
89	619.735	774.15625	-154.421	521.33036	1026.98215
90	587.533	681.18351	-93.6505	449.61424	912.75278
91	2550.155	1554.07433	996.081	1246.07741	1862.07124
92	2672.491	2993.19994	-320.709	2758.49536	3227.90453
93	3561.166	4000.93792	-439.772	3732.40565	4269.4702
94	2074.762	1892.22484	182.537	1665.27442	2119.17525
95	5482.17	4840.07209	642.098	4529.73326	5150.41092
96	1212.784	1245.99522	-33.2112	1001.36756	1490.62287
97	2563.817	1271.66847	1292.15	1022.85475	1520.4822
98	2627.824	1311.78294	1316.04	1055.95856	1567.60732
99	844.807	609.51233	235.295	368.26491	850.75976
100	414.037	541.58517	-127.548	289.29068	793.87965
101	121.524	497.19182	-375.668	236.8033	757.58034
102	242.199	609.51233	-367.313	368.26491	850.75976
103	1296.781	1111.2106	185.57	884.18203	1338.23918
104	3391.767	4086.08082	-694.314	3800.78898	4371.37267
105	4769.491	4657.48271	112.008	4357.03499	4957.93043
106	2369.931	2774.09269	-404.162	2543.60652	3004.57885
107	64.014	737.87863	-673.865	512.35602	963.40123
108	225.393	631.97643	-406.583	393.99314	869.95973
109	11613.77	7862.88768	3750.89	7315.495	8410.28036
110	1669.653	1300.16906	369.484	1063.387	1536.95112
111	503.45	755.50883	-252.059	502.00319	1009.01446
112	3005.998	1393.61646	1612.38	1121.88681	1665.3461
113	60.89	512.16789	-451.278	254.58202	769.75376
114	2243.465	737.87863	1505.59	512.35602	963.40123
115	2881.084	2540.22289	340.861	2312.81446	2767.63131
116	2923.049	1651.36225	1271.69	1421.54907	1881.17543
117	1679.704	1010.65701	669.047	791.26579	1230.04822
118	932.34	668.34688	263.993	435.20511	901.48865
119	136.32	523.9348	-387.615	268.50014	779.36946
120	3458.464	4948.72699	-1490.26	4613.09003	5284.36394
121	2816.47	4034.34789	-1217.88	3764.34977	4304.34602
122	1765.459	2247.30291	-481.844	2021.58696	2473.01885
123	1479.714	1600.60711	-120.893	1281.08844	1920.12577

124	663.919	1065.74754	-401.829	842.79935	1288.69573
125	2685.474	1775.22647	910.248	1547.4636	2002.98934
126	1782.723	1813.44497	-30.722	1586.02062	2040.86931
127	1407.765	1221.69448	186.071	982.92587	1460.46308
128	294.273	640.51637	-346.243	382.6658	898.36694
129	1881.709	1503.7368	377.972	1271.38676	1736.08683
130	2045.187	1351.89741	693.29	1088.52986	1615.26496
131	1687.455	1220.32196	467.133	979.63098	1461.01293
132	1599.696	1298.41145	301.285	1044.98538	1551.83753
133	728.005	958.77563	-230.771	741.28198	1176.26928
134	221.506	668.34688	-446.841	435.20511	901.48865
135	1489.179	979.10029	510.079	761.03419	1197.1664
136	1082.812	1028.60076	54.2112	785.25093	1271.95058
137	3350.32	2109.77814	1240.54	1884.01151	2335.54477
138	1395.742	1365.43505	30.307	1130.18894	1600.68117
139	693.12	715.94938	-22.8294	488.26577	943.633
140	93.493	523.9348	-430.442	268.50014	779.36946
141	3621.724	4341.32581	-719.602	4042.1692	4640.48242
142	2071.287	1508.37944	562.908	1276.9626	1739.79627
143	1979.757	1913.20319	66.5538	1686.42547	2139.98091
144	400.418	670.04146	-269.623	413.33125	926.75166
145	279.666	688.13669	-408.471	457.38859	918.88478

---

Sum of Residuals	-0.0
Sum of Squared Residuals	164515626.1
Sum of Squared Residuals - Error SS	-0.0
PRESS Statistic	201821847.8
First Order Autocorrelation	0.1
Durbin-Watson D	1.8

Anexo 3.2 Regresión lineal para estimar área foliar en función al área de albura en las secciones de tocón (T), diámetro normal (N) y diámetro de copa viva (CV) en *P. patula*.

### SECCIÓN DE TOCÓN

The GLM Procedure

Dependent Variable: AF

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	1759.055995	1759.055995	156.24	<.0001
Error	28	315.251783	11.258992		
Corrected Total	29	2074.307778			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	AF Mean
0.848021	22.25902	3.355442	15.07453

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr >F
T	1	1759.055995	1759.055995	156.24	<.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
T	1	1759.055995	1759.055995	156.24	<.0001

Parameter	Estimate	Standard Error	t Value	Pr >  t
Intercept	-0.665152987	1.4003448	-0.47	0.6385
T	0.081725711	0.00653836	12.5	<.0001

Obs	AF	P	R	I	S
1	27.8186	20.7847	7.03388	13.7354	27.834
2	11.9222	12.1356	-0.21338	5.1321	19.1391

3	15.341	16.6685	-1.32755	9.6767	23.6603
4	29.9912	31.7538	-1.76261	24.2512	39.2564
5	35.7915	35.2756	0.51591	27.544	43.0071
6	20.6356	17.4971	3.13842	10.4989	24.4953
7	18.1082	12.2747	5.83346	5.2728	19.2767
8	7.4286	6.3091	1.11952	-0.824	13.4422
9	4.6923	7.1126	-2.42029	0.0048	14.2203
10	16.9247	16.1303	0.79438	9.1412	23.1194
11	30.6418	28.3482	2.29366	21.0305	35.6659
12	15.9221	16.6618	-0.73971	9.67	23.6536
13	19.011	19.1672	-0.15621	12.1481	26.1862
14	11.2542	11.1986	0.05565	4.1829	18.2143
15	25.131	25.9195	-0.78845	18.7101	33.1289
16	12.3528	13.9467	-1.59388	6.9573	20.936
17	11.1553	20.0163	-8.86097	12.9826	27.05
18	17.0252	17.9286	-0.90347	10.9261	24.9312
19	6.5208	7.5985	-1.0777	0.505	14.6921
20	5.3134	11.2824	-5.96905	4.2679	18.2969
21	11.0787	13.627	-2.54829	6.636	20.6179
22	14.7878	14.1992	0.58863	7.2108	21.1876
23	24.5667	17.2739	7.29278	10.2777	24.2702
24	8.9602	8.547	0.41317	1.4787	15.6154
25	8.8684	12.1669	-3.29852	5.1637	19.1701
26	8.5019	8.0425	0.45939	0.9612	15.1238
27	5.0837	2.7012	2.38251	-4.574	9.9764
28	4.3627	2.9538	1.40896	-4.31	10.2176
29	9.7851	9.2956	0.4895	2.2448	16.3464
30	13.2592	15.4189	-2.15975	8.4318	22.4061

## **SECCIÓN DE DIÁMETRO NORMAL**

Dependent Variable: AF

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	1704.095816	1704.095816	128.88	<.0001
Error	28	370.211962	13.221856		

Corrected Total	29	2074.307778
-----------------	----	-------------

R-Square	Coeff Var	Root MSE	AF Mean
0.821525	24.12140	3.636187	15.07453

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr >F
N	1	1704.095816	1704.095816	128.88	<.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr >F
N	1	1704.095816	1704.095816	128.88	<.0001

Parameter	Estimate	Standard Error	t Value	Pr >  t
Intercept	-0.394942425	1.51573766	-0.26	0.7963
N	0.090295549	0.00795363	11.35	<.0001

Obs	AF	P	R	1	S
1	27.8186	21.7627	6.05586	14.0956	29.4298
2	11.9222	12.2514	-0.32923	4.6628	19.8401
3	15.341	17.6207	-2.27972	10.0353	25.2061
4	29.9912	35.3578	-5.36657	26.9481	43.7674
5	35.7915	32.2141	3.57734	24.0354	40.3929
6	20.6356	14.783	5.85261	7.2113	22.3547
7	18.1082	12.6785	5.42974	5.0946	20.2623
8	7.4286	5.8318	1.5968	-1.9212	13.5848
9	4.6923	6.5764	-1.8841	-1.1489	14.3016
10	16.9247	16.916	0.0087	9.3372	24.4948
11	30.6418	26.7016	3.94026	18.8448	34.5584
12	15.9221	14.8046	1.11745	7.233	22.3763
13	19.011	20.6816	-1.67063	13.0428	28.3204
14	11.2542	12.2788	-1.02459	4.6905	19.8671
15	25.131	25.2872	-0.15613	17.4947	33.0797
16	12.3528	15.1184	-2.76562	7.5469	22.6899
17	11.1553	17.8585	-6.70317	10.2703	25.4467
18	17.0252	17.2211	-0.19594	9.6397	24.8025
19	6.5208	7.1233	-0.60243	-0.583	14.8295

20	5.3134	11.4425	-6.12918	3.8427	19.0424
21	11.0787	13.4364	-2.35772	5.8591	21.0137
22	14.7878	14.325	0.46283	6.7523	21.8977
23	24.5667	16.424	8.14271	8.8486	23.9994
24	8.9602	9.4352	-0.47504	1.7957	17.0748
25	8.8684	12.1307	-3.26227	4.5405	19.7208
26	8.5019	8.5617	-0.05981	0.8995	16.2239
27	5.0837	3.5064	1.57727	-4.3475	11.3604
28	4.3627	3.0659	1.29686	-4.8096	10.9413
29	9.7851	9.3075	0.47756	1.6649	16.9502
30	13.2592	17.533	-4.27386	9.9485	25.1175

### **SECCIÓN DE DIÁMETRO DE COPA VIVA**

Dependent Variable: AF

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	1765.959225	1765.959225	160.36	<.0001
Error	28	308.348553	11.012448		
Corrected Total	29	2074.307778			

R-Square    Coeff Var    Root MSE    AF Mean  
0.851349    22.01396    3.318501    15.07453

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
AC	1	1765.959225	1765.959225	160.36	<.0001

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
AC	1	1765.959225	1765.959225	160.36	<.0001

Parameter	Estimate	Standard		
		Error	t Value	Pr >  t
Intercept	-0.173325302	1.34793296	-0.13	0.8986
AC	0.149069335	0.01177172	12.66	<.0001

Obs	AF	P	R	l	S
1	27.8186	26.5699	1.2487	19.4141	33.7257
2	11.9222	11.7204	0.20176	4.7892	18.6517
3	15.341	13.5314	1.80954	6.6169	20.446
4	29.9912	25.7875	4.20371	18.6635	32.9115
5	35.7915	36.1762	-0.38473	28.4691	43.8833
6	20.6356	20.3931	0.24249	13.4297	27.3564
7	18.1082	15.4757	2.63245	8.5654	22.3861
8	7.4286	6.3327	1.09592	-0.7205	13.3859
9	4.6923	5.9528	-1.26058	-1.1129	13.0186
10	16.9247	10.7196	6.20506	3.7738	17.6655
11	30.6418	27.9292	2.71268	20.7131	35.1453
12	15.9221	17.4105	-1.48841	10.4902	24.3308
13	19.011	21.1397	-2.12877	14.1604	28.1191
14	11.2542	14.3817	-3.12748	7.4708	21.2926
15	25.131	22.7089	2.42215	15.6894	29.7284
16	12.3528	11.347	1.00575	4.4108	18.2833
17	11.1553	18.084	-6.92866	11.1569	25.0111
18	17.0252	15.7005	1.32463	8.7898	22.6113
19	6.5208	4.9293	1.59156	-2.1729	12.0315
20	5.3134	8.3105	-2.99717	1.3144	15.3066
21	11.0787	19.1226	-8.04388	12.1816	26.0635
22	14.7878	15.7536	-0.96577	8.8427	22.6645
23	24.5667	18.0954	6.47131	11.1681	25.0227
24	8.9602	10.0769	-1.11675	3.1198	17.0341
25	8.8684	10.6123	-1.7439	3.6647	17.5599
26	8.5019	8.1303	0.37161	1.1296	15.131
27	5.0837	3.2934	1.79032	-3.8746	10.4614
28	4.3627	4.6176	-0.2549	-2.4964	11.7316
29	9.7851	9.2152	0.56986	2.2405	16.1899
30	13.2592	18.7177	-5.45852	11.7826	25.6528

Anexo 3.3 Modelo de regresión para estimar área foliar mediante el área de albura en la sección de inicio de copa viva y diferenciar el efecto del aclareo en *P. patula*.

The MODEL Procedure

Nonlinear OLS Summary of Residual Errors

Equation	DF Model	DF Error	SSE	MSE	Root MSE	R-Square	Adj R-Sq
AF	3	27	291.6	10.8013	3.2865	0.8594	0.849

Nonlinear OLS Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Approx Std Err	t Value	Approx Pr >  t
A1	1.015007	0.0935	10.85	<.0001
A00	0.138656	0.0647	2.14	0.0413
A01	-0.02429	0.0257	-0.94	0.3533

Number of Observations    Statistics for System

Used	30	Objective	9.7212
Missing	0	Objective*N	291.6359

Anexo 3.4 Análisis de varianza para la eficiencia de crecimiento (*EC*) en función de la intensidad de aclareo aplicado a *P. patula*.

The ANOVA Procedure  
Dependent Variable: EC

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	1.29999333	0.25999867	2.91	0.0343
Error	24	2.14497104	0.08937379		
Corrected Total	29	3.44496437			

R-Square    Coeff Var    Root MSE    EC Mean  
0.377360    33.21719    0.298955    0.899999

Source	DF	Anova SS	Mean Square	F Value	Pr > F
PARC	5	1.29999333	0.25999867	2.91	0.0343

The ANOVA Procedure

Tukey's Studentized Range (HSD) Test for EC

NOTE: This test controls the Type I experimentwise error rate, but it generally has a higher Type II error rate than REGWQ.

Alpha	0.05
Error Degrees of Freedom	24
Error Mean Square	0.089374
Critical Value of Studentized Range	4.37265
Minimum Significant Difference	0.5846

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping		Mean	N	PARC
	A	1.3231	5	4
	A			
B	A	0.9736	5	5
B	A			
B	A	0.8326	5	6
B	A			
B	A	0.8229	5	3
B	A			
B	A	0.7631	5	1
B				
B		0.6847	5	2

Anexo 3.5 Modelo de regresión para estimar el incremento medio anual en volumen ( $IMA_V$ ) en función de área foliar ( $AF$ ) en árboles de *P. patula*.

The MODEL Procedure

Nonlinear OLS Summary of Residual Errors

Equation	DF Model	DF Error	SSE	MSE	Root MSE	R-Square	Adj R-Sq
IMA	2	28	289.3	10.332	3.2143	0.7119	0.7017

Nonlinear OLS Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Approx Std Err	t Value	Approx Pr >  t
B0	1.953464	0.53	3.69	0.001
B1	0.695828	0.0905	7.68	<.0001

Number of Observations      Statistics for System

Used	30	Objective	9.6432
Missing	0	Objective*N	289.2955

Anexo 3.6 Base de datos para análisis estadístico del capítulo tres.

ÁREA FOLIAR POR RAMA INDIVIDUAL

(NP = número de parcela, NAD = número de árbol derribado, VERT = verticilo, NR = número de rama, DBR = diámetro basal de rama, LR = longitud de rama, AR = altura de rama, ABR = área basal de rama, AF = área foliar).

NP	NAD	VERT	NR	DBR (cm)	LR (m)	AR (m)	ABR (cm <sup>2</sup> )	AF (cm <sup>2</sup> )
1	1	1	1	2.730	1.320	7.100	7.453	2834.68
1	1	5	10	2.660	2.900	8.970	7.076	5405.02
1	1	11	29	2.370	2.340	11.480	5.617	6612.20
1	1	15	38	1.510	1.470	13.190	2.280	2914.39
1	1	19	51	0.590	0.315	14.740	0.348	144.34
1	1	21	61	1.830	0.685	16.275	3.349	2285.82
1	2	1	1	2.660	3.100	6.270	7.076	4313.16
1	2	4	11	1.720	1.900	7.910	2.958	1503.94
1	2	7	19	2.440	3.140	8.990	5.954	5505.13
1	2	11	30	1.330	1.330	10.040	1.769	1907.07
1	2	12	32	0.480	0.410	10.190	0.230	287.33
1	2	16	44	0.137	0.540	12.180	0.019	1003.49
1	3	1	1	2.270	2.750	7.760	5.153	1372.24
1	3	4	9	2.440	3.150	8.900	5.954	4276.45
1	3	9	25	0.990	1.270	11.280	0.980	700.42
1	3	13	36	1.700	1.320	12.900	2.890	2139.88
1	3	17	45	0.380	0.060	14.310	0.144	62.62
1	4	2	2	4.160	4.680	8.560	17.306	14201.33
1	4	3	5	3.270	3.750	8.910	10.693	8377.31
1	4	4	8	1.380	1.730	9.420	1.904	984.78
1	4	5	10	3.610	4.130	9.840	13.032	11510.19
1	4	6	14	5.300	3.850	10.450	28.090	20115.69
1	4	7	20	1.980	1.900	11.130	3.920	5899.68
1	4	8	21	2.160	1.810	11.470	4.666	4629.12
1	4	9	26	3.380	3.269	11.530	11.424	11236.25
1	4	10	27	1.490	1.630	11.680	2.220	2223.82
1	4	11	36	2.110	2.200	12.080	4.452	4266.26
1	4	12	38	2.090	1.880	12.500	4.368	3385.09
1	4	13	40	2.440	2.110	12.970	5.954	5019.30
1	4	15	48	0.670	0.460	13.890	0.449	430.41
1	4	16	50	1.200	0.570	14.400	1.440	1446.39
1	4	18	59	1.500	1.240	15.240	2.250	1561.00
1	4	19	64	0.590	0.170	15.870	0.348	27.05
1	4	20	68	1.990	0.730	16.600	3.960	1485.72
2	6	1	1	3.200	3.270	6.790	10.240	6249.99
2	6	2	5	1.610	2.140	7.100	2.592	706.57

2	6	3	7	2.980	3.180	7.580	8.880	4212.23
2	6	4	10	2.610	2.500	8.000	6.812	3053.03
2	6	5	15	2.660	3.100	8.550	7.076	4137.41
2	6	6	19	2.440	2.760	8.670	5.954	4508.35
2	6	7	22	1.730	1.200	8.980	2.993	2324.66
2	6	8	26	3.090	2.420	9.370	9.548	10903.88
2	6	9	31	1.100	0.610	9.980	1.210	618.89
2	6	10	33	1.660	0.520	10.260	2.756	3012.75
2	6	11	36	2.050	1.920	10.860	4.203	4178.46
2	6	12	39	1.770	1.720	11.060	3.133	2656.72
2	6	13	46	1.830	1.350	11.850	3.349	2352.58
2	6	14	50	0.590	0.260	12.350	0.348	262.49
2	6	15	52	1.610	1.180	12.920	2.592	1293.82
2	6	16	55	1.090	0.640	13.260	1.188	691.48
2	6	17	58	0.720	0.400	13.570	0.518	275.85
2	6	18	61	0.720	0.130	13.830	0.518	26.74
2	6	19	64	1.330	0.340	14.170	1.769	1385.30
2	7	2	3	3.110	4.420	6.550	9.672	5548.93
2	7	7	13	1.920	2.250	8.650	3.686	3081.28
2	7	10	21	2.620	3.000	10.220	6.864	3160.18
2	7	17	41	1.600	1.460	12.720	2.560	2680.87
2	7	21	54	1.000	0.740	14.280	1.000	678.43
2	8	2	2	1.700	2.200	7.070	2.890	1605.44
2	8	5	11	1.600	1.930	8.290	2.560	1970.31
2	8	8	21	1.600	1.430	9.570	2.560	2823.54
2	8	11	32	1.440	1.110	10.970	2.074	2469.55
2	8	14	44	0.800	0.660	11.950	0.640	402.04
2	8	16	52	1.240	0.560	13.050	1.538	1906.32
3	12	2	2	2.380	2.580	8.230	5.664	2298.68
3	12	5	10	1.610	2.130	9.720	2.592	3830.35
3	12	9	19	1.730	1.740	11.150	2.993	1473.74
3	12	15	42	1.730	1.550	13.470	2.993	3010.02
3	12	18	55	1.550	1.260	14.590	2.403	1626.85
3	13	8	21	1.630	1.910	10.760	2.657	4718.94
3	13	11	29	1.400	1.620	11.920	1.960	2971.95
3	13	12	30	1.920	1.570	12.250	3.686	1790.71
3	13	16	46	0.930	0.780	13.550	0.865	328.50
3	13	18	53	1.500	0.890	14.570	2.250	664.64
3	15	1	1	2.640	3.800	8.770	6.970	5160.09
3	15	3	10	2.860	3.880	10.340	8.180	9125.40
3	15	7	23	2.290	2.400	12.740	5.244	5885.25

3	15	8	28	2.100	2.420	13.440	4.410	4070.77
3	15	12	38	1.600	1.540	17.320	2.560	1677.23
3	15	13	43	2.740	1.900	19.220	7.508	3333.26
4	16	2	2	2.790	3.020	8.870	7.784	5697.38
4	16	7	15	1.400	1.600	11.840	1.960	2515.25
4	16	10	25	1.740	1.840	12.900	3.028	4103.66
4	16	14	40	1.360	1.220	14.450	1.850	1273.17
4	16	18	55	0.480	0.300	15.900	0.230	79.36
4	18	2	3	3.400	3.680	7.520	11.5600	8472.51
4	18	7	15	2.300	2.800	9.030	5.2900	6513.41
4	18	11	32	0.030	0.020	10.400	0.0009	708.02
4	18	15	43	0.620	1.920	11.670	0.3844	619.74
4	18	19	57	0.620	0.590	13.050	0.3844	587.53
4	18	25	76	1.420	0.510	15.980	2.0164	2550.16
4	19	2	2	1.800	2.180	11.200	3.240	2672.49
4	19	3	5	2.130	2.320	11.750	4.537	3561.17
4	19	4	9	1.350	1.670	12.140	1.823	2074.76
4	19	5	11	2.370	2.260	12.690	5.617	5482.17
4	19	7	16	1.200	0.830	13.410	1.440	1212.78
4	19	8	17	1.220	1.350	14.400	1.488	2563.82
4	19	9	22	1.250	1.370	14.730	1.563	2627.82
4	19	10	27	0.500	0.650	14.820	0.250	844.81
4	19	11	31	0.350	0.420	15.120	0.123	414.04
4	19	12	35	0.200	0.060	15.420	0.040	121.52
4	19	14	38	0.500	0.430	15.880	0.250	242.20
4	19	15	42	1.090	0.490	16.370	1.188	1296.78
5	22	5	7	2.300	2.470	9.070	5.290	3391.77
5	22	13	24	2.320	2.420	13.260	5.382	4769.49
5	22	16	33	1.720	2.320	13.930	2.958	2369.93
5	22	26	59	0.700	0.680	17.090	0.490	64.01
5	22	27	62	0.540	0.350	17.500	0.292	225.39
5	23	6	8	3.290	4.220	9.350	10.824	11613.77
5	23	10	20	1.030	1.570	11.190	1.061	1669.65
5	23	16	40	0.600	0.300	13.050	0.360	503.45
5	23	18	49	1.310	1.400	13.910	1.716	3006.00
5	23	21	63	0.260	0.070	15.150	0.068	60.89
5	23	27	86	0.700	0.320	17.270	0.490	2243.47
5	24	3	5	1.630	1.910	10.620	2.657	2881.08
5	24	6	14	1.230	1.800	11.950	1.513	2923.05
5	24	9	18	1.000	1.330	13.450	1.000	1679.70
5	24	11	24	0.600	0.840	14.500	0.360	932.34

5	24	13	31	0.300	0.230	15.400	0.090	136.32
6	26	2	3	2.560	3.550	8.900	6.554	3458.46
6	26	5	14	2.140	2.090	10.320	4.580	2816.47
6	26	9	23	1.510	1.670	11.190	2.280	1765.46
6	26	13	30	1.450	1.450	13.350	2.103	1479.71
6	26	15	36	1.050	0.770	14.070	1.103	663.92
6	27	3	4	1.380	1.840	8.850	1.904	2685.47
6	27	4	8	1.400	1.630	9.430	1.960	1782.72
6	27	5	14	0.980	0.990	9.900	0.960	1407.77
6	27	6	15	0.460	0.430	10.200	0.212	294.27
6	27	7	18	1.150	1.160	10.860	1.323	1881.71
6	27	8	22	1.280	1.300	13.270	1.638	2045.19
6	27	9	24	1.180	1.020	13.720	1.392	1687.46
6	27	10	28	1.240	1.070	14.160	1.538	1599.70
6	27	11	33	0.950	0.870	14.730	0.903	728.01
6	27	12	37	0.600	0.410	15.090	0.360	221.51
6	27	13	39	0.970	0.670	15.760	0.941	1489.18
6	28	3	5	0.900	1.620	7.290	0.810	1082.81
6	28	5	10	1.450	2.270	8.140	2.103	3350.32
6	28	9	20	1.070	1.460	9.870	1.145	1395.74
6	28	12	28	0.670	0.840	11.020	0.449	693.12
6	28	15	37	0.300	0.380	12.330	0.090	93.49
6	29	2	3	2.380	3.100	7.220	5.664	3621.72
6	29	5	18	1.230	1.920	8.800	1.513	2071.29
6	29	8	25	1.360	1.800	10.210	1.850	1979.76
6	29	11	39	0.500	0.520	11.120	0.250	400.42
6	29	13	45	0.630	0.640	13.120	0.397	279.67

## ÁREA DE ALBURA Y ÁREA FOLIAR POR ÁRBOL

(NAD = número de árbol derribado, DT = diámetro de tocón, DN = diámetro normal, DCV = diámetro de copa viva, A = área de albura en dt, dn y dcv, AF = área foliar).

Parcela	NAD	DT (cm)	DN (cm)	DCV (cm)	Adt (cm <sup>2</sup> )	Adn (cm <sup>2</sup> )	Adcv (cm <sup>2</sup> )	MODEL 1 (AF, m <sup>2</sup> )	MODEL 2 (AF, m <sup>2</sup> )	MODEL 3 (AF, m <sup>2</sup> )
1	1	21.35	20.22	15.16	262.46	245.39	179.40	27.84	27.82	27.54
1	2	16.9	15.55	10.58	156.63	140.06	79.79	11.40	11.92	9.88
1	3	19.1	18.55	11.75	212.10	199.52	91.94	15.20	15.34	14.78
1	4	27.6	25.28	15.98	396.68	395.95	174.15	30.09	29.99	30.32
1	5	26.3	23.63	19	439.77	361.14	243.84	35.33	35.79	39.27
2	6	22.02	18	14.2	222.23	168.09	137.97	20.46	20.64	19.13
2	7	16.35	15	12.4	158.33	144.78	104.98	17.96	18.11	16.38
2	8	12.9	10.38	8.2	85.34	68.96	43.64	7.25	7.43	5.77
2	9	14.12	11.2	8.03	95.17	77.21	41.10	4.26	4.69	3.09
2	10	19.6	18.35	10.3	205.51	191.71	73.07	16.44	16.92	15.56
3	11	25.88	22	16.38	355.01	300.09	188.52	30.84	30.64	27.87
3	12	20.75	18.1	13.3	212.01	168.33	117.96	16.74	15.92	16.54
3	13	21.35	19.9	14.25	242.67	233.42	142.97	19.14	19.01	17.78
3	14	15.7	15.23	12.48	145.17	140.36	97.64	11.00	11.25	12.29
3	15	22.03	20.9	16.22	325.29	284.42	153.50	24.97	25.13	29.13
4	16	19.15	15.83	10.3	178.79	171.81	77.28	11.82	12.35	12.00
4	17	21.4	18.2	12.9	253.06	202.15	122.48	11.22	11.16	12.03
4	18	19.3	17.05	12.78	227.51	195.09	106.49	16.48	17.03	15.59
4	19	14.1	11.3	7.1	101.11	83.26	34.23	6.28	6.52	6.28
4	20	17.85	16.23	8.93	146.19	131.10	56.91	5.06	5.31	5.33
5	21	16.88	15.9	14.25	174.88	153.18	129.44	10.99	11.08	10.08
5	22	19.15	17.1	12.2	181.88	163.02	106.84	15.03	14.79	16.15
5	23	20.85	18.5	12.88	219.50	186.27	122.55	24.35	24.57	25.64
5	24	14.8	12.65	10.6	112.72	108.87	68.76	8.60	8.96	9.24
5	25	17.65	15.3	9.95	157.01	138.72	72.35	8.44	8.87	8.07
6	26	13.35	12.3	8.75	106.55	99.19	55.70	8.41	8.50	7.07
6	27	8.2	7.93	5.73	41.19	43.21	23.26	5.05	5.08	4.38
6	28	8.6	8.13	6.3	44.28	38.33	32.14	4.07	4.36	3.17
6	29	15.05	13.3	9.8	121.88	107.45	62.98	9.61	9.79	8.58
6	30	19.23	18.68	12.93	196.81	198.55	126.73	12.80	13.26	13.35

Anexo 4.1 Modelo de regresión que evalúa el efecto del aclareo sobre la biomasa acumulada de madera con corteza en el fuste de *P. patula*.

The MODEL Procedure

Nonlinear OLS Summary of Residual Errors

Equation	DF Model	DF Error	SSE	MSE	Root MSE	R-Square	Adj R-Sq
BMAcc	5	486	20748.1	42.6915	6.5339	0.962	0.9617

Nonlinear OLS Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Approx Std Err	t Value	Approx Pr >  t
A00	0.010654	0.00101	10.56	<.0001
A0A	-0.00071	0.000262	-2.71	0.0069
A1	1.02675	0.0107	96.12	<.0001
B00	0.013684	0.000195	70.32	<.0001
B0A	-0.00074	0.00079	-0.94	0.3466

Number of Observations      Statistics for System

Used	491	Objective	42.2568
Missing	29	Objective*N	20748

Anexo 4.2 Estimación de biomasa acumulada en madera en función al diámetro normal (DN) a diversas alturas (AT) en árboles de *P. patula* bajo aclareo (Acl) y testigo (Test) en Ixtlán, Oaxaca.

DN (cm)	<u>AT = 10 m</u>		<u>AT = 12 m</u>		<u>AT = 14 m</u>		<u>AT = 16 m</u>		<u>AT = 18 m</u>		<u>AT = 20 m</u>	
	Acl.	Test.	Acl.	Test.	Acl.	Test.	Acl.	Test.	Acl.	Test.	Acl.	Test.
5	3.09	2.88	3.72	3.47	4.36	4.07	5.00	4.67	5.65	5.27	6.29	5.87
7	6.16	5.75	7.43	6.93	8.70	8.12	9.98	9.32	11.27	10.52	12.55	11.72
9	10.32	9.63	12.45	11.62	14.58	13.61	16.73	15.61	18.88	17.62	21.03	19.63
11	15.59	14.55	18.80	17.54	22.02	20.55	25.25	23.57	28.50	26.60	31.76	29.64
13	21.97	20.50	26.49	24.72	31.03	28.96	35.59	33.22	40.16	37.49	44.75	41.77
15	29.47	27.51	35.54	33.17	41.63	38.86	47.75	44.57	53.88	50.29	60.04	56.04
17	38.11	35.57	45.95	42.89	53.83	50.24	61.74	57.63	69.68	65.03	77.64	72.46
19	47.88	44.69	57.74	53.89	67.64	63.13	77.58	72.41	87.56	81.72	97.56	91.06
20	53.20	49.66	64.15	59.88	75.16	70.15	86.20	80.46	97.28	90.80	108.40	101.17
22	64.70	60.39	78.02	72.82	91.40	85.31	104.84	97.85	118.31	110.43	131.83	123.04
24	77.36	72.21	93.29	87.07	109.29	102.00	125.34	116.99	141.46	132.03	157.62	147.12
26	91.18	85.11	109.95	102.63	128.81	120.23	147.74	137.89	166.73	155.62	185.78	173.40

Anexo 4.3 Modelo de regresión que evalúa el efecto del aclareo sobre la distribución de biomasa foliar en *P. patula*.

The MODEL Procedure  
Nonlinear OLS Summary of Residual Errors

Equation	DF Model	DF Error	SSE	MSE	Root MSE	R-Square	Adj R-Sq
BFacu	5	456	218.8	0.4797	0.6926	0.8904	0.8894

Nonlinear OLS Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Approx Std Err	t Value	Approx Pr >  t
A0	0.022651	0.00235	9.62	<.0001
b11	0.18611	0.0431	4.31	<.0001
b1a	-0.1822	0.0431	-4.23	<.0001
b22	2.276297	0.3848	5.92	<.0001
b2a	-1.51057	0.4149	-3.64	0.0003

Number of Observations      Statistics for System

Used	461	Objective	0.3888
Missing	59	Objective*N	179.2257

Anexo 4.4 Modelo de regresión que evalúa el efecto del aclareo sobre la distribución de biomasa en ramas de *P. patula*.

The MODEL Procedure  
Nonlinear OLS Summary of Residual Errors

Equation	DF Model	DF Error	SSE	MSE	Root MSE	R-Square	Adj R-Sq
BRac	4	457	812.8	1.7785	1.3336	0.9048	0.9042

Nonlinear OLS Parameter Estimates

Parameter	Estimate	Approx Std Err	t Value	Approx Pr >  t
A0	0.053075	0.00149	35.69	<.0001
b1	0.576106	0.0429	13.41	<.0001
b22	20.18784	4.9195	4.1	<.0001
b2a	1.777954	3.1433	0.57	0.5719

Number of Observations    Statistics for System

Used	461	Objective	1.7630
Missing	59	Objective*N	812.7638