

## INFORME TECNICO FINAL

**FECHA DE ENTREGA:** 20/12/2011

### PROGRAMA

HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN Y TOMA DE DECISIONES ORIENTADA A LA PRODUCTIVIDAD Y OFERTA DE SERVICIOS AMBIENTALES EN PLANTACIONES FORESTALES EN COLOMBIA.

### PROYECTO

AJUSTE, VALIDACIÓN Y AMPLIACIÓN DEL MODELO DE CRECIMIENTO Y CAPTURA DE CARBONO PARA ESPECIES EN EL TRÓPICO - CREFT.

**N°CONVENIO** 117/05

**N°CONTRATO** 028-2007K5702-359-07

**TIEMPO DE EJECUCIÓN TOTAL:** 42 meses

**FECHA DE INICIACIÓN:** Febrero 1 de 2008

**FECHA DE FINALIZACIÓN:** Agosto 1 de 2011

#### 1. Prórrogas

No. Prórroga	Meses	Desde	Hasta
1	6 meses	02/02/2011	01/08/2011

#### 2. Desembolsos

No. Desembolso	%	Valor	Fecha	Entidad
1	40	382.216.418	01/02/2008	MADR-FIDUAGRARIA
2	40	382.216.418	04/12/2008	MADR-FIDUAGRARIA
3	20	191.108.209	16/02/2010	MADR-FIDUAGRARIA

## ENTIDADES MIEMBROS DE LA ALIANZA

<b>Sector productivo</b>	Cartón de Colombia S.A	NIT. 890300406
	Fundación Ecológica Cafetera	NIT. 810001305
	Pizano S.A	NIT. 860003009
	Reforestadora El Guásimo S.A.	NIT. 890940852
	Reforestadora del Caribe S.A	NIT. 890405325
	Reforestadora de la Costa S.A.	NIT. 890110147
<b>Sector académico</b>	Universidad Nacional de Colombia	NIT. 99999633
<b>Investigación</b>	Federación Nacional de Cafeteros de Colombia – Centro Nacional de Investigaciones del Café CENICAFÉ	NIT. 860007538

## INTRODUCCION

Colombia es un país con un alto potencial de desarrollo forestal pero se requiere aplicar un manejo silvicultural ordenado y adecuado, a nivel de especies forestales es valioso conocer el comportamiento de cada una de ellas en los sitios de vocación para apoyar los procesos de planificación de los proyectos productivos y/o de compensación ambiental.

Durante los últimos años con el avance en los sistemas computacionales y el conocimiento de la respuesta de las plantas al ambiente ha sido posible el desarrollo de herramientas de simulación para diferentes cultivos, los investigadores usan estos modelos para estudiar diferentes problemas relacionados con los sistemas de producción como por ejemplo, el manejo del riego, de las plagas y enfermedades, la programación de cosechas, la planificación del uso de la tierra, la rotación de cultivos y los pronósticos de producción. En su estado más avanzado, estas aplicaciones se han denominado como Agricultura de Precisión (Montoya *et al* 2009)

Para una mejor comprensión de las interacciones planta – medio ambiente y su relación con el crecimiento es importante determinar la forma en que éstas aprovechan la cantidad de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y de agua que hay en su entorno y los mecanismos asociados a dicha relación. A continuación se describe la importancia de algunos de estos mecanismos.

Las plantas utilizan el CO<sub>2</sub> para elaborar carbohidratos mediante el proceso fotosintético y como producto de dicho proceso son las responsables de la producción de todo el O<sub>2</sub> de

la atmósfera y de la fijación anual de cerca de 1011 toneladas de carbono a partir del CO<sub>2</sub> en los compuestos orgánicos (Bowyer & Leegood, 1997). Las plantas capturan CO<sub>2</sub> a través de los estomas y es allí en donde se lleva a cabo el intercambio más importante de H<sub>2</sub>O y dióxido de carbono, la apertura estomática es determinante no solo en la transpiración sino también en la fotosíntesis, la concentración de CO<sub>2</sub> intercelular (C<sub>i</sub>) es un fuerte regulador de la apertura estomática, la fotosíntesis por tanto es limitada por C<sub>i</sub> a los sitios de carboxilación. (Tholen and Zhu, 2011). La conductancia estomática es un indicador directo del estado de turgencia de la planta ya que a medida que aumenta el estrés hídrico la conductancia estomática disminuye (Rada et al., 2005).

La transpiración es un factor dominante en las relaciones del agua y la planta, porque la evaporación del agua produce un gradiente de energía que causa el movimiento del agua a través de las plantas. Por lo tanto, controla la velocidad de absorción y el ascenso de la savia provocando un déficit de agua casi a diario. Cientos de kilogramos de agua son utilizados por las plantas por cada kilogramo de materia seca producido, alrededor del 95% del agua absorbida simplemente pasa a través de la planta y se pierde por transpiración. (Pallardy *et al.*, 2008).

La fotosíntesis se encuentra estrechamente relacionada con la luz por ser un proceso fotoquímico que está dado por la absorción de fotones en una longitud de onda entre los 400 a los 700 nm. De manera general del conjunto de este rango de radiación, la hoja refleja el 10% de la energía incidente, transmite el 10% y absorbe cerca del 80%. Estos datos sólo tienen un valor indicativo ya que varían de una especie a otra y según las condiciones de cultivo. La parte de ésta energía absorbida por la hoja es la que permite una fijación neta de 3 a 60 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> según la condición y especie. La mayor parte de la absorción de luz y la casi totalidad de las reacciones que acompañan las carboxilaciones fotosintéticas se llevan a cabo dentro de los cloroplastos. Estos organitos son el asiento de las conversiones energéticas que ocurren en las laminillas durante acontecimientos que se desarrollan en un lapso sumamente breve, de 10-2 segundos. La absorción de un cuanto, la separación de las cargas eléctricas y la transferencia de electrones se realizan en una gama de tiempo extendida pero formada por unidades temporales muy pequeñas. (Bowyer & Leegood, 1997).

La temperatura es de fundamental importancia en el proceso fotosintético ya que afecta directamente las tasas de la actividad metabólica en los tejidos vegetales y por lo tanto la productividad de un cultivo. Las plantas muestran un óptimo de temperatura para realizar la fotosíntesis y cuando se salen de este valor disminuye la asimilación de carbono (D'Ambrosio *et al.*, 2006). En las regiones tropicales, la temperatura está correlacionada negativamente con la altitud, los cultivos con temperatura óptima alta se desarrollan mejor en elevaciones más bajas que los cultivos cuya temperatura óptima es baja. En general los procesos fisiológicos de la planta se restringen cuando las temperaturas son demasiado bajas (según la especie), llegan a su óptimo al alcanzar una temperatura mayor y cesan de nuevo cuando las temperaturas son demasiado altas (Fageria *et al.*, 2011). Aunque hay excepciones, los cultivos con metabolismo de fotosíntesis C4 son más tolerantes a las altas temperaturas y más sensibles a las bajas que los cultivos con fotosíntesis C3, un ejemplo es la caña de azúcar y maíz que son capaces de crecer mejor bajo altas temperaturas que el trigo y la cebada las cuales son C3 (Edwards *et al.*, 1983).

La arquitectura y la interceptación de la radiación por el dosel son determinantes en el crecimiento de los árboles ya que de éstos factores entre otros, depende la adquisición de recursos (luz, agua, y nutrientes) y la eficiencia en la utilización de éstos para la fotosíntesis y posteriormente generación de tejido maderable (Binkley *et al.*, 2010); en

este sentido el área foliar y la interceptación de luz por el dosel tienen una relación directa con la acumulación de materia seca y por ende con la productividad de un cultivo. El desarrollo foliar como principal tejido fotosintético es uno de los factores que tienen mayor importancia en la interceptación de la radiación. El Índice de Área Foliar (IAF) definido tradicionalmente como el área proyectada de la hoja por unidad de suelo (Asner *et al.*, 2003; Fournier *et al.*, 2003) es un importante atributo estructural de los ecosistemas forestales el cual ha permitido realizar modelos e investigaciones de evapotranspiración, estimativos de producción forestal, capacidad de captura de carbono entre otros (Bolstad y Gower, 1990).

Los estudios de interceptación de radiación generalmente se hacen mediante modelos que involucran cantidad, dimensión y orientación del follaje, distribución del área foliar, ángulos de inserción de las ramas y hojas y la radiación solar directa y difusa (Ross, 1981). La aplicación de estos modelos se hace complicada debido a que incorpora todos estos aspectos. Existen modelos de radiación los cuales tratan de describir el comportamiento de la luz a través del follaje en plantas individuales, en follajes densos (Saeki, 1993) y en follajes discontinuos (Jackson y Palmer, 1979). Estos modelos se basan en la ley de Beer citada por Jones en 1992 la cual establece que la radiación solar que penetra en la parte aérea de la planta disminuye exponencialmente con el índice de área foliar acumulado y está en función de la absorción y reflexión de fotones con frecuencia y longitud de onda determinadas y, de la concentración de moléculas que interfieren el paso de la misma.

El valor del coeficiente de extinción de la luz a través del dosel para una especie vegetal, depende directamente de su arquitectura y particularmente de su área foliar. Lo anterior permite de manera directa estimar el IAF de la especie en un momento determinado, realizando mediciones de la energía luminosa en el tope del dosel y en una profundidad determinada del mismo.

La estructura del dosel está relacionada con la cantidad y distribución espacial de las ramas, hojas y frutos en la fronda. Dentro de ésta, la orientación del follaje, que intercepta y convierte la energía luminosa en energía química, es la de mayor importancia y puede ser medida como la distribución de los ángulos de inserción con respecto a la horizontal y su posición azimutal con respecto al norte (De Wit, 1965; Norman y Campbell, 1989). De su distribución dependerá la transmisión, absorción y reflexión de la energía luminosa, factor determinante del balance energético en la planta y por lo tanto de su actividad fotosintética y transpiratoria.

Según (De Wit, 1965) Las especies vegetales se pueden clasificar de acuerdo con los ángulos de inserción de sus hojas en: 1. Planófilas en las cuales la mayor parte de los ángulos de inserción están entre 0° y 30° con respecto a la horizontal. 2. Erectófilas: la mayor parte de los ángulos de inserción están entre 60° y 90° con respecto a la horizontal y 3. Plagiófilas: la mayor parte de los ángulos de inserción están entre 30° y 60° con respecto a la horizontal.

Por todo lo anterior el proceso fotosintético acompañado de los factores descritos anteriormente, lo hacen el principal sumidero de carbono de la atmósfera lo cual resalta la importancia de los bosques naturales y las plantaciones forestales como grandes fijadores de CO<sub>2</sub>.

La cuantificación de los resultados del proceso y la afectación por los factores ambientales cobra mucha importancia dentro del cambio climático actual debido al recalentamiento global que causan los gases de efecto invernadero (GEI) como el CO<sub>2</sub>.

La temperatura promedio de la superficie terrestre (temperatura del aire cerca de la superficie continental y oceánica) se ha incrementado desde 1861. Estimaciones recientes de la NASA y el National Climatic Data Center muestran que 2005 y 2010 fueron los años más calurosos del planeta desde que las mediciones instrumentales fiables están disponibles a partir de finales del siglo XIX, superando a 1998 por unas centésimas de grado (NASA, 2011). La temperatura medida por sondas atmosféricas en los primeros 8 kilómetros sobre la superficie desde 1950, muestra incrementos del orden de 0.1°C por década. Los datos satelitales recolectados en conjunto con las sondas atmosféricas a partir de 1979 muestran que la temperatura global en los mismos 8 kilómetros ha cambiado  $+0.5 \pm 0.1^\circ\text{C}$  por década, pero el promedio de la temperatura superficial se ha incrementado significativamente en  $+0.15 \pm 0.05^\circ\text{C}$  por década, principalmente en las regiones tropicales y subtropicales (IPCC, 2001).

Colombia ratificó la (CMNUCC) en 1994, por ser país en vía de desarrollo, no tiene compromisos, metas concretas y obligación de reducir sus emisiones de GEI (GIECC, 2000a, 2000b). La primera comunicación Colombiana ante la CMNUCC (IDEAM, 2001), muestra cómo las actividades relacionadas con el uso de combustibles fósiles, los procesos industriales y el cambio en el uso de la tierra y la silvicultura, emitieron 63.510 Gg de CO<sub>2</sub> en 1990 y 77.103,9 Gg en 1994. La segunda comunicación presenta un total de 180.010 Gg correspondientes al 0.37% del total en el mundo para el año 2004 (IDEAM 2010)

En la estrategia Colombiana de implementar el MDL, el Ministerio del Medio Ambiente ha identificado la captura de carbono por especies vegetales en sistemas forestales, agroforestales y silvopastoriles, como una oportunidad que puede contribuir al desarrollo económico y social del país, en términos de la restauración de fuentes de agua, controlar procesos críticos de erosión, conservación de la biodiversidad de ecosistemas tropicales y andinos hoy fuertemente amenazados, protección de recursos genéticos, generación de empleo y mitigación de pobreza, entre otros. (IDEAM, 2001). Actualmente se encuentran registrados 4 proyectos forestales en Colombia con propósitos de reducción equivalentes a 174330 toneladas de CO<sub>2</sub> (UNFCCC, 2011)

A partir de la ejecución de este proyecto se cuenta con una herramienta desarrollada y validada para las condiciones de nuestro país al parametrizar el modelo de simulación ecofisiológica CREFT y el modelo complemento de simulación de datos climáticos SimClim.

## RESUMEN

El “Modelo de crecimiento y captura de carbono para especies en el trópico CREFT” es una herramienta que permite simular el crecimiento y la captura de carbono para las siguientes 12 especies forestales nativas o introducidas en condiciones del trópico: (*Acacia mangium*, *Alnus acuminata*, *Cordia alliodora*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus pellita*, *Pinus caribea*, *Pinus patula*, *Pinus tecunumanii*, *Gmelina arborea*, *Pachira quinata*, *Tabebuia rosea* y *Tectona grandis*). El modelo cuantifica la acumulación de biomasa y el carbono, en cada uno de los compartimentos u órganos, mediante la simulación de

procesos físicos y fisiológicos como la fotosíntesis, la respiración y la partición de los asimilados en respuesta a la información climática del lugar de desarrollo de la plantación (brillo solar diario, temperatura máxima y mínima diaria). Ésta herramienta produce salidas en forma de tablas y gráficas.

Para el desarrollo del modelo se realizaron mediciones de intercambio gaseoso en diferentes condiciones ambientales con el propósito de conocer la respuesta de la fotosíntesis a la radiación fotosintéticamente activa y a la temperatura, así a partir de los modelos matemáticos se determinaron los parámetros de eficiencia cuántica, respiración oscura y asimilación máxima. Se evaluó la interceptación de la radiación fotosintética por el dosel de las plantas, para ello se midió la cantidad de radiación fotosintética sobre la copa de los árboles y a través de ella determinando el parámetro de coeficiente de extinción de la luz ( $k$ ), se midió el ángulo de inclinación foliar obteniendo la caracterización de la arquitectura de la copa de los árboles para diferentes edades.

Se determinó la distribución de la biomasa de árboles en plantación de diferentes edades y se midió el crecimiento en longitud, DAP y volumen, se tomaron muestras las cuales se secaron y se obtuvo la relación de peso seco, también se les realizaron análisis de laboratorio para determinar el contenido de carbono y otros nutrientes.

Para la operatividad del software CREFT, a nivel computacional se programaron los procesos matemáticos en el sistema de gestión de base de datos relacional PostgreSQL, los valores diarios de las variables climáticas de entrada al modelo se pueden completar en caso de datos faltantes a través de la herramienta SimClim V1.0 desarrollada también como complemento al sistema CREFT.

El modelo se encuentra disponible para el uso en entorno Web, a nivel académico aporta a la comprensión de las interacciones genético-fisiológico-ambientales, con una estrategia interdisciplinaria, permite definir estrategias de producción en la etapa de planificación de una nueva siembra o ayudar en la toma de decisiones durante el ciclo de la plantación en prácticas silviculturales tales como fertilización y para determinar la mejor temporalidad de venta de certificados de reducción de emisiones entre otros.

## **OBJETIVO GENERAL**

Ajustar y validar los parámetros incluidos en el modelo CREFT y construir, validar e incorporar nuevas especies.

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

- Obtener los parámetros de los modelos de de acumulación y distribución de biomasa y de minerales en los diferentes compartimentos estructurales, modelos de respuesta fotosintética, arquitecturales de interceptación de radiación en las especies: *Tectona grandis*, *Acacia mangium* y *Pinus tecunumanii*.
- Validar y ajustar el modelo CREFT para las especies: *Pinus patula*, *Pinus carabea*, *Gmelina arborea*, *Pachira quinata*, *Eucalyptus pellita*, *Eucalyptus grandis*, *Alnus acuminata*, *Tabebuia rosea*, *Cordia alliodora*, *Tectona grandis*, *Acacia mangium* y *Pinus tecunumanii*.

# MODELOS DE ACUMULACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE BIOMASA, FIJACIÓN DE CARBONO Y EXTRACCIÓN DE NUTRIMENTOS, EN FUNCIÓN DE LA EDAD DE LA PLANTACIÓN Y EL TIEMPO TÉRMICO

## METODOLOGÍA

Con el propósito de obtener modelos de crecimiento y la distribución de la biomasa en el total del árbol se realizó la selección de lotes en plantaciones de diferentes edades a partir de la disponibilidad de aéreas sembradas y de la información de las reforestadoras socias del proyecto, para cada una de las especies se seleccionaron plantaciones que presentaran rendimientos considerados óptimos o potenciales, por cada edad diferente (entre 13 y 8 edades por especie) se tomaron 5 parcelas correspondientes a cinco repeticiones por edad.

Para el trazado de cada parcela se instaló en el suelo un estación mayor a 1.5 m o se escogió en forma aleatoria un árbol como centro del lote, a partir de éste se midió un radio de 8.93m para lograr una parcela de 250 m<sup>2</sup>, los árboles incluidos en ella, se marcaron, numeraron y luego se midió su diámetro normal a 1.3m de altura (dn) que es equivalente al diámetro a la altura del pecho (DAP).

Con el dn se calculó el área basal por árbol (G<sub>xi</sub>) de acuerdo con la siguiente relación:

$$G_{xi} = \frac{\pi d_n^2}{4} \quad (1)$$

Luego se calculó el área basal de la parcela (G), mediante la sumatoria de las áreas basales individuales,  $G = \sum_{i=1}^n G_{xi}$

El área basal de la parcela (G) se dividió por el número de árboles dentro de la parcela, obteniendo el área basal promedio  $\bar{G} = G/n$ , donde n = número de árboles por parcela

De la relación (1) se despejó dn, obteniendo el diámetro normal promedio (dnx), también denominado diámetro cuadrático (dqx), se seleccionó el árbol dentro de la parcela que presentara el diámetro más aproximado al valor de diámetro cuadrático y que en sus características morfológicas y de sanidad fuera representativo de los individuos encontrados en la plantación.

Una vez seleccionado el árbol se midió el diámetro de proyección de la copa en sentido norte – sur y este – oeste, se procedió a apear el árbol, se midió la longitud total y se marcó el tallo en diez secciones de igual tamaño comenzando de manera ascendente desde la sección 1 hasta la sección 10 las cuales se trozaron y organizaron para las posteriores medidas.

A cada troza se midió el diámetro en la parte inferior y superior y el espesor de corteza en cuatro partes equidistantes también de cada extremo de la sección, se registró el peso fresco de cada sección y se obtuvo una muestra rodela de cada una de las secciones 2,

5, 8 del tallo, de estas se registró el peso fresco y se codificó para posterior seguimiento y análisis de laboratorio. A cada muestra de tallo se retiró la corteza la cual también se pesó por separado y se guardó como muestra codificada en bolsa de papel.

Previamente se retiraron las ramas y las hojas las cuales se pesaron en fresco y de las cuales se tomaron muestras para obtener peso seco, las ramas se separaron en categoría gruesa y delgada de la misma manera que la raíz la cual se extrajo en su totalidad, se pesó en fresco y tomaron muestras de 250g separadas por categoría gruesa y delgada, igualmente se pesó el total de flores, frutos y ramas secas que se pudieran presentar en los árboles seleccionados, igualmente de éstas últimas partes se tomaron muestras de 250g.

A las muestras colectadas y pesadas en fresco se les realizó presecado en campo con el propósito de evitar daño por hongos, posteriormente se enviaron a Cenicafé donde se secaron en horno a 70°C para registrar peso seco, a partir de los datos de peso seco se obtuvo el cálculo del peso seco total por órgano y sumatoria total por árbol, los datos de campo y laboratorio se registraron en bases de datos en archivos Excel a partir de los cuales se realizaron modelos de crecimiento en función del tiempo térmico usando el programa SigmaPlot 10.0 y los parámetros obtenidos se ingresaron en el sistema programado CREFT.

### **Preparación muestras, secado y análisis de carbono**

Además de las muestras de biomasa pertenecientes a órganos adheridos al árbol se revisó la biomasa de componentes como la hojarasca y detritos muertos de mayor tamaño a la hojarasca localizada en la superficie del suelo, para ello se recogió en la parcela inicialmente trazada de 250m<sup>2</sup> todos los restos de madera muerta con diámetro superior a 10 cm la cual se le denominó Necromasa gruesa, se pesó la totalidad de éste material recolectado y se tomó una muestra de 250g, posteriormente a partir del centroide inicial se trazó otra parcela de 100 m<sup>2</sup> en la cual se recolectó el material muerto de entre 10 y 5 cm de diámetro al que se le denominó Necromasa fina, se le tomó el peso total y se tomó muestra de 250g.

En el perímetro de la parcela de 100 m<sup>2</sup> anteriormente mencionada en tres puntos equidistantes se trazaron parcelas cuadradas de 50cm de lado (0.5 m<sup>2</sup>), en ellas se recogió la hojarasca y trozos de madera muerta con diámetro inferior a 5 cm de diámetro a la que se denominó Necromasa Muy Fina, se pesó la totalidad de material colectado y se tomó una muestra compuesta de 250 g.

En resumen, las muestras tomadas en campo correspondieron a rodelas del fuste, ramas gruesa (mayor a 5 cm de diámetro), rama delgada, ramas secas, hojas, raíz gruesa, raíz delgada (menores a 5 cm de diámetro), flores, frutos, Necromasa muy fina, Necromasa fina y Necromasa gruesa.

A partir del total de muestras secadas y pesadas en laboratorio se seleccionaron las muestras para continuar el proceso de análisis para lo cual se realizó picado en trozos menores a 0.5 cm, posteriormente se ingresaron los trozos en un molino Willey con tamiz para la obtención aproximada de 50 ml de muestra inferior a 0.2 mm, a partir de allí y con el equipo analizador elemental CHN-2400 serie II (Perkin Elmer Co. USA) 0.3 gramos fueron colocados en cápsulas de inyección en estaño, que fueron depositadas en un auto muestreador, de esta manera se obtuvo el valor de carbono, nitrógeno e hidrógeno en la muestra. El sistema se basa en el método de Pregl-Dumas, en el cual las muestras son

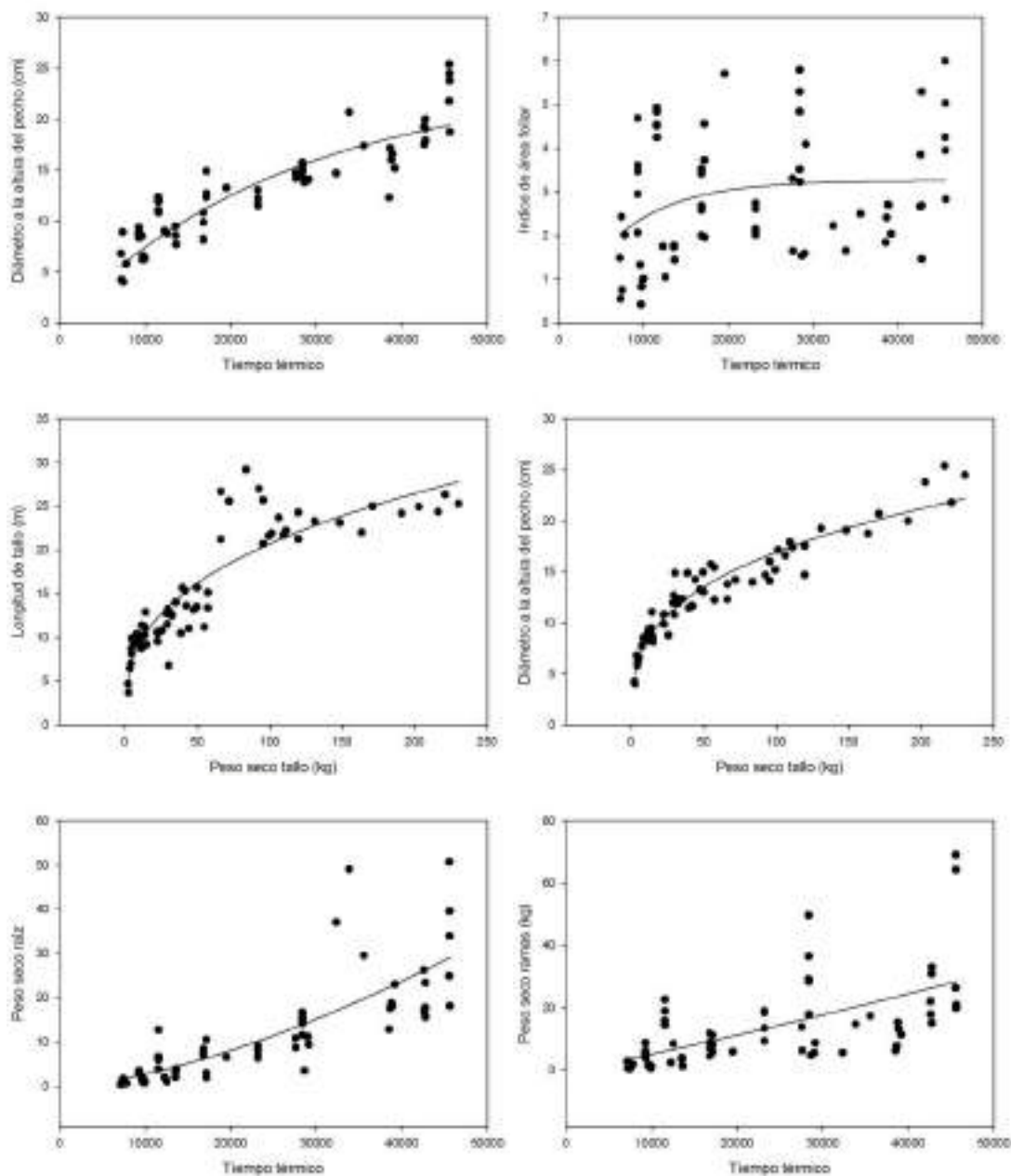
puestas en combustión en presencia de oxígeno puro y los gases generados en máximo nivel de oxidación son separados y leídos por detectores de infrarrojo y de conductividad. Adicionalmente otra submuestra se dispuso para el análisis de nutrientes (fósforo, potasio, calcio, magnesio, manganeso, cobre, hierro, zinc y cenizas) por diferentes métodos.



**Figura 1.** Muestreos de biomasa total en arboles de *Gmelina arborea* y *Tabebuia rosea* costa norte de Colombia

## RESULTADOS APROBADOS Y LOGRADOS

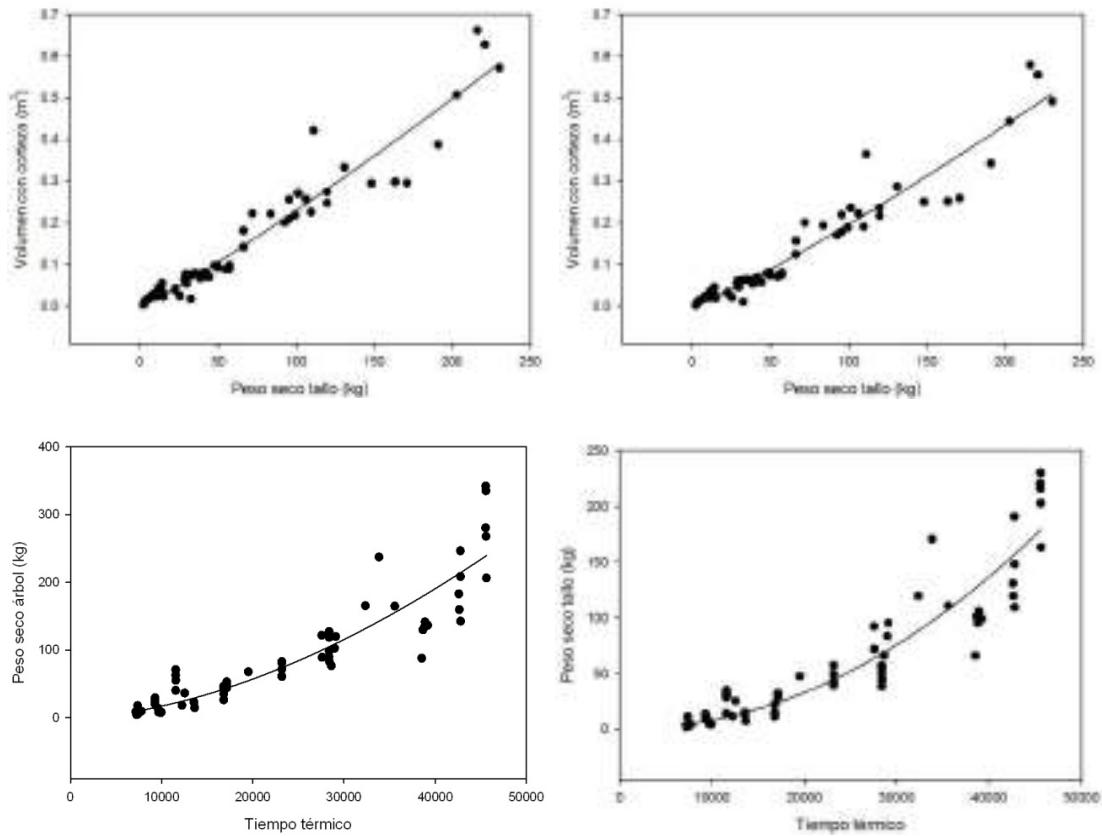
A continuación se presentan las figuras con los modelos de acumulación de biomasa y modelos de crecimiento alométrico para las especies nuevas incorporadas al modelo CREFT (*Acacia mangium*, *Tectona grandis* y *Pinus tecunumanii*) y posteriormente los gráficos y modelos validados de las especies previamente contenidas en él.



**Figura 2.** Modelos de crecimiento en función de tiempo térmico y relaciones alométricas en la especie *Acacia mangium*.

A partir de los modelos de crecimiento en función del tiempo térmico es posible analizar la respuesta de la biomasa de la planta a cambios en la edad y/o temperatura ambiental en la cual se desarrolla al contar con los datos de temperaturas del lugar, la variabilidad observada presenta un comportamiento típico de heterocedasticidad en la cual las mayores amplitudes en el rango de datos por edad se presenta en las mayores edades,

sin embargo, en modelos alométricos como el que relaciona DAP y peso seco del fuste no se observa éste fenómeno.

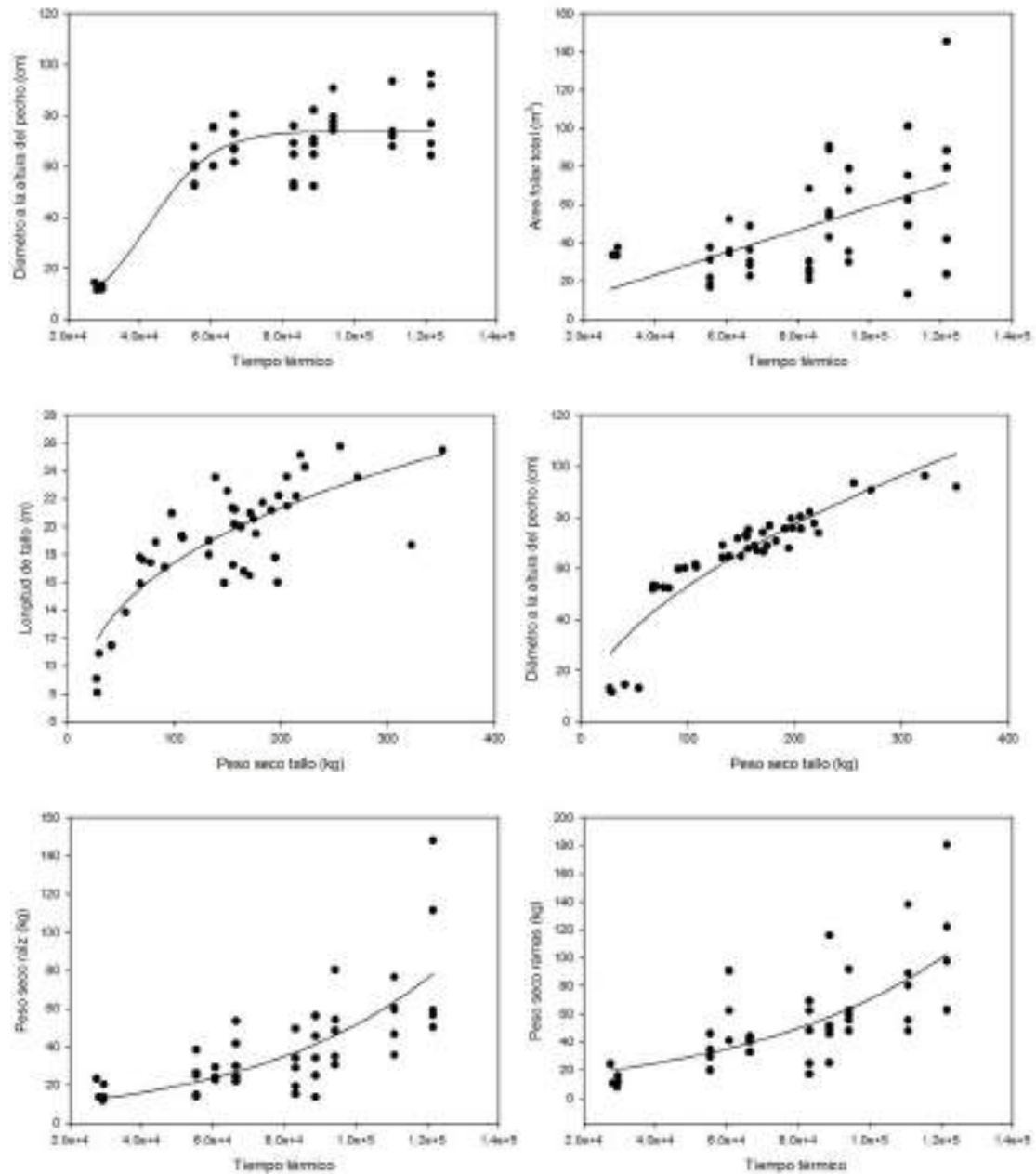


**Figura 3.** Modelos de relaciones alométricas volumen peso seco tallo y modelos de crecimiento en función de tiempo térmico en *Acacia mangium*.

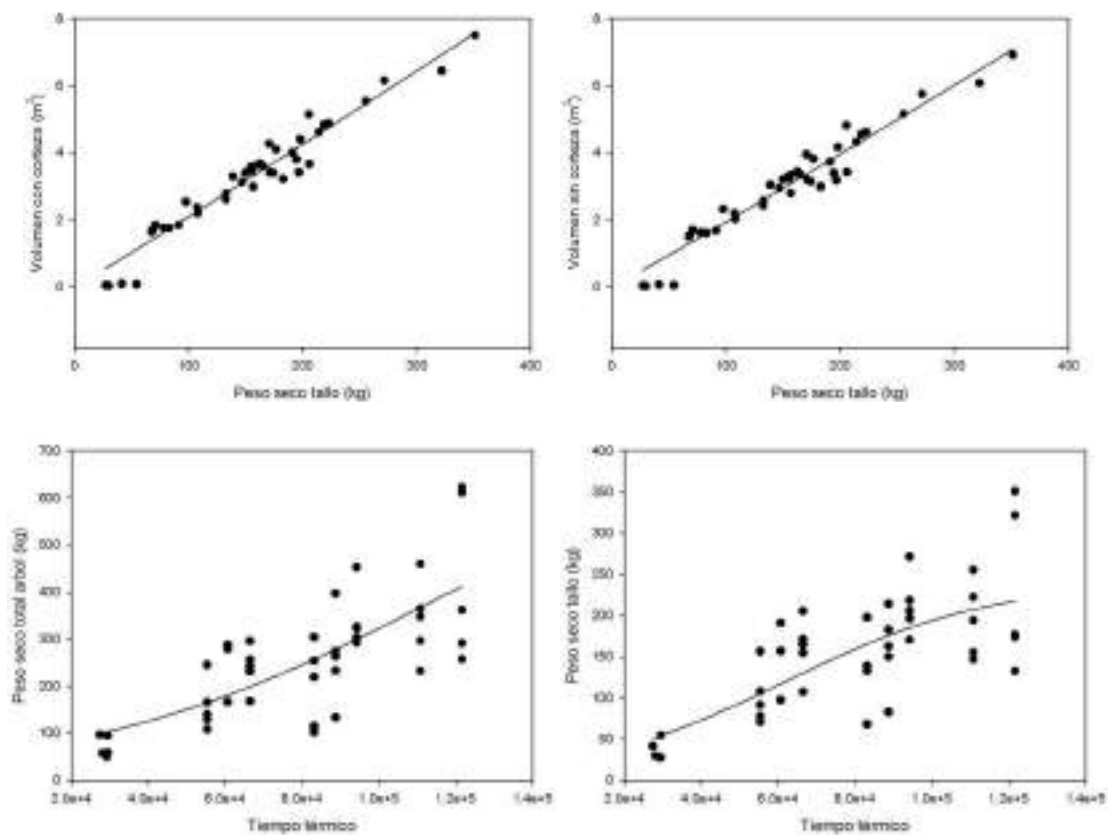
**Tabla 1.** Parámetros de los modelos de crecimiento y relaciones alométricas en la especie *Acacia mangium*

Dependiente	Explicativa	Modelo	a	b	R2
Longitud de tallo	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	4.0706	0.3533	0.81
Volumen con corteza	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	0.0013	1.1197	0.93
Volumen sin corteza	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	0.001	1.1461	0.93
Diámetro a la altura del pecho	Tiempo térmico	$f=a*(1-\exp(-b*x))$	23.67	0.0000375	0.79
Diámetro a la altura del pecho	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	3.8089	0.324	0.92
Área foliar total	Tiempo térmico	$f=a*(1-\exp(-b*x))$	29.36	0.0001	0.19
Índice de Área foliar	Tiempo térmico	$f=a*(1-\exp(-b*x))$	3.26	0.0001	0.19
Biomasa total	Tiempo térmico	$f=a*x^b$	0.00000189	1.7387	0.83

Peso seco tallo	Tiempo térmico	$f=a*x^b$	5.09E-08	2.0489	0.86
Peso seco hojas	Tiempo térmico	$f=a*x^b$	0.2447	0.2754	0.12
Peso seco ramas	Tiempo térmico	$f=a*x^b$	0.0002	1.1217	0.35
Peso seco raíz	Tiempo térmico	$f=a*x^b$	0.00000178	1.5479	0.65
Peso seco hojarasca	Tiempo térmico	$f=a*x^b$	0.3068	0.2852	0.12



**Figura 4.** Modelos de crecimiento en función de tiempo térmico y relaciones alométricas en la especie *Tectona grandis*

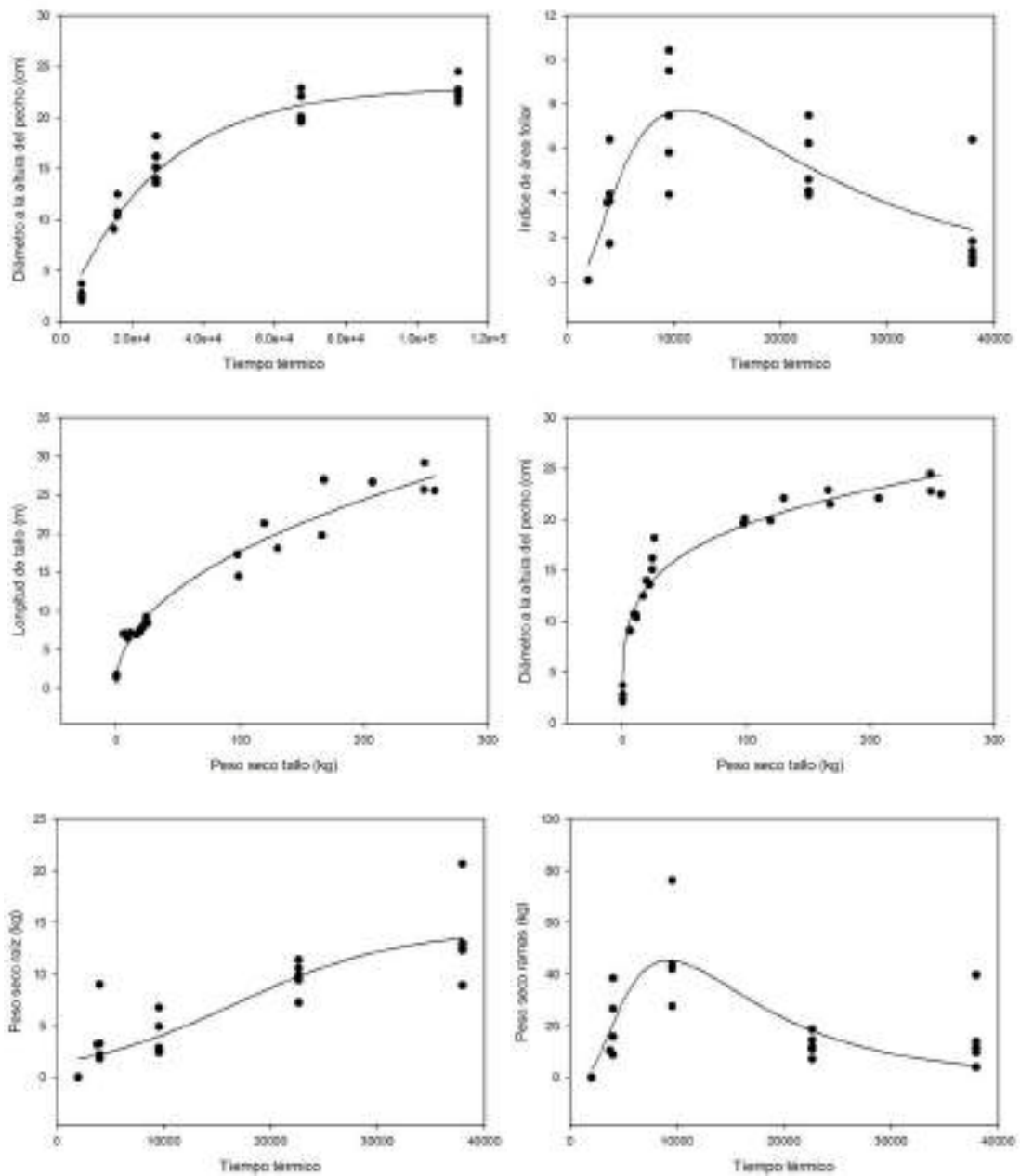


**Figura 5.** Modelos matemáticos de relaciones alométricas volumen peso seco tallo y modelos matemáticos de crecimiento en función de tiempo térmico en *Tectona grandis*.

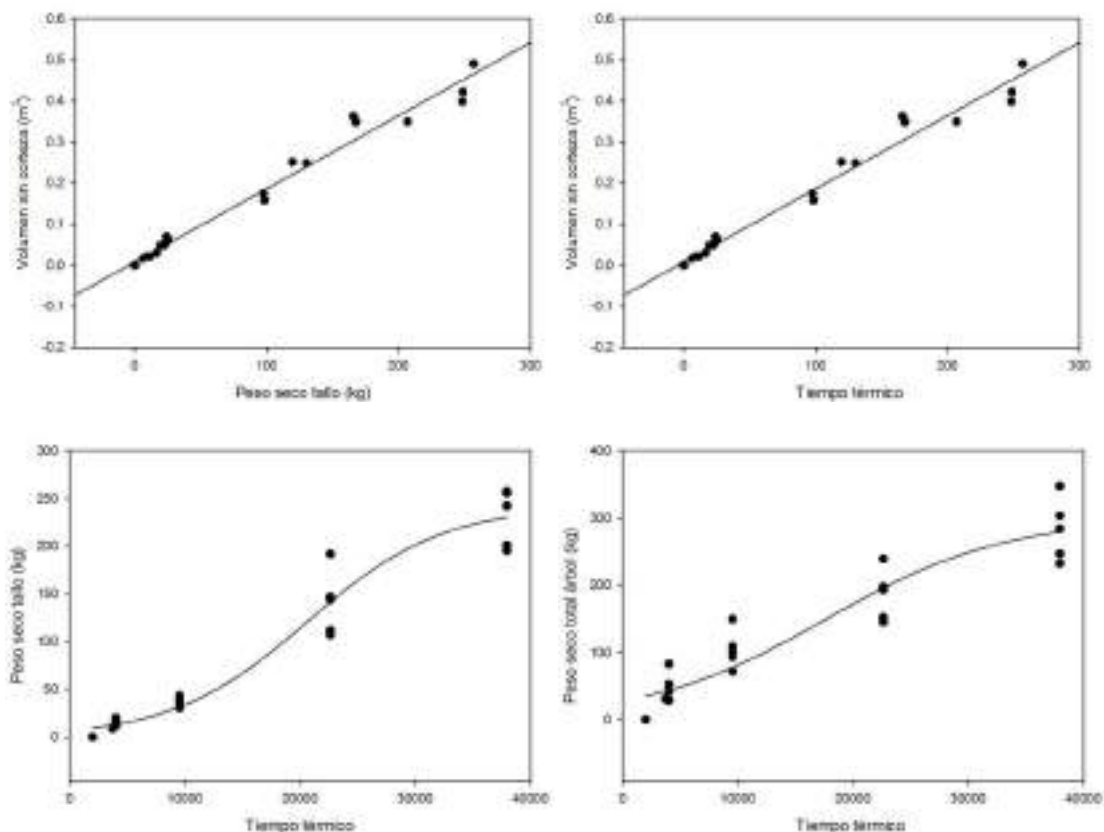
**Tabla 2.** Modelos y parámetros de crecimiento y relaciones alométricas en la especie *Tectona grandis*

Dependiente	Explicativa	Modelo	a	b	X <sub>0</sub>	Y <sub>0</sub>	R <sup>2</sup>
Longitud de tallo	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	4.4637	0.2954			0.65
Volumen con corteza	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	0.0188	1.023			0.943
Volumen sin corteza	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	0.0168	1.0311			0.943
Diámetro a la altura del pecho	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	73.9974	8971.8982	42460.8532		0.800
Diámetro a la altura del pecho	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	4.3125	0.5446			0.855
Área foliar total	Tiempo térmico	$f=a*x^b$	0.0005	1.0104			0.26
Índice de Área foliar	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	760.2525	45700.4165	113907.1145		0.553
Biomasa total	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	241.1892	26756.8577	62221.0403		0.508
Peso seco tallo	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	7.4852	30002.3361	48886.5668		0.182

Peso seco hojas	Tiempo térmico	$f = a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	1184333.68	57515.81	659647.72		0.495
Peso seco ramas	Tiempo térmico	$f = a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	1329051.4	51583.35	623990.39		0.526
Peso seco raíz	Tiempo térmico	$f = y_0 + a * x$	-3.44E-05			5.2978	0.623
Peso seco hojarasca	Tiempo térmico	$f = y_0 + a * x$	-2.74E-05			5.1546	0.051



**Figura 6.** Modelos de crecimiento en función de tiempo térmico y relaciones alométricas en la especie *Pinus tecunumanii*

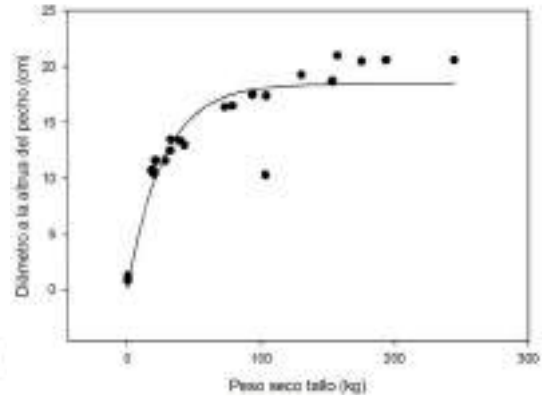
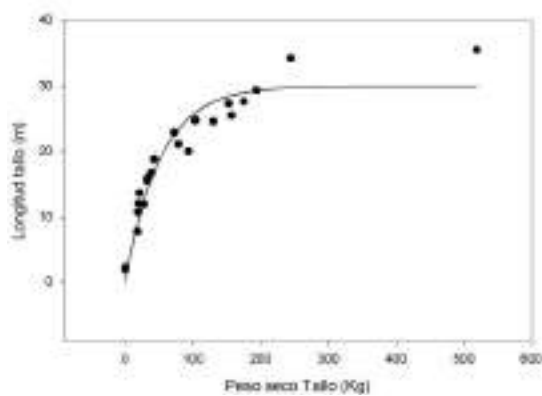
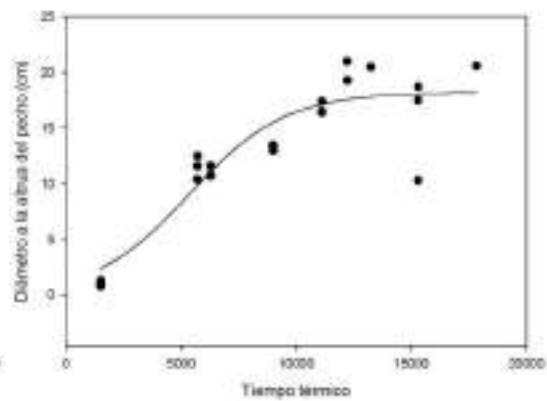
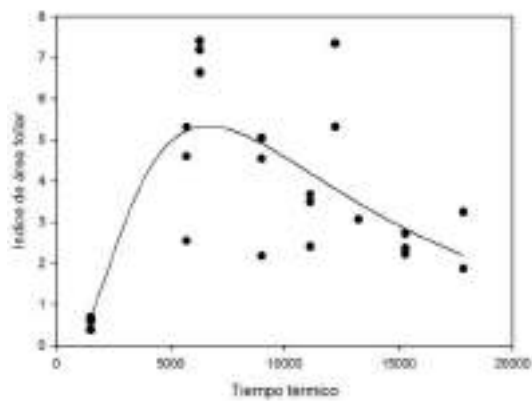


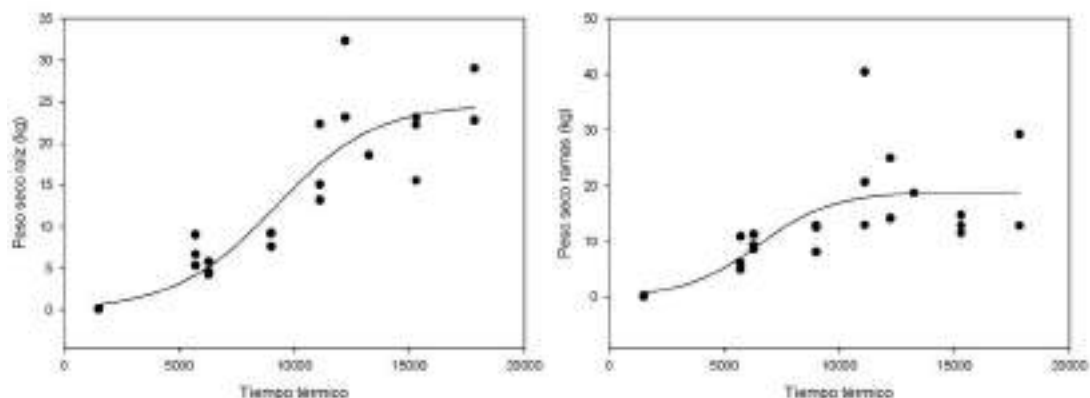
**Figura 7.** Modelos de relaciones alométricas volumen peso seco tallo y modelos de crecimiento en función de tiempo térmico en *Pinus tecunumanii*.

**Tabla 3.** Modelos y parámetros de crecimiento y relaciones alométricas en la especie *Pinus tecunumanii*

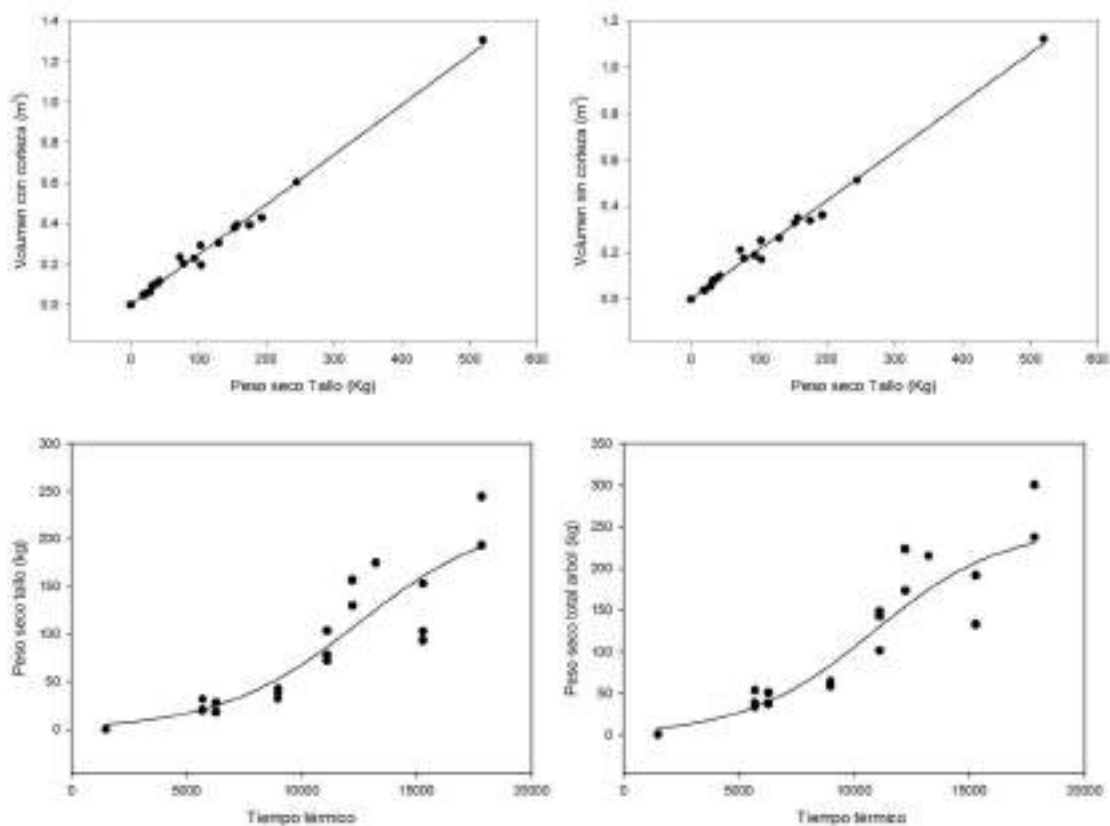
Dependiente	Explicativa	Modelo	a	b	Xo	Yo	R2
Longitud de tallo	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	2.10	0.4628			0.96
Volumen con corteza	Peso seco tallo	$f = y_0+a*x$	0.00			0.0144	0.98
Volumen sin corteza	Peso seco tallo	$f = y_0+a*x$	0.00			0.0079	
Diámetro a la altura del pecho	Tiempo térmico	$f=a*(1-\exp(-b*x))$	23.02	3.77E-05			0.96
Diámetro a la altura del pecho	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	6.68	0.233			0.97
Area foliar total	Tiempo térmico	$f=a*\exp(-0.5*(\ln(x/x_0)/b)^2)$	69.74	0.8007	11013.4		0.68
Indice de Area foliar	Tiempo térmico	$f=a*\exp(-0.5*(\ln(x/x_0)/b)^2)$	7.75	0.8007	11013.4		0.68
Biomasa total	Tiempo	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	300.12	7778.413	17709.4		0.89

	térmico						
Peso seco tallo	Tiempo térmico	$f = a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	242.42	5877.286	20647.6		0.96
Peso seco hojas	Tiempo térmico	$f = a \cdot \exp(-0.5 \cdot (\ln(x/x_0)/b)^2)$	15.12	0.8007	11013.4		0.68
Peso seco ramas	Tiempo térmico	$f = a \cdot \exp(-0.5 \cdot (\ln(x/x_0)/b)^2)$	45.42	0.6644	9228.1		0.59
Peso seco raíz	Tiempo térmico	$f = a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	14.28	7595.046	16677.3		
Peso seco hojarasca	Tiempo térmico	$f = y_0 + a \cdot \exp(-b \cdot x)$	5571.1	4.09E-05		3080.5	0.53
Peso seco necromasa	Tiempo térmico	$f = y_0 + a \cdot \exp(-b \cdot x)$	11.90	3.13E-05		9.1638	0.35





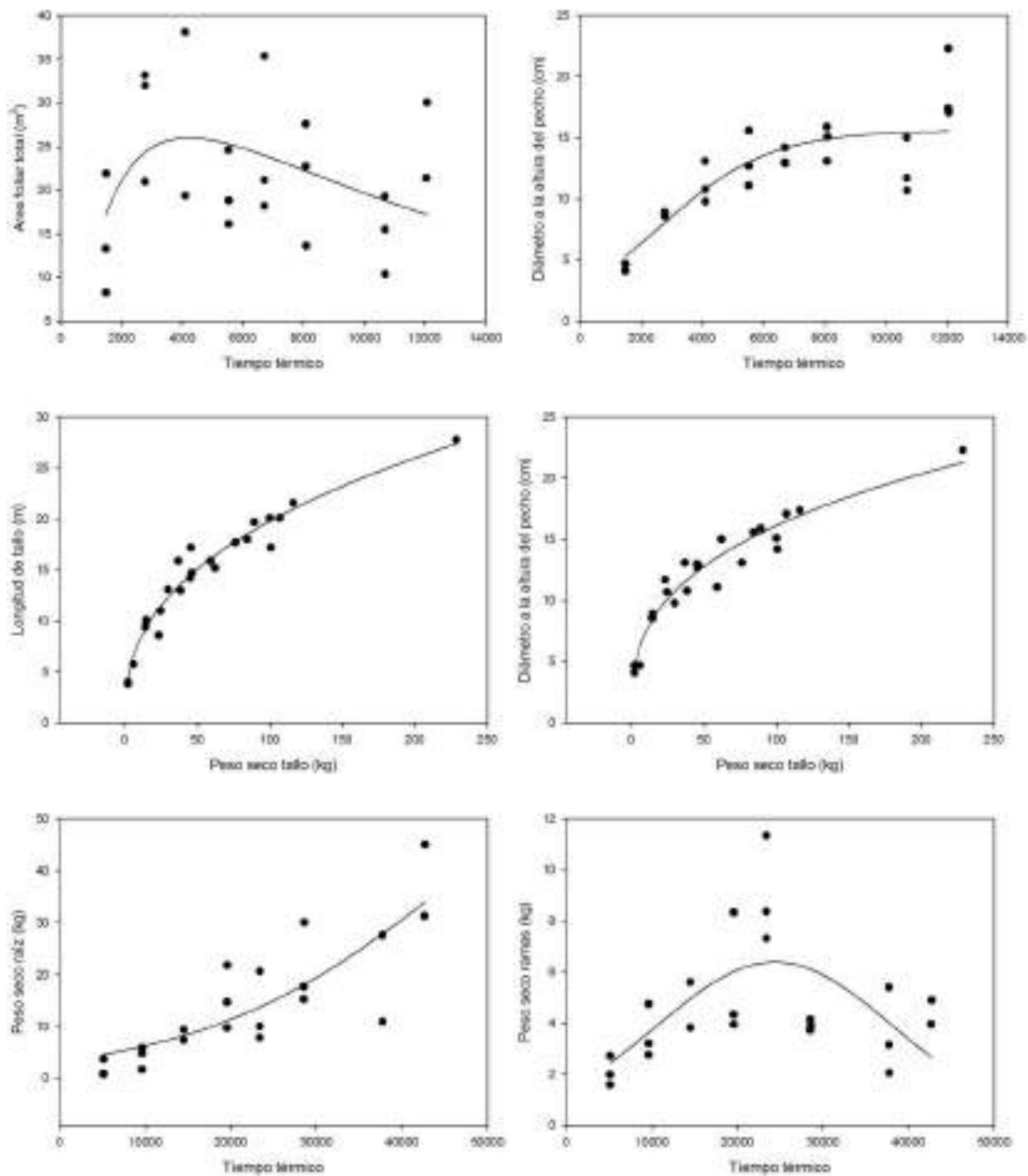
**Figura 8.** Modelos de crecimiento en función de tiempo térmico y relaciones alométricas en la especie *Eucalyptus grandis*



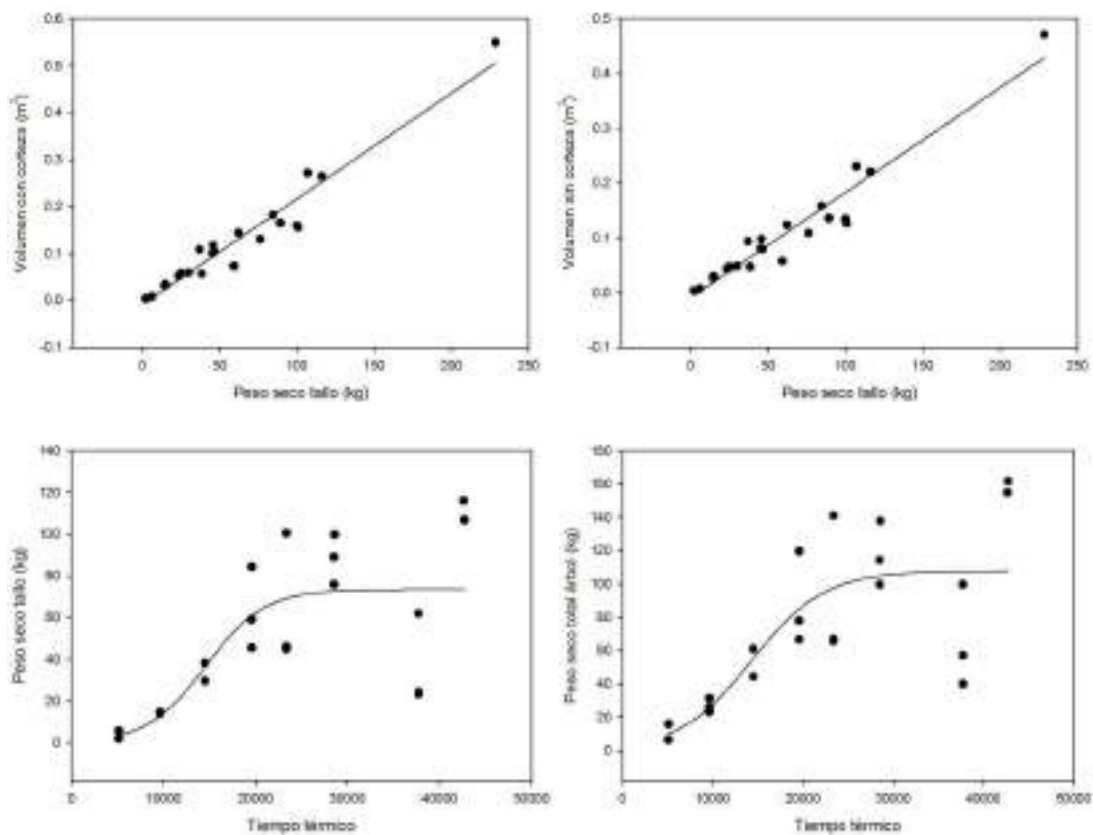
**Figura 9.** Modelos de crecimiento en función de tiempo térmico y relaciones alométricas en la especie *Eucalyptus grandis*

**Tabla 4.** Modelos y parámetros de crecimiento y relaciones alométricas en la especie *Eucalyptus grandis*

<b>Dependiente</b>	<b>Explicativa</b>	<b>Modelo</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>X<sub>0</sub></b>	<b>Y<sub>0</sub></b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Longitud de tallo	Peso seco tallo	$f=a*(1-\exp(-b*x))$	29.960	0.02			0.93
Volumen con corteza	Peso seco tallo	$f=y_0+a*x$	0.003			0.0021	0.99
Volumen sin corteza	Peso seco tallo	$f=y_0+a*x$	0.002			0.0022	0.99
Diámetro a la altura del pecho	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	18.227	2069.68	5371.25		0.85
Diámetro a la altura del pecho	Peso seco tallo	$f=a*(1-\exp(-b*x))$	18.504	0.04			0.88
Área foliar total	Tiempo térmico	$f=a*\exp(-0.5*(\ln(x/x_0)/b)^2)$	48.037	0.74	6649.19		0.55
Índice de Área foliar	Tiempo térmico	$f=a*\exp(-0.5*(\ln(x/x_0)/b)^2)$	5.338	0.74	6649.19		0.55
Biomasa total	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	249.772	2785.34	10879.37		0.84
Peso seco tallo	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	224.564	3003.68	12503.62		0.84
Peso seco hojas	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	3.978	5.92	5688.28		0.39
Peso seco ramas	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	18.903	1609.30	6507.77		0.51
Peso seco raíz	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	24.802	2179.54	9181.13		0.81
Peso seco hojarasca	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	1.11E+04	6446.64	9621.25		0.47
Peso seco necromasa	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	1.87E+03	591.99	12158.71		0.46



**Figura 10.** Modelos de crecimiento en función de tiempo térmico y relaciones alométricas en la especie *Eucalyptus pellita*

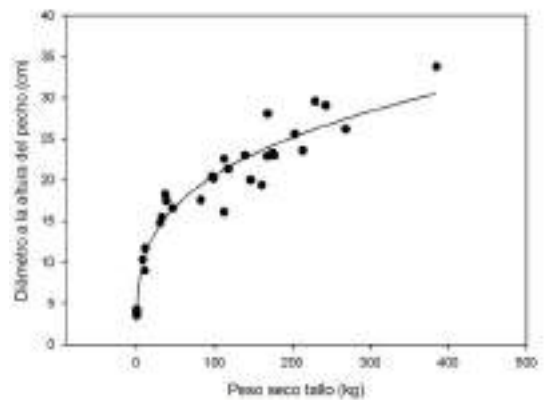
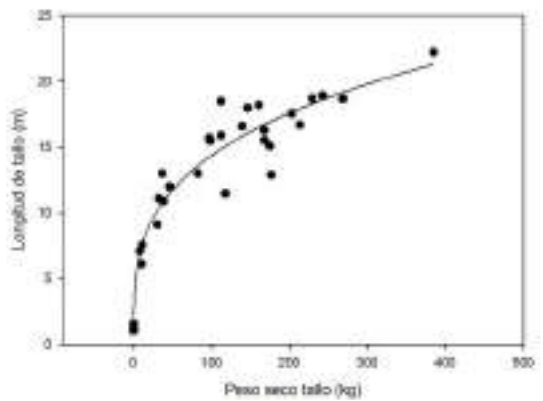
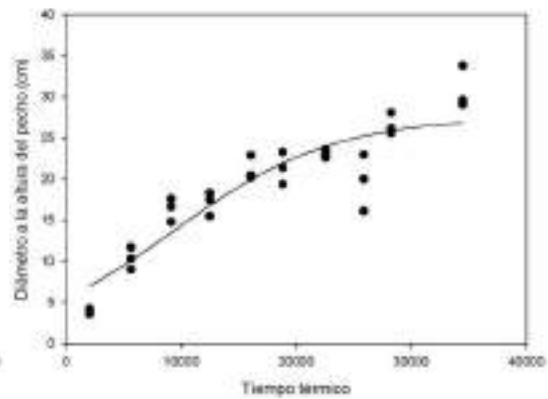
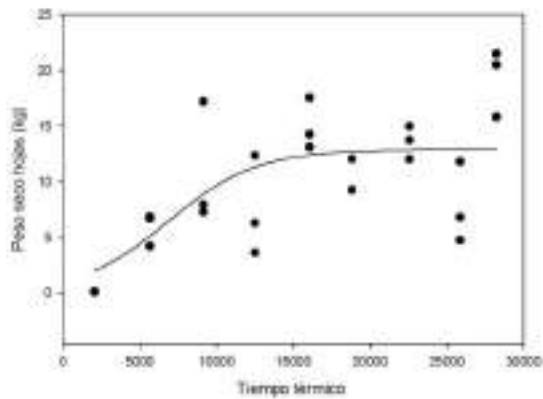


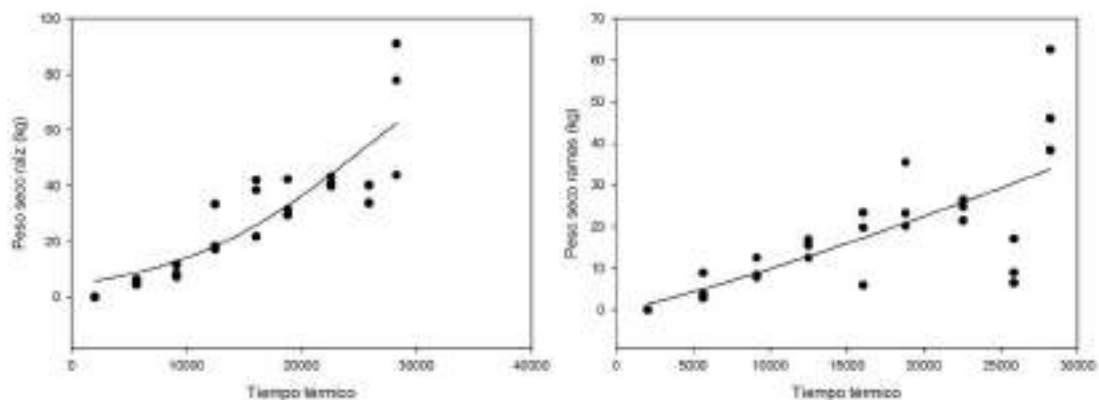
**Figura 11.** Modelos de relaciones alométricas volumen peso seco tallo y modelos de crecimiento en función de tiempo térmico en *Eucalyptus pellita*

**Tabla 5.** Modelos y parámetros de crecimiento y relaciones alométricas en la especie *Eucalyptus pellita*

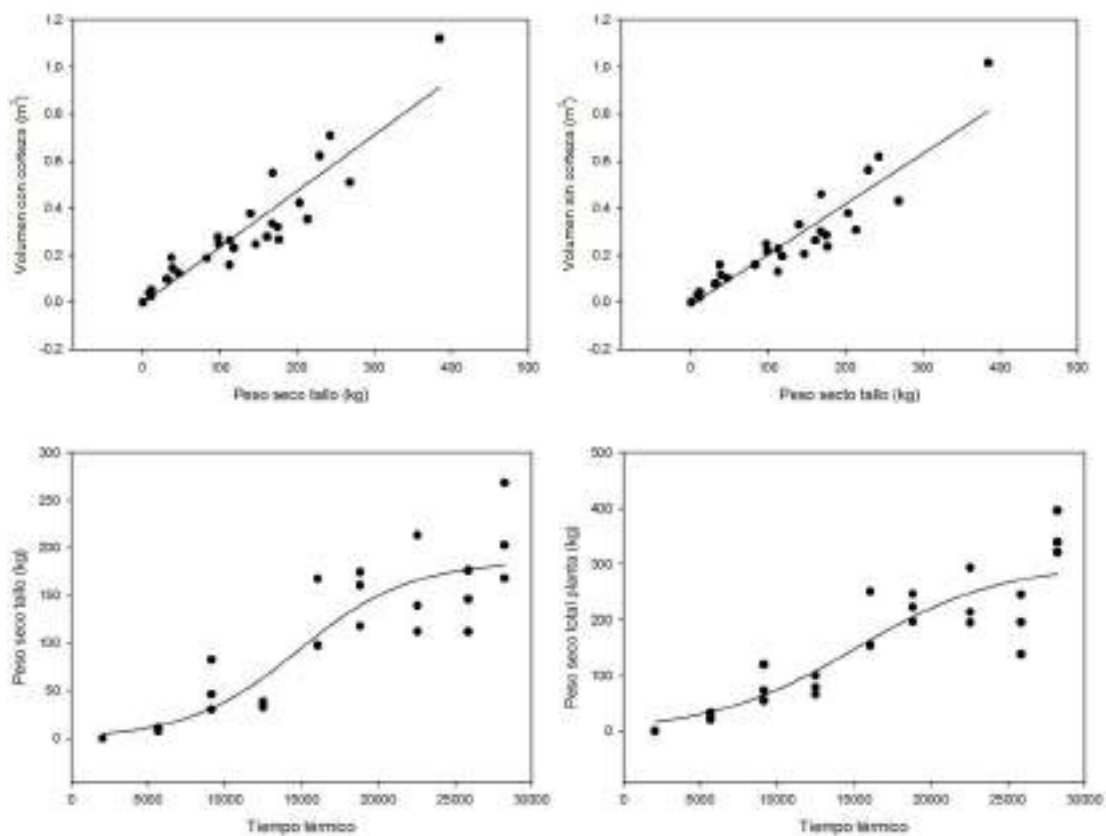
Dependiente	Explicativa	Modelo	a	b	Xo	Yo	R2
Longitud de tallo	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	3.3	0.3923			0.96
Volumen con corteza	Peso seco tallo	$f=y_0+a*x$	0.0			-0.0081	0.94
Volumen sin corteza	Peso seco tallo	$f=y_0+a*x$	0.0			-0.0085	0.94
DAP	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	15.6	1.78E+03	2656.3		0.73
DAP	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	3.4	0.3357			0.93
Area foliar total	Tiempo térmico	$f=a*\exp(-0.5*(\ln(x/x_0)/b)^2)/x$	214242.8	1.1573	16104.3		0.17
Indice de Area foliar	Tiempo térmico	$f=a*\exp(-0.5*(\ln(x/x_0)/b)^2)/x$	37947.8	1.3827	26590.6		0.10
Biomasa total	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	108.0	4044.65	14335.5		0.61

Peso seco tallo	Tiempo térmico	$f = a / (1 + \exp(-(x - x_0) / b))$	73.6	3183.69	14590.8		0.58
Peso seco hojas	Tiempo térmico	$f = a * \exp(-0.5 * (\ln(x/x_0) / b)^2) / x$	242317.0	1.48	173839.1		0.14
Peso seco ramas	Tiempo térmico	$f = a * \exp(-.5 * ((x - x_0) / b)^2)$	6.4	13847.98	24378.9		0.38
Peso seco raíz	Tiempo térmico	$f = a / (1 + \exp(-(x - x_0) / b))$	78.1	15059.00	46647.2		0.71
Peso seco hojarasca	Tiempo térmico	$f = a / (1 + \exp(-(x - x_0) / b))$	1.20E+04	1.29E+04	23333.7		0.43
Peso seco necromasa	Tiempo térmico	$f = a / (1 + \exp(-(x - x_0) / b))$	2.53E+03	7.14E+03	15110.1		0.36





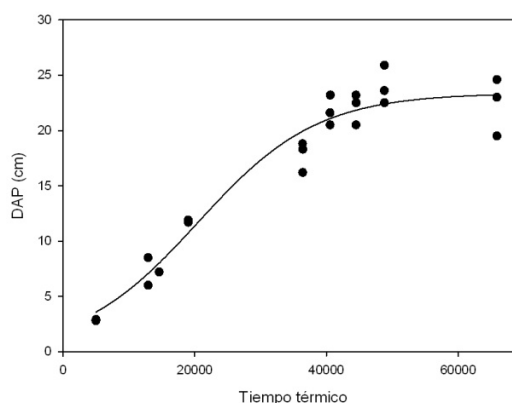
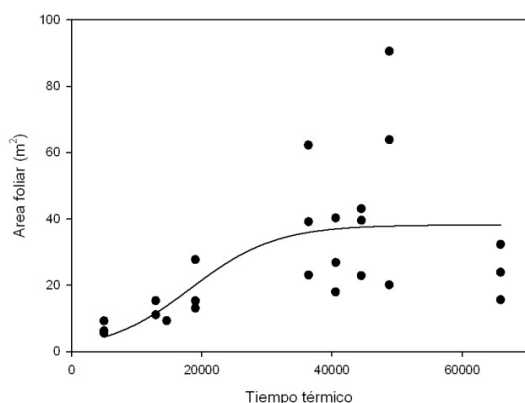
**Figura 12.** Modelos de crecimiento en función de tiempo térmico y relaciones alométricas en la especie *Pinus caribea*

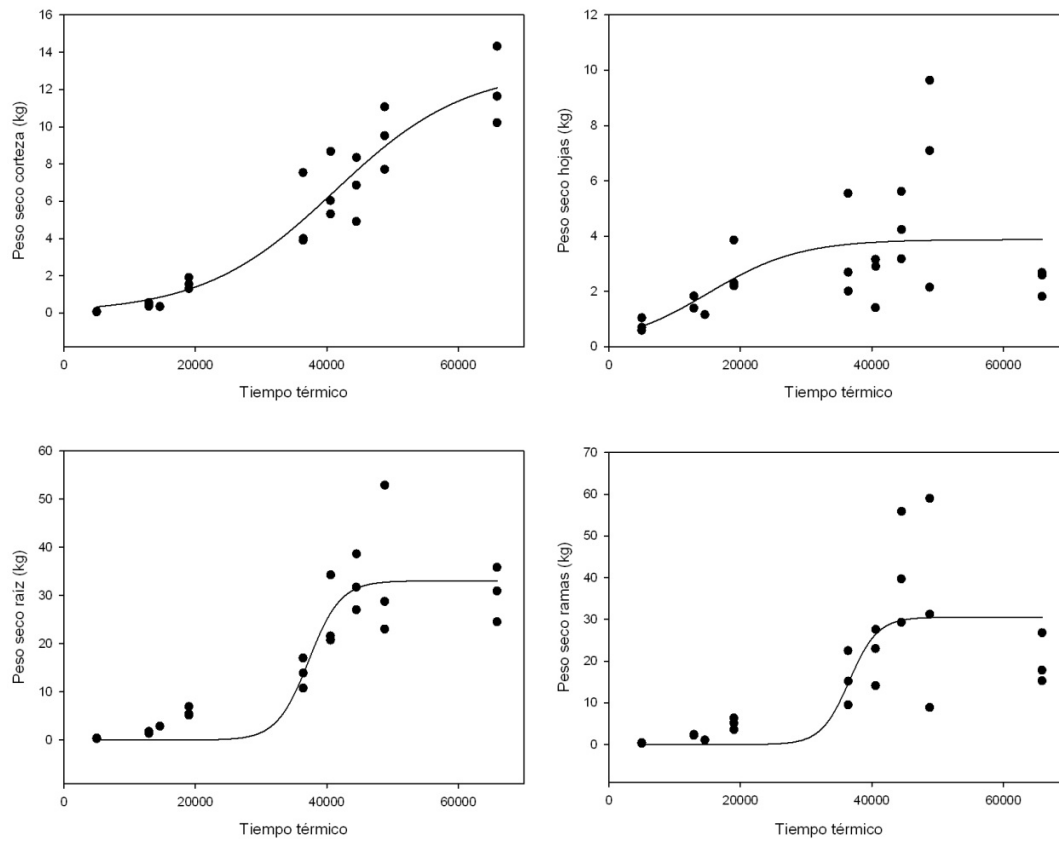


**Figura 13.** Modelos de relaciones alométricas volumen peso seco tallo y modelos de crecimiento en función de tiempo térmico en *Pinus caribea*

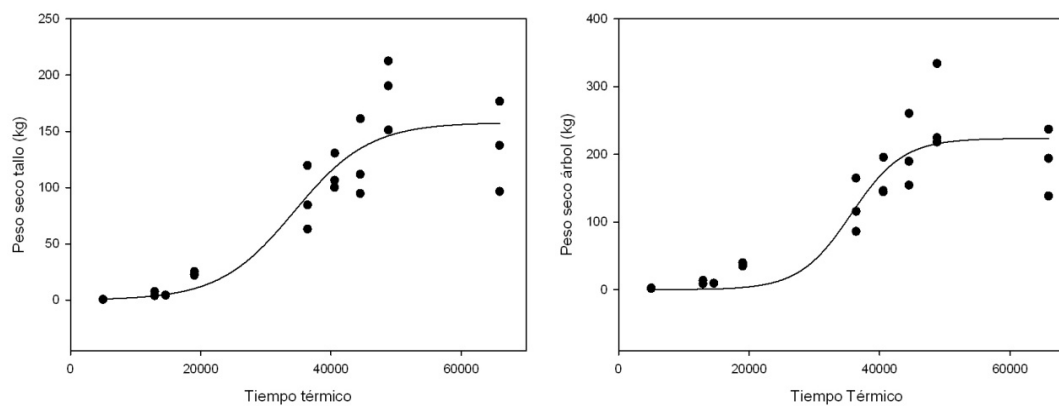
**Tabla 6.** Modelos y parámetros de crecimiento y relaciones alométricas en la especie *Pinus caribea*

Dependiente	Explicativa	Modelo	a	b	X <sub>0</sub>	R <sup>2</sup>
Longitud de tallo	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	3.7463	0.292		0.92
Volumen con corteza	Peso seco tallo	$f=y_0+a*x$	-0.0045	0.0024		0.87
Volumen sin corteza	Peso seco tallo	$f=y_0+a*x$	-0.0102	0.0021		0.87
Diámetro a la altura del pecho	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	27.5764	6905.713	9435.089	0.84
Diámetro a la altura del pecho	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	5.3367	0.2929		0.92
Area foliar total	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	19.563	176.869	5660.63	0.48
Indice de Area foliar	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	1.8628	835.9315	3769.78	0.51
Biomasa total	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	300.0435	4693.769	15198.958	0.81
Peso seco tallo	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	185.81	3607.22	14828.434	0.80
Peso seco hojas	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	12.9187	2879.242	6851.8755	0.48
Peso seco ramas	Tiempo térmico	$f=a*x^b$	0.0002	1.1834		0.53
Peso seco raíz	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	106.61	8232.790	25417.086	0.77
Peso seco hojarasca	Tiempo térmico	$f=y_0+a*x+b*x^2+c*x^3$	5.2221	-0.0003		0.57
Peso seco necromasa	Tiempo térmico	$f=a*exp(-.5*((x-x_0)/b)^2)$	3939.91	5910.41	17200.982	0.44





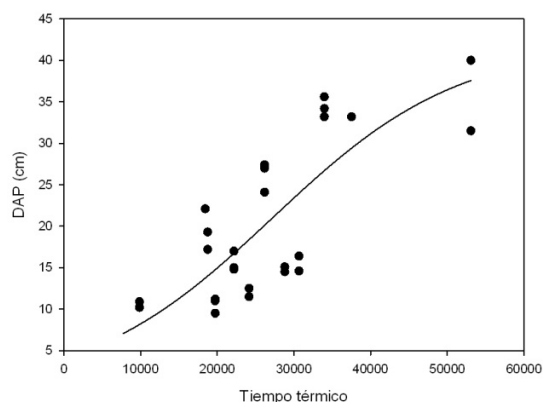
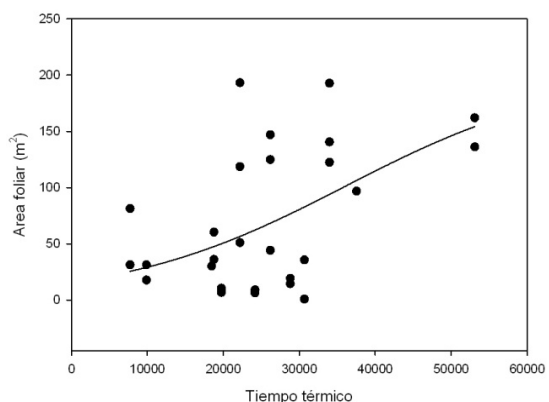
**Figura 14.** Modelos de crecimiento en función de tiempo térmico y relaciones alométricas en la especie *Alnus acuminata*.

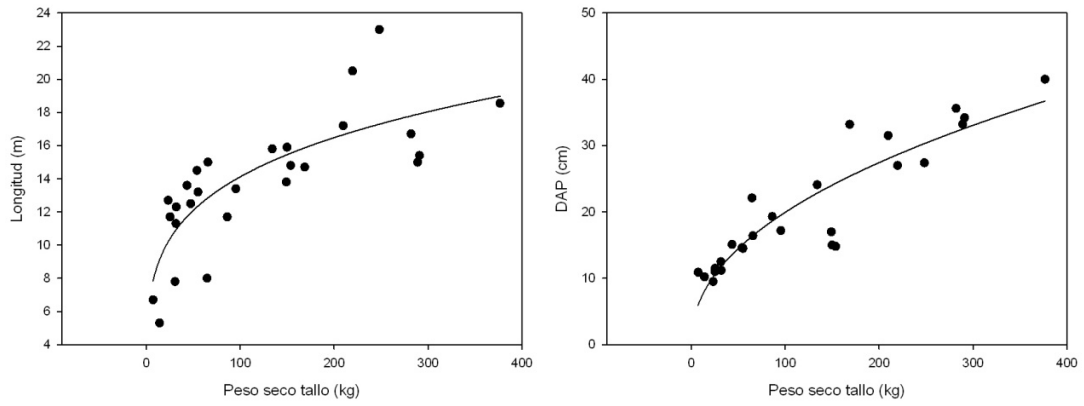


**Figura 15.** Modelos de relaciones alométricas volumen peso seco tallo y modelos de crecimiento en función de tiempo térmico en *Alnus acuminata*

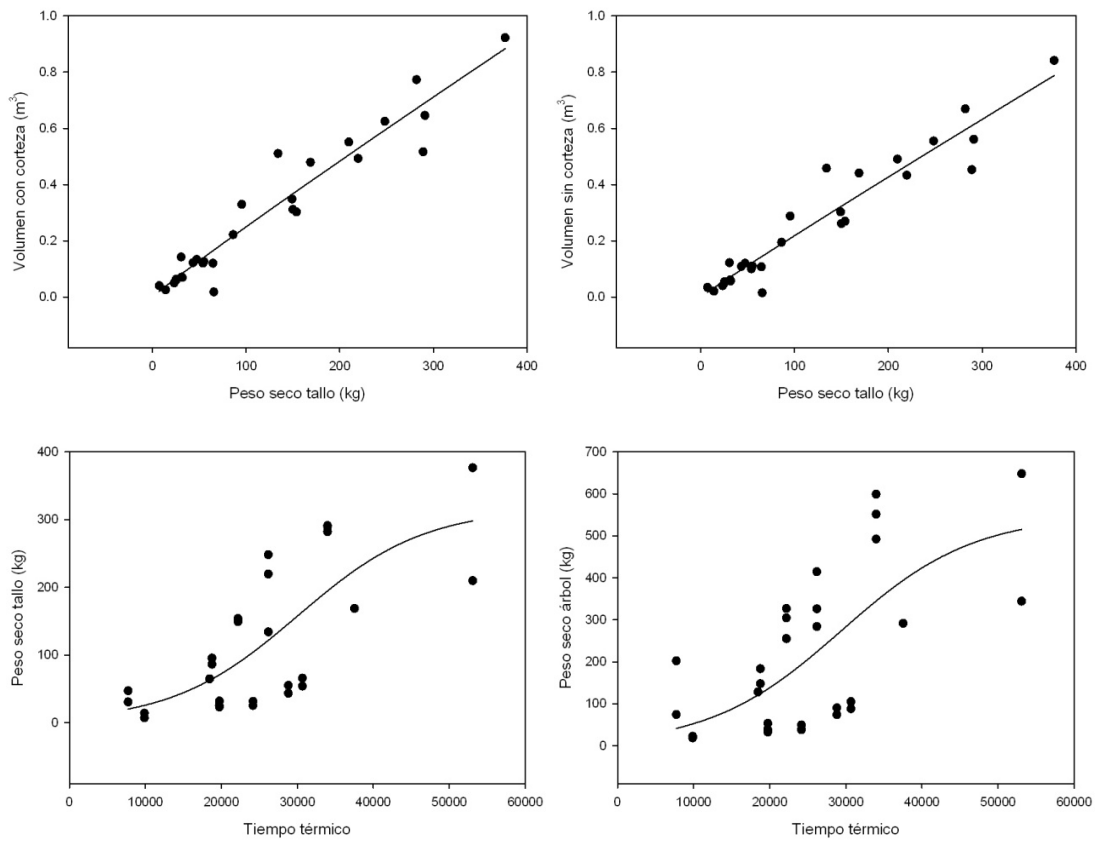
**Tabla 7.** Modelos y parámetros de crecimiento y relaciones alométricas en la especie *Alnus acuminata*

Dependiente	Explicativa	Modelo	a	b	X <sub>0</sub>	Y <sub>0</sub>	R <sup>2</sup>
Longitud de tallo	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	5,0113	0,2993			0.94
Volumen con corteza	Peso seco tallo	$f = y_0+a*x$	0,0125			0,0031	0.89
Volumen sin corteza	Peso seco tallo	$f = y_0+a*x$	0,0029			0,011	0.89
DAP	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	23,3782	9056,4547	20511,2212		0.95
DAP	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	4,0497	0,3461			0.98
Área foliar total	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	38,1930	6515,4028	18352,7733		0.36
Índice de Área foliar	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	4,2438	6517,4226	18354,3279		0.36
Biomasa total	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	223,4967	3973,7403	35665,2201		0.83
Peso seco tallo	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	157,8625	5747,1957	34389,0933		0.84
Peso seco hojas	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	3,8740	6936,6673	15128,8865		0.29
Peso seco ramas	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	30,5257	2149,4809	36587,2334		0.57
Peso seco raíz	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	33,0456	24,242768	37261,6554		0.82





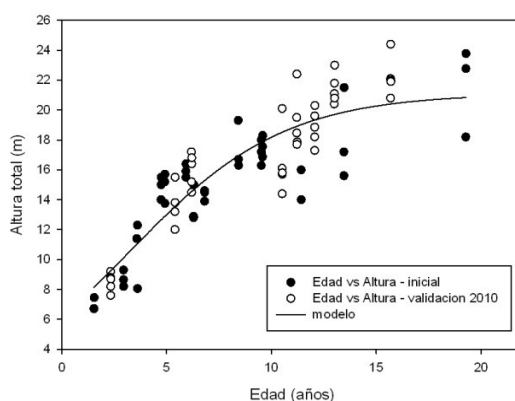
**Figura 16.** Modelos de crecimiento en función de tiempo térmico y relaciones alométricas en la especie *Cordia alliodora*

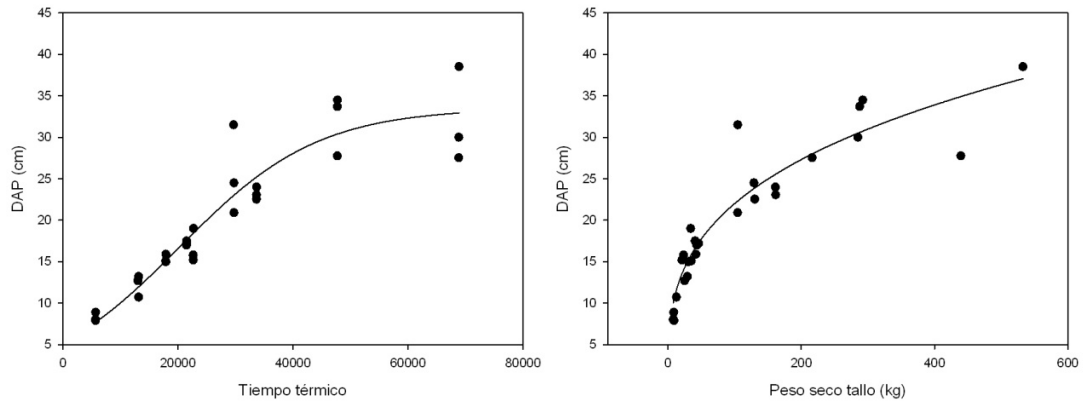


**Figura 17.** Modelos de relaciones alométricas volumen peso seco tallo y modelos de crecimiento en función de tiempo térmico en *Cordia alliodora*

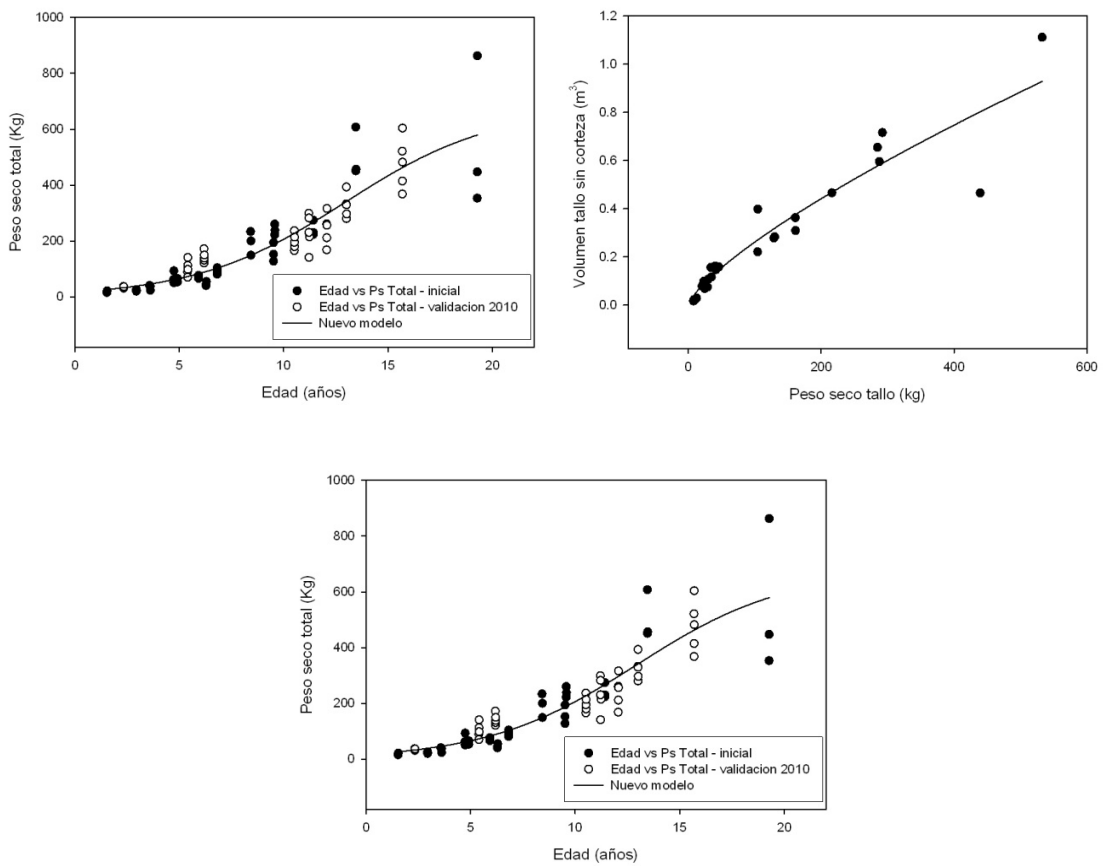
**Tabla 8.** Modelos y parámetros de crecimiento y relaciones alométricas en la especie *Cordia alliodora*

Dependiente	Explicativa	Modelo	a	b	Xo	R2
Longitud de tallo	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	5,0527	0,2231		0.64
Volumen con corteza	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	0,0031	0,9529		0.93
Volumen sin corteza	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	0,0025	0,9676		0.92
DAP	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	42,0763	12187,2943	27247,0286	0.60
DAP	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	2,4032	0,4596		0.81
Biomasa total	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	549,1639	8681,1525	29427,6922	0.43
Peso seco tallo	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	316,8018	8314,6076	30100,6963	0.52
Peso seco hojas	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	14,5039	6481,8909	23829,6349	0.27
Peso seco ramas	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	80,6212	8063,8884	28651,6088	0.38
Peso seco raíz	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	147,3738	13421,9569	35006,6889	0.29
Peso seco hojarasca	Tiempo térmico	$f= a/(1+exp(-(x-x_0)/b))$	4,2754	12527,4660	28725,6934	0.53





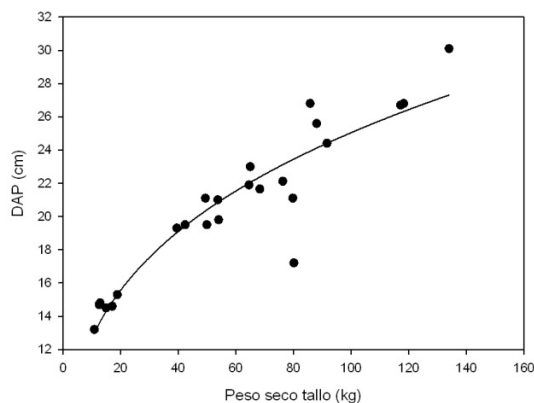
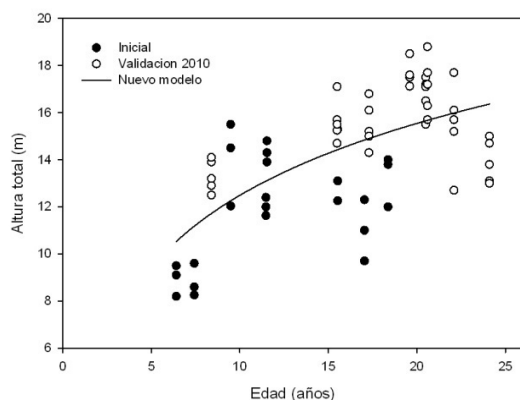
**Figura 18.** Modelos de crecimiento en función de tiempo térmico y relaciones alométricas en la especie *Gmelina arborea*

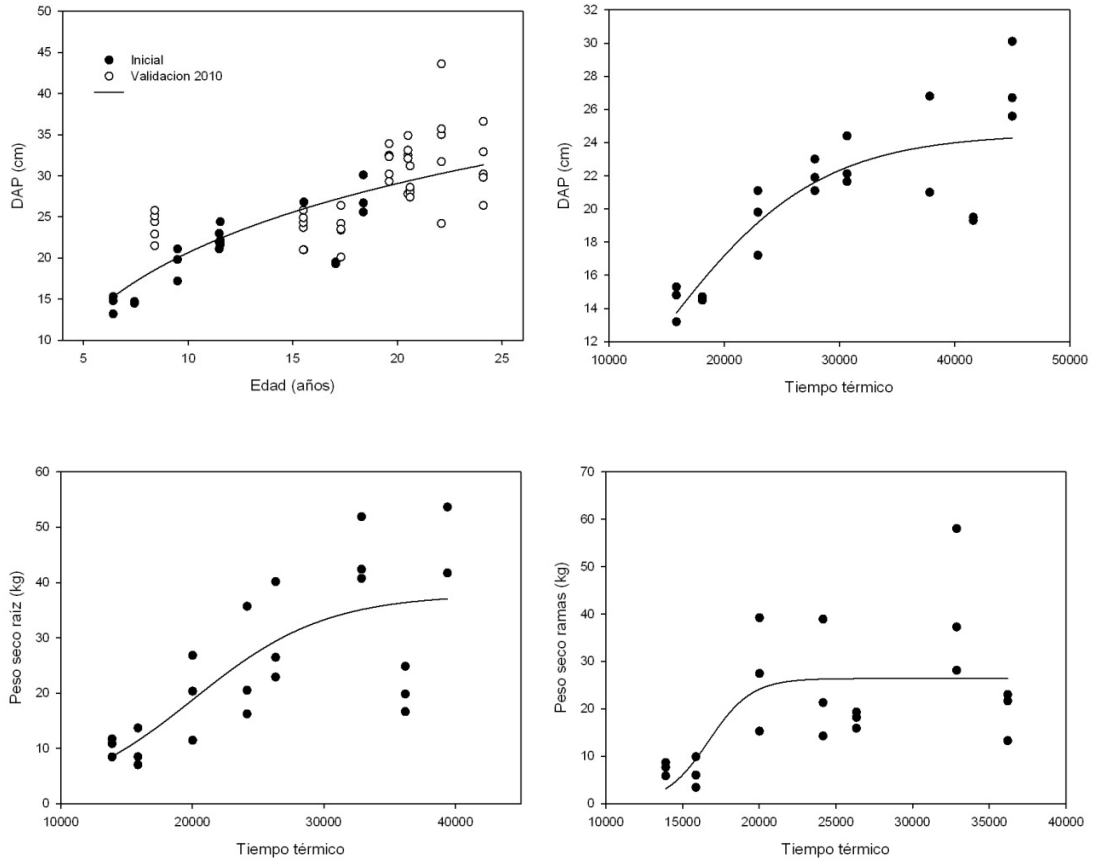


**Figura 19.** Modelos de relaciones alométricas volumen peso seco tallo y modelos de crecimiento en función de tiempo térmico en *Gmelina arborea*

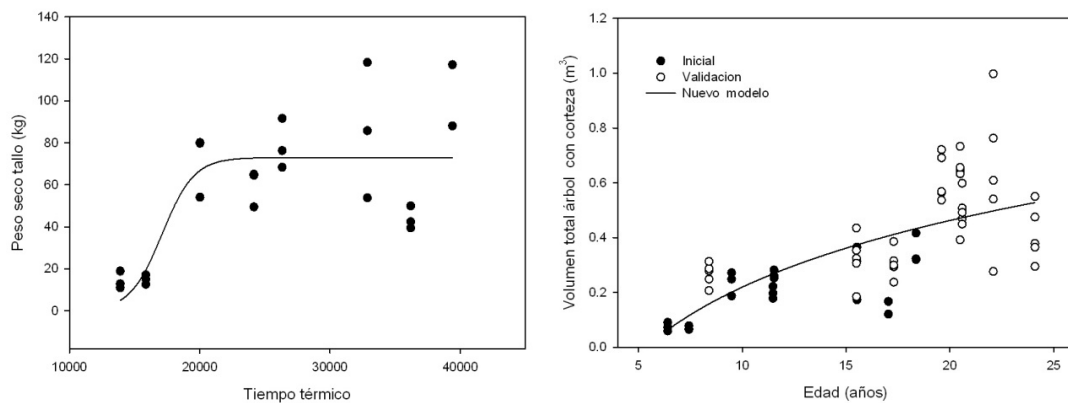
**Tabla 9.** Modelos y parámetros de crecimiento y relaciones alométricas en la especie *Gmelina arborea*

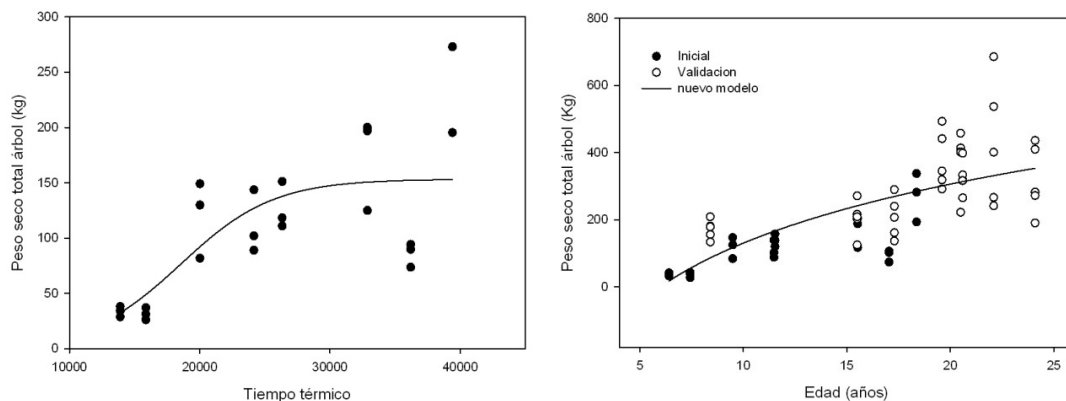
Dependiente	Explicativa	Modelo	a	b	Xo	R2
Longitud de tallo	Peso seco tallo	$f=a*(1-\exp(-b*x))$	18,6581	0,0457		0.83
Volumen con corteza	Edad años	$f= a/(1+\exp(-(x-x0)/b))$	1,1082	4,0191	13,5182	0.79
Volumen con corteza	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	0,0096	0,7444		0.88
Volumen sin corteza	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	0,0079	0,7585		0.89
DAP	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x0)/b))$	33,5129	12057,94	20281,75	0.88
DAP	Peso seco tallo	$f= a/(1+\exp(-(x-x0)/b))$	36,9422	5,7827	7,2247	0.84
Biomasa total	Edad años	$f= a/(1+\exp(-(x-x0)/b))$	677,0076	3,5649	12,9444	0.82
Peso seco tallo	Edad años	$f= a/(1+\exp(-(x-x0)/b))$	425,0377	3,2043	12,2808	0.82
Peso seco hojas	Edad años	$f= a/(1+\exp(-(x-x0)/b))$	5,6796	3,4448	7,8233	0.29
Peso seco ramas	Edad años	$f= a/(1+\exp(-(x-x0)/b))$	2293,13	5,9150	36,5004	0.70
Peso seco raíz	Edad años	$f= a/(1+\exp(-(x-x0)/b))$	95,8993	3,7715	11,7133	0.70





**Figura 20.** Modelos de crecimiento en función de tiempo térmico y relaciones alométricas en la especie *Pachira quinata*

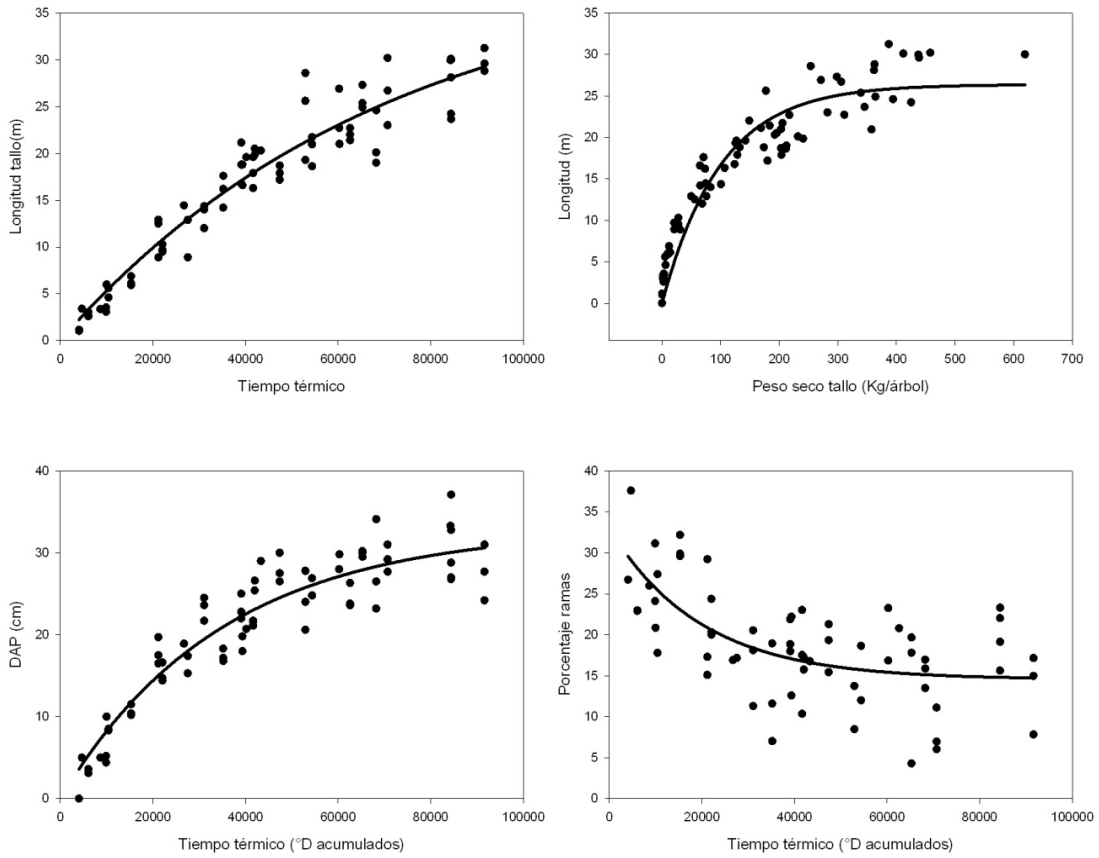




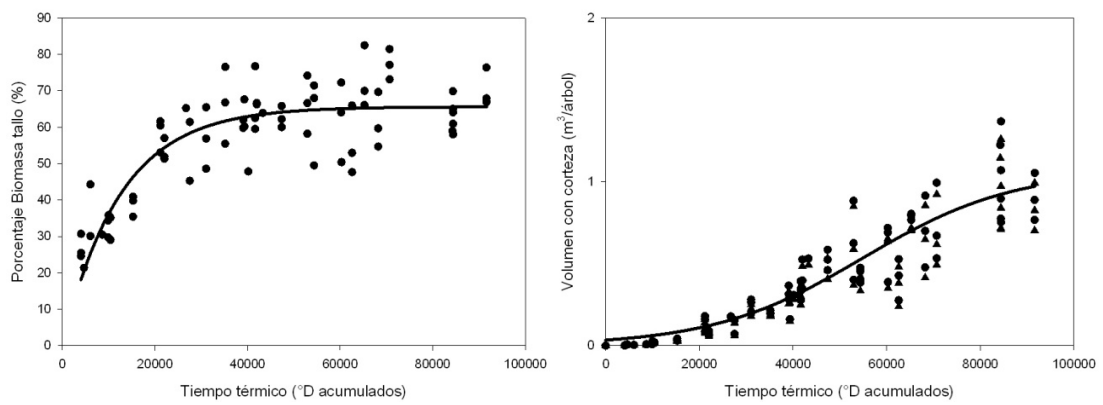
**Figura 21.** Modelos de relaciones alométricas volumen peso seco tallo y modelos de crecimiento en función de tiempo térmico en *Pachira quinata*

**Tabla 10.** Modelos y parámetros de crecimiento y relaciones alométricas en la especie *Pachira quinata*

Dependiente	Explicativa	Modelo	a	b	X <sub>0</sub>	Y <sub>0</sub>	R <sup>2</sup>
Longitud de tallo	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	4,7046	0,2381			0.82
Volumen con corteza	Peso seco tallo	$f = y_0+a*x$	0,0029			0,0298	0.96
Volumen sin corteza	Peso seco tallo	$f = y_0+a*x$	0,0025			0,0195	0.96
DAP	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	24,5421	6830,51		14224,59	0.69
DAP	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	6,4149	0,2957			0.86
DAP	Edad años	$f=y_0+a*\ln(\text{abs}(x))$	12,1284			(-),7,2650	0.59
Biomasa total	Edad años	$f= y_0+a*\ln(\text{abs}(x))$	253,543			(-),453,50	0.52
Biomasa total	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	153,242	3552,85	1856 4,60		0.53
Peso seco tallo	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	73,0095	1226,63	1710 8,73		0.61
Peso seco ramas	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	26,4076	1399,44	1670 2,70		0.39
Peso seco raíz	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	37,8401	5018,47	2009 2,47		0.55



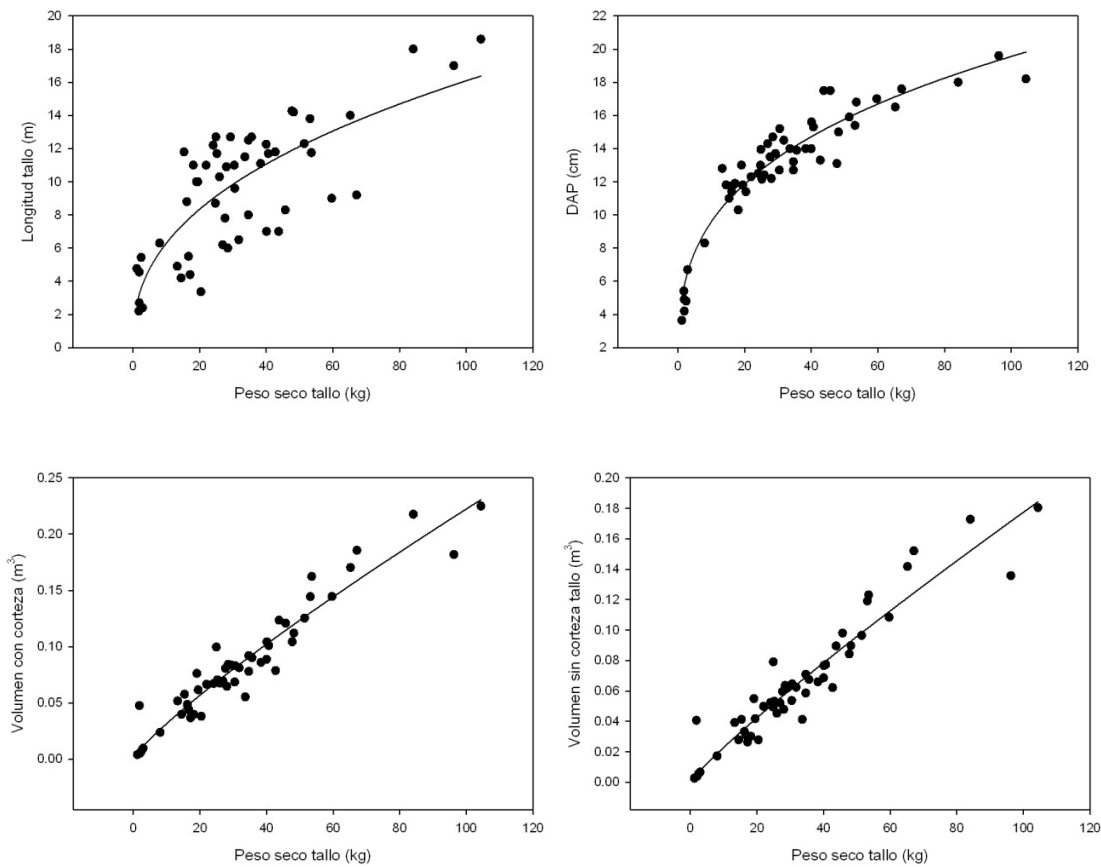
**Figura 22.** Modelos de crecimiento en función de tiempo térmico y relaciones alométricas en la especie *Pinus patula*



**Figura 23.** Modelos de relaciones alométricas volumen peso seco tallo y modelos de crecimiento en función de tiempo térmico en *Pinus patula*

**Tabla 11.** Modelos y parámetros de crecimiento y relaciones alométricas en la especie *Pinus patula*

<b>Dependiente</b>	<b>Explicativa</b>	<b>Modelo</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Longitud de tallo	Tiempo térmico	$f=40.2966*(1-\exp(-1.41212e-005*\mathcal{D} \text{ acumulados}))$	0.93
Volumen con corteza	Peso seco tallo	$VCC \text{ (m}^3/\text{árbol)} = 1.07179/(1+\exp(-(\mathcal{D} \text{ acumulados}-54995.4)/16072.7))$	0.85
Volumen sin corteza	Peso seco tallo	$VSC \text{ (m}^3/\text{árbol)} = 1.00805/(1+\exp(-(\mathcal{D} \text{ acumulados} - 56098.6)/16311.3))$	0.85
DAP	Tiempo térmico	$f=32.9824*(1-\exp(-2.87041e-005*\mathcal{D} \text{ acumulados}))$	0.95
Longitud de tallo	Peso seco tallo	$\text{Long. Tallo (m)} = 26.3734*(1-\exp(-0.0100088*\text{PsTallo (Kg)}))$	0.91
% peso seco tallo	Tiempo térmico	$\% \text{ PsTallo}/\text{árbol} = 65.5993*(1-\exp(-8.00052e-005*\mathcal{D} \text{ acumulados}))$	0.71
Peso seco ramas	Tiempo térmico	$\% \text{ PsRamas}/\text{árbol} = 14.5444 + 18.444*\exp(-5.05087e-005*\mathcal{D} \text{ acumulados})$	0.41
Distribución raíz	Tiempo térmico	$\% \text{ PsRaíz}/\text{árbol} = 9.27327+10.1774*\exp(- 1.93328e-005*\mathcal{D} \text{ acumulados})$	0.41



**Figura 24.** Modelos de crecimiento en función de tiempo térmico y relaciones alométricas en la especie *Tabebuia rosea*

**Tabla 12.** Parámetros de los modelos de crecimiento y relaciones alométricas en la especie *Tabebuia rosea*

Dependiente	Explicativa	Modelo	a	b	X <sub>0</sub>	R <sup>2</sup>
Longitud de tallo	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	2,4530	0,4084		0.60
Volumen con corteza	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	0,0045	0,8489		0.92
Volumen sin corteza	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	0,0029	0,8898		0.90
DAP	Tiempo térmico	$f= a/(1+\exp(-(x-x_0)/b))$	14,3666	1615,85	11507,22	0.64
DAP	Peso seco tallo	$f=a*x^b$	4,6850	0,3103		0.92
Area foliar total	Tiempo térmico	$f=a*(1-\exp(-b*x))$	47,4754	0,65632		0.18
Biomasa total	Tiempo	$f=a*(1-\exp(-b*x))$	155,3287	0,23077		0.27

	térmico					
Peso seco tallo	Tiempo térmico	$f=a*(1-\exp(-b*x))$	212,9275	0,07702		0.27
Peso seco raíz	Tiempo térmico	$f=a*(1-\exp(-b*x))$	31,3216	0,000248		0.25

## MODELOS DE RESPUESTA FOTOSINTÉTICA, ARQUITECTURALES Y DE INTERCEPTACIÓN DE LA RADIACIÓN.

### METODOLOGIA

Se seleccionaron los siguientes sitios para la realización de las mediciones de intercambio gaseoso para la obtención y validación de los parámetros de los modelos de respuesta fotosintética, arquitecturales y de interceptación de radiación, en cada una de las especies nuevas incluidas en el CREFT y las que ya se encontraban en el modelo:

- *T. grandis*, en plantaciones comerciales de la empresa Reforestadora del Caribe con latitud N 07° 53' 14.9" y longitud W 75° 40' 3 1.6" en el municipio de Puerto Libertador Departamento de Córdoba a 10 m.s.n.m.
- *A. mangium* en plantaciones comerciales de Refocosta S.A. en Villanueva departamento de Casanare.
- *P. tecunumanii* en plantaciones comerciales de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia, ubicadas en la finca Angela María con latitud N 04°50'05.9" y longitud W 75° 37'14.5' en el municipio de Santa Rosa de Cabal departamento de Risaralda.
- *G. arborea* y *P. quinata* en predios de Monterrey Forestal en el municipio de Zambrano Departamento de Bolívar con latitud N 09°43'03.6" y longitud W 74°51'13.5" a 84 m.s.n.m.
- *P. caribea* y *E. pellita* en plantaciones de Refocosta S.A. en Villanueva departamento de Casanare.
- *Pinus patula* en predios de Smurfit Kappa Cartón de Colombia en el municipio de Salento Departamento de Quindío con latitud N 04°35'58.2" y longitud W 75°31'50.6".
- *E. grandis* en plantaciones de Smurfit Kappa Cartón de Colombia en el municipio de Pereira Departamento de Risaralda.
- *C. alliodora* en la finca La Chinita en zona del proyecto Procuencia ubicada en el municipio de Manizales Departamento de Caldas.
- *A. acuminata* en el sector de Sabinas municipio de Manizales con latitud 5°02' N y longitud 75°25' W a 2485 m.s.n.m.
- *T. rosea* en la finca Refopal sector nuevo agrado en el municipio de San Antero en el departamento de Córdoba a 90 m.s.n.m.

El procesamiento de muestras se realizó en el Centro Nacional de Investigaciones del Café (CENICAFE) ubicado en Planalto - Chinchiná, Departamento de Caldas.

## Respuesta fotosintética en hojas individuales

Para medir el intercambio gaseoso se utilizó el equipo portátil de fotosíntesis LCI - ADC BioScientific Ltd. Se escogieron plantas de aproximadamente tres años de edad, en rodales sanos con normal crecimiento. Se evaluaron tres árboles por especie y en cada uno se tomaron hojas maduras. Las mediciones se realizaron desde antes del amanecer hasta las primeras horas en la noche con intervalos de 2 a 4 horas.

Para calcular la fotosíntesis de la planta a partir de la obtención de la asimilación máxima en hojas individuales, el modelo CREFT aplica la ecuación propuesta por Goudriaan (1986), la cual relaciona algunos parámetros generados en mediciones de hojas individuales con el IAF, la RFA y el coeficiente de extinción de la luz,  $k$  ecuación (2), para obtener una estimación aproximada del valor de la asimilación instantánea de CO<sub>2</sub> en la planta completa.

$$A_p = \frac{A_m}{k} \ln \left( \frac{A_m + \epsilon k RFA}{A_m + \epsilon k RFA e^{-kIAF}} \right) AFT \quad (2)$$

En Donde:

$A_p$ : Asimilación instantánea de CO<sub>2</sub> en la planta completa

$A_m$ : Asimilación máxima (asíntota de la regresión que describe la relación entre la RFA y la asimilación instantánea de CO<sub>2</sub> en hojas individuales).

$\epsilon$ : Rendimiento cuántico de la hoja (aceleración de la fase inicial de la regresión que describe la relación entre la RFA y la asimilación instantánea de CO<sub>2</sub> en hojas individuales).

$k$ : Coeficiente de extinción de la luz

IAF: Índice de área foliar (parámetro que ingresa al modelo en función del tiempo térmico).

AFT: Área foliar total.

Los parámetros de  $A_m$ , RFA y  $\epsilon$ , del modelo anterior se obtuvieron ajustando los datos de Asimilación de CO<sub>2</sub> y RFA mediante el modelo:

(3)

$$A = (Am + Rd) \left( 1 - e^{-\frac{\epsilon RFA}{Am + Rd}} \right) - Rd$$

En donde:

A: Asimilación neta de CO<sub>2</sub> en hojas individuales

Am: Asimilación máxima de CO<sub>2</sub> (asíntota de la regresión que describe la relación entre la RFA y la asimilación instantánea de CO<sub>2</sub> en hojas individuales)

Rd: Respiración Oscura

ε: Eficiencia cuántica

Las demás relaciones empíricas de dos variables se hicieron ajustando modelos no lineales con el algoritmo de Levenberg-Marquardt (1963) utilizando Sigmaplot 10. Los modelos ajustados se muestran en la tabla 15.

Las relaciones empíricas tridimensionales se modelaron a través del ajuste de paraboloides de la forma:

(4)

$$f = y_0 + ax + by + cx^2 + dy^2$$

En este caso para obtener los máximos se igualaron las derivadas parciales a cero calculando los puntos críticos y después se reemplazaron en la función original.

(5)

$$\frac{\partial f}{\partial x} = a + 2cx = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = b + 2dy = 0$$

En el caso particular de *A. acuminata* la relación entre la asimilación, la RFA y TL se ajustó mediante el modelo gaussiano bivariado de la forma:

(6)

$$f = ae^{\left[ -0.5 \left( \frac{x-x_0}{b} \right)^2 - 0.5 \left( \frac{y-y_0}{c} \right)^2 \right]}$$

En donde *a* equivale a la asimilación máxima, X<sub>0</sub> a la temperatura óptima y Y<sub>0</sub> a la radiación óptima.