

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Ecuaciones Alométricas para Estimar Biomasa Aérea y Carbono en *Pinus johannis* M.F.  
Robert y *Acacia constricta* Benth en Mazapil, Zacatecas

Por:

**LUIS MAURICIO PÉREZ ZÁRATE**

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Ecuaciones Alométricas para Estimar Biomasa Aérea y Carbono en *Pinus johannis* M.F.  
Robert y *Acacia constricta* Benth en Mazapil, Zacatecas

Por:

**LUIS MAURICIO PÉREZ ZÁRATE**

Tesis

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO FORESTAL**

Aprobada

Dr. Jorge Méndez González  
Asesor Principal

M.C. Celestino Flores López  
Coasesor

M.C. José Aniseto Díaz Balderas  
Coasesor

Dr. Leobardo Bañuelos Herrera  
Coordinador de la División de Agronomía

Cordinación  
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2013

Esta tesis ha sido apoyada por el proyecto de investigación: “Funciones para estimar biomasa aérea e incrementos anuales de la fijación de carbono en plantaciones forestales de importancia ecológica” que ejecuta la Minera Peñasquito Goldcorp.

Con clave del proyecto: 3613-7169

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A Dios**

Por prestarme vida y aliento para lograr un paso más en mi crecimiento personal y espiritual, porque “No se mueve ni una hoja sin la voluntad de Dios”.

### **A mi Alma Terra Mater**

La “Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro” por abrirme sus puertas, permitirme ser estudiante de la carrera Ingeniero Forestal, por recibirme día a día en sus instalaciones y brindarme el conocimiento necesario por medio de todos sus profesores para hacer de mí una persona con criterio y desarrollo social.

### **Al Dr. Jorge Méndez González**

Por sus conocimientos brindados a lo largo de la carrera y en el proceso de mi proyecto de tesis, pero sobre todo por su paciencia y consejos que me ayudaron a entender que los logros y éxitos son de quienes se esfuerzan día con día.

### **Al M.C. José Aniseto Díaz Balderas y M.C. Celestino Flores López**

Por su valioso tiempo en la revisión de este proyecto, así como por todos los conocimientos brindados y la convivencia dentro y fuera del aula de clases.

### **A la minera Peñasquito Gold Corp**

Por prestar sus instalaciones y permitirme ser parte de uno de sus proyectos que ayuda al desarrollo de mi investigación científica.

### **A mis amigos de la carrera Ingeniero Forestal**

Filiberto, Maximiliano, Emmanuel Pérez, Hernán, Néstor, Adarcilio, Carmen, Mirna, Ilse, Lady, Víctor Rivas y Familia, por regalarme su amistad a lo largo de cinco valiosos años y acompañarme en momentos de alegría y de tristeza.

### **A mis compañeros de casa**

Sergio Cruz, Evelio García, Erick Marín, Cristian Serrano, Eduardo Ucán, Jorge García, Paul García, Valentín Zúñiga, Fidel, Jorge Palma, Enrique García, Julio Castro, Lucia Moreno y Luciano Soto, por ser parte de mi segunda familia, mi apoyo moral, por soportar mi mal humor, bromas, malos entendidos y por brindarme su cariño incondicional durante mi estancia en Saltillo.

### **A la biblioteca pública del estado “Manuel Múzquiz Blanco”**

Por recibirme en sus instalaciones para hacer consultas, avances en mi proyecto de tesis, a su personal que siempre me recibió con un trato cálido y amable.

### **Al Lic. Pedro Luis Alonso Ramírez**

Por su apoyo moral y amistad brindada en mi estancia en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

## **DEDICATORIA**

### **A mis padres**

Con la mayor gratitud por la confianza depositada y los esfuerzos realizados para que yo lograra terminar mi carrera profesional, siendo para mí la mejor herencia; porque en ustedes tengo a mis mejores amigos.

### **Ana Luis Zárate Enríquez**

Mi madre: eres el ser más maravilloso del mundo, desde pequeño he admirado tu fortaleza para salir adelante y la calidez de tus palabras al demostrarnos amor. Quiero darte gracias porque has sabido hacer de mí un hombre con valores, gracias por el apoyo moral, tu cariño y comprensión que desde pequeño me has brindado; por guiar mi camino y estar conmigo en los momentos más difíciles, por regalarme tu juventud y dedicar una vida entera a nosotros “tus hijos”.

### **Jorge Enrique Pérez Hernández**

Mi padre: desde pequeño te he admirado, reconozco tu esfuerzo y dedicación para lograr lo que te propones, quiero darte gracias porque siempre estuviste ahí para aconsejarme y corregir mi camino, porque en ti tengo a mi mejor amigo.

### **A mi hermano Juan Carlos Cal y Mayor Trinidad**

Por sus consejos, su cariño y por ser un gran ejemplo a seguir en mi vida personal y profesional.

### **A mis hermanas Xóchitl Rubí e Itzel Margarita Pérez Zárate**

Quienes han sido mi más grande fuente de inspiración a lo largo de toda mi vida, por haber compartido conmigo momentos familiares difíciles y aun así regalarme una sonrisa o un abrazo que me motivó a ser mejor día con día, para que vieran en mí un ejemplo a seguir; por regalarme travesuras, momentos de preocupación y angustia y sobre todo su amor puro e incondicional.

## **A mis abuelos**

### **Oscar Zárate y Carmen Enríquez**

Por haberme acogido en mi infancia como un hijo propio. Mi abuelo con su forma tan especial de demostrarnos cariño, a base de maldades y bromas, siempre un hombre fuerte y firme a quien admiro y respeto. Mi abuela por todo su amor y preocupación de madre hacia mí, hoy más que nunca quiero agradecerles por regalarme noches de desvelo y cuidado, corregir mis travesuras, hacer suyos mis éxitos y guiar mis pasos para hacer de mí un hombre responsable; por haberme regalado en su persona a un padre y una madre.

### **Francisco Pérez y Carmen Hernández**

Gracias por sus sabios consejos, las bendiciones de cada viaje, por siempre hacer oración por mí y por todos mis primos, por el cariño brindado en momentos difíciles.

## **A mis tíos**

Abel y María Cecilia, Francisco Javier y Luz Elba, Ana María Margarita, José Antonio, Humberto y Juani, Sonia Zárate, Huber Zárate y Lupita Arce.

### **A Areli Lázaro Santos**

Por regalarme momentos de alegría, comprensión y darme ánimos para terminar este proyecto, gracias por estar a mi lado.

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE</b> .....	i
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	iii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	iv
<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	2
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	6
Caracterización del área de estudio .....	6
Descripción de las especies .....	6
<i>Pinus johannis</i> .....	6
<i>Acacia constricta</i> .....	7
Muestreo de biomasa de <i>Pinus johannis</i> .....	7
Muestreo de biomasa de <i>Acacia constricta</i> .....	8
Determinación de biomasa seca para <i>Pinus johannis</i> y <i>Acacia constricta</i> .....	8
Generación de modelos alométricos para cuantificar biomasa .....	9
Criterios de selección del modelo .....	10
Determinación de carbono y carbono equivalente .....	11
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	12
Estadísticas descriptivas de <i>Pinus johannis</i> .....	12

Relación alométrica tamaño - biomasa, carbono y carbono equivalente para <i>Pinus</i> <i>johannis</i> .....	14
Estadísticas descriptivas de <i>Acacia constricta</i> .....	17
Relación alométrica tamaño - biomasa, carbono y carbono equivalente para <i>Acacia</i> <i>constricta</i> .....	19
<b>CONCLUSIONES</b> .....	25
<b>LITERATURA CITADA</b> .....	26

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Estadísticos básicos de las variables dendrométricas de <i>Pinus johannis</i> y <i>Acacia constricta</i> en Mazapil, Zacatecas, México .....	13
<b>Cuadro 2.</b> Modelos y estadísticos de ajuste para la estimar biomasa verde y seca en <i>Pinus johannis</i> y <i>Acacia constricta</i> en Mazapil, Zacatecas, México .....	15
<b>Cuadro 3.</b> Parámetros de regresión de las ecuaciones para estimar biomasa total verde y seca en <i>Pinus johannis</i> y <i>Acacia constricta</i> en Mazapil, Zacatecas, México.....	24

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Biomasa verde (A), biomasa seca, carbono, carbono equivalente (B) y distribución de residuales (C, D) para <i>Pinus johannis</i> en Mazapil, Zacatecas, México. ....	16
<b>Figura 2.</b> Biomasa verde y distribución de residuales de las ecuaciones seleccionadas para la forma vara (A, C) y grupo (B, D) para <i>Acacia constricta</i> en Mazapil, Zacatecas, México.....	21
<b>Figura 3.</b> Biomasa seca y distribución de residuales de las ecuaciones seleccionada por componente vara (A, C) y grupo (B, D) para <i>Acacia constricta</i> en Mazapil, Zacatecas, México.....	23

## RESUMEN

Los procesos productivos, el transporte y otros sistemas dependen de la energía que deriva del uso de combustibles fósiles, aumentando la concentración de los gases de efecto invernadero. Es importante generar estudios de biomasa y captura de carbono ya que permiten evaluar en qué medida la vegetación fija el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El presente estudio tuvo como objetivos, generar ecuaciones alométricas que permitan estimar la biomasa, carbono (C) y carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) en *Pinus johannis* M.F. Robert y *Acacia constricta* Benth en Mazapil Zacatecas, México, y de esta manera resaltar el valor ecológico de las especies como almacenadoras de CO<sub>2</sub> para pago por servicios ambientales. Para realizar el presente estudio se colectaron 50 varas y 14 grupos de *Acacia constricta* Benth que se analizaron para estimar biomasa por el método destructivo. Para la especie *Pinus johannis* M.F. Robert se tuvo un tamaño de muestra de 40 árboles obteniendo la biomasa por el método no destructivo “Adelaide” dado que es una especie protegida por la NOM -059 - SEMARNAT - 2010. Se estableció una relación alométrica entre la biomasa verde y biomasa seca con las variables obtenidas en campo. Los resultados indican que se puede estimar biomasa con las variables dendrométricas. La ecuación para *Pinus johannis* M.F. Robert presenta valores de R<sup>2</sup> ajustada mayores a 0.70 y *Acacia constricta* Benth cercanos a 0.90, lo cual indica que los modelos generados son confiables para estimar biomasa.

**Palabras clave:** Huizache, Carbono, Arbusto, Piñón, Zonas áridas.

## ABSTRACT

Productions processes, transport and domestic systems, depends on the energy derived from fossil fuels increasing the concentration of greenhouse gases. Is important to generate biomass studies and carbon sequestration because they allow assess to what extend the vegetation fixed the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). This study aimed to: generate allometric equations to estimate biomass, carbon (C) and carbon equivalent (CO<sub>2</sub>e) in *Pinus johannis* M.F. Robert and *Acacia constricta* Benth in Mazapil, Zacatecas, México, and highlight the ecological value of the species as CO<sub>2</sub> storing for payment environmental services (PES). For this study were collected 50 stems and 14 groups of *Acacia constricta* Benth were analyzed for estimate biomass by destructive method. For *Pinus johannis* M.F. Robert 40 trees were collected and analyzed to estimate biomass by nondestructive method “Adelaide” because it is a protected species by the NOM - 059 - SEMARNAT – 2010. Allometric relationship was established between biomass and variables measured in field. The results indicate that biomass can be estimated with dendrometrics variables. *Pinus johannis* M.F. Robert has values of R<sup>2</sup> adjusted higher than 0.70 and *Acacia constricta* Benth has values close to 0.90, this indicate that equations are reliable to estimate biomass.

**Keywords:** Huizache, carbon, shrub, pine seed, arid zones.

## INTRODUCCIÓN

El efecto invernadero es un proceso natural que ha sido acelerado por el hombre, ya que la mayor parte de los procesos productivos, el transporte y los sistemas domésticos dependen de la energía que deriva del uso de combustibles fósiles, aumentando la concentración de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>) en la atmósfera, conocidos como gases de efecto invernadero (GEI) (IPCC, 2013). La acumulación de este conjunto de gases, ocasiona problemas como: el calentamiento de la atmósfera inferior, de la superficie de la tierra y un enfriamiento compensatorio de la alta estratósfera, fenómeno conocido como efecto invernadero (Fernández, 1991) principal causa del cambio climático; este fenómeno ha sido reconocido como una amenaza seria para la naturaleza (IPCC, 2013). Ante la preocupación por el constante aumento de los GEI, se han implementado diferentes estrategias para capturar el carbono y así reducir la concentración del CO<sub>2</sub> en la atmósfera, ya sea a través de procesos bióticos o abióticos (Díaz *et al.*, 2007); el manejo de los recursos forestales representa una medida de mitigación, ya que tienen el potencial de amortiguar la tasa de incremento del bióxido de carbono en la atmósfera, por su efecto de almacenamiento. Los ecosistemas forestales son responsables de alrededor del 20 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> por la deforestación y degradación de los bosques, esto aunado a las concentraciones crecientes de carbono en la atmósfera, han promovido un interés creciente en los ecosistemas forestales por su papel en la absorción y fijación del carbono atmosférico (Gayoso y Schlegel, 2001). La asimilación de CO<sub>2</sub> por los ecosistemas forestales tiene efectos importantes en el balance global del carbono (Dixon *et al.*, 1994; Brown, 2002), ya que es fijado por la vegetación en moléculas de carbono en el proceso de fotosíntesis y constituye aproximadamente el 50 % de su biomasa seca (Gayoso y Schlegel, 2001; Figueroa *et al.*, 2005).

Los bosques, selvas y otras áreas con vegetación natural ocupan 73 % del territorio nacional (CONAFOR, 2009), esto indica que México es un almacén potencial de CO<sub>2</sub>. El sector forestal requiere el desarrollo de indicadores de biomasa y contenido de carbono para orientar la ordenación de bosques hacia la sostenibilidad (Gasparri y Manghi, 2004). En este sentido la biomasa aérea de las plantas puede ser estimada por métodos directos e indirectos, dentro del primero, se encuentra el destructivo, que consiste en cortar el árbol y determinar su biomasa pesando directamente cada componente (Araújo *et al.*, 1999), el indirecto utiliza fórmulas cuyos parámetros para predecir biomasa se obtienen mediante un muestreo del árbol, por ejemplo el método Adelaide, el cual debido a su naturaleza no destructiva ha sido recomendado por Foroughbakhch *et al.* (2005) para estimar biomasa en especies del tipo arbustivas leñosas.

Generar estudios de biomasa en árboles es importante puesto que poseen un comportamiento dinámico en crecimiento, es decir presentan flujos de captura de carbono más rápido y de mayor magnitud en comparación con estudios de carbono en suelo (Giraldo *et al.*, 2006), además de que permiten evaluar la estructura y condición de un bosque, cuantificar su productividad, determinar la cantidad de carbono fijado, la tasa de fijación de CO<sub>2</sub> y con ello valorar el impacto en la mitigación de gases efecto invernadero (Méndez *et al.*, 2011), las ecuaciones de biomasa han sido desarrolladas para especies tropicales (Návar, 2009), templadas (Díaz *et al.*, 2007; Méndez *et al.*, 2011), sin embargo las especies de zonas áridas han sido poco estudiadas, a pesar de que los matorrales xerófilos representan el 41 % de los ecosistemas existentes y poseen amplia distribución en el país; las plantaciones forestales en las zonas áridas han tomado vital importancia para satisfacer la demanda interna de productos forestales y elevar la calidad de vida de 13 millones de personas en 23 mil ejidos y comunidades (CONAFOR, 2009). Del género *Pinus* hay una gran cantidad de estudios de

biomasa e.g. (Díaz *et al.*, 2007; Méndez *et al.*, 2011), pero no se encuentran registros de este tipo de estudios en *Pinus johannis* M.F. Robert. Del género *Acacia*, en Colombia, Giraldo *et al.* (2006) estimaron el flujo y la captura de carbono en diferentes compartimientos de *A. mangium*, además de realizar aproximaciones para la evaluación del flujo de carbono entre los animales y el suelo. Al sur de Texas, USA, Northup *et al.* (2005) generaron ecuaciones para estimar biomasa, carbono y nitrógeno en *A. rigidula*. En México, se han hecho estudios de biomasa por métodos no destructivos en *A. farnesiana* (L.) Wild, *A. rigidula* Benth y *A. berlandieri* Benth, en el matorral espinoso tamaulipeco (Foroughbakhch *et al.*, 2005; Foroughbakhch *et al.*, 2009) y por métodos destructivos (Návar *et al.*, 2004). Ya que no existen estudios de biomasa para *Pinus johannis* M.F. Robert y *Acacia constricta* Benth, este estudio tiene como objetivo generar ecuaciones alométricas que permitan estimar la biomasa y por ende el carbono (C) y carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) en *Pinus johannis* M.F. Robert y *Acacia constricta* Benth en Mazapil Zacatecas, y de esta manera resaltar el valor ecológico de las especies como almacenadoras de CO<sub>2</sub> para pago por servicios ambientales.

Se plantea como hipótesis que no hay diferencia en los ajustes de *Acacia constricta* Benth para estimar biomasa entre las formas vara y grupo, así como también que las variables diámetro de copa y altura son capaces de predecir de manera aceptable la biomasa de *Pinus johannis* M.F. Robert.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Caracterización del área de estudio

El presente estudio de biomasa para *Pinus johannis* M.F. Robert y *Acacia constricta* Benth se realizó en áreas naturales pertenecientes a la empresa minera Peñasquito, S.A de C.V. filial mexicana de Goldcorp Inc., situadas en el municipio de Mazapil Zacatecas (24° 18' N y 101° 36' O) que presenta una temperatura media anual de 16 °C, precipitación de 442.5 mm anuales (Medina y Ruiz, 2004), vegetación dominante a nivel macro región como el matorral xerófilo representado por géneros como *Agave*, *Yucca*, *Dasyllirion*, *Larrea*, *Opuntia* y a nivel micro región como el matorral desértico micrófilo caracterizado por la predominancia de especies arbustivas de hojas pequeñas pero no siempre espinosas (Rzewdoski, 2006). La minera se encuentra ubicada a 15 kilómetros de la carretera federal 54 (Zacatecas - Saltillo) a una altitud media de 2239 msnm.

### Descripción de las especies

***Pinus johannis*:** Nativo de México, se clasifica como una especie sujeta a protección especial según el listado de especies de la NOM - 059 - SEMARNAT - 2010. Robert (1978) describe a *Pinus johannis* M.F. Robert como un arbusto de 1 a 4 metros de alto, ramificado desde la base, habitualmente más ancho que alto, con tallo corto, sin embargo, Perry (1991) menciona que es casi arbustivo con muchos tallos, quizá más arbusto que árbol, que raramente crece más de 4 m, la altura más común es de 2 a 3 metros y se encuentra en zonas áridas, a altitudes de hasta 2800 msnm en regiones de clima seco templado, por toda la sierra madre oriental y occidental, reportándose importantes poblaciones en Mazapil, concepción del Oro

Zacatecas, y en los límites de Aramberri, Nuevo León. El suelo en el que se desarrolla la especie es rendzina lítica de textura arenosa con un pH promedio de ocho (Robert, 1978).

***Acacia constricta***: Es una planta perenne y nativa de México que se distribuye en los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Tamaulipas y Puebla, describiéndose como un arbusto alto, hasta 5 metros, la mayoría de las veces tiene espinas localizadas en pares, delgadas y fuertes, de color blanco, las flores son pequeñas, fragantes de color amarillo dorado, estas flores modifican su color principalmente debido a que los estambres son de 30 a 40 en cada una, el fruto se presenta de julio a septiembre, generalmente es abundante en suelos arenosos, secos o de caliche calcáreo, se le encuentra en altitudes de 475 a 1800 msnm (Parker, 1972). Raymond *et al.* (1995) han reportado poblaciones de *Acacia constricta* Benth en baja california, en Estados Unidos en Arizona, Nuevo México y Texas.

### **Muestreo de biomasa de *Pinus johannis***

*Pinus johannis* M.F. Robert se encuentra sujeta a protección especial (NOM - 059 - SEMARNAT - 2010), por lo que para el muestreo de biomasa se utilizó el método de Adelaide. Foroughbakhch *et al.* (2005) describen este método como simple, práctico y preciso a pesar de las muy variadas características de las plantas leñosas, además de que por su naturaleza es un método no destructivo; consiste en la cubicación del árbol mediante la selección de una rama de la especie, esta rama se llama unidad de referencia (Andrew *et al.*, 1979), la cual deberá de ser representativa de las principales características, tamaño, densidad foliar de las demás ramas y deberá ser tomada a la altura media de la copa (Andrew *et al.*, 1979; Foroughbakhch *et al.*, 2009), se infiere el peso verde total del árbol (Bv) multiplicando la unidad de referencia por el número de veces que ésta representa el árbol completo (cada

unidad de referencia se pesó en fresco con ayuda de una báscula Torrey modelo Sx 30 con una capacidad de 30 kg y un gramo de precisión). En los 40 árboles muestreados se obtuvieron las variables diámetro del fuste a la base (Db) con ayuda de cinta diamétrica, diámetro de copa (Dc) y altura total (H) usando flexómetro de 3 m y finalmente número de ramas.

### **Muestreo de biomasa de *Acacia constricta***

Los individuos seleccionados no presentaron deformidades y estuvieron libres de plagas y enfermedades como lo sugieren Nívar *et al.* (2001). Para estimar biomasa en *Acacia constricta* Benth se optó por hacerlo en dos formas en vara y grupo, debido a que en campo se encontraron varas individuales así como conjuntos de varas a los cuales se les llamó “grupo”, se analizaron 50 varas y 14 grupos de *A. constricta* Benth por el método destructivo. El diámetro a la base (Db) de *Acacia constricta* Benth se midió con ayuda de cinta diamétrica, en dos formas, por vara y por grupo; para altura (H) y diámetro de copa (Dc) se usó flexómetro, también se cuantificó el número de varas (exclusivo de grupos), posteriormente como lo sugiere Nívar *et al.* (2004) las plantas fueron derribadas y pesadas con báscula marca Torrey modelo Sx 30 con una capacidad de 30 kg y un gramo de precisión para obtener el peso total verde.

### **Determinación de biomasa seca para *Pinus johannis* y *Acacia constricta***

Para determinar el peso seco de los árboles/arbustos y obtener su contenido de humedad se tomaron muestras frescas en campo de los individuos desde 500 a 5000 g aproximadamente como lo sugiere Giraldo *et al.* (2006), las muestras se secaron en estufa Hildebrand marca Brunner, se aplicó una temperatura de 105 °C durante varios días hasta que las mediciones de su peso se hicieran constantes como lo sugieren Nívar *et al.* (2001). De

acuerdo con Schelegel *et al.* (2001) la biomasa total de los árboles se determinó mediante la relación biomasa seca - biomasa verde de las muestras, calculando primero el contenido de humedad, utilizando el peso verde y seco de las muestras con las ecuaciones:

$$\mathbf{CH = ((Phs - Pss)) / Pss * 100)}$$

Donde:

CH = contenido de humedad (%)

Phs = Peso húmedo muestra (g)

Pss = Peso seco muestra (g)

$$\mathbf{B = PhBt / (1 + (CH / 100))}$$

Donde:

B = Biomasa seca (g)

PhBt = Peso húmedo total de biomasa (g)

CH = Contenido de humedad (%)

### **Generación de modelos alométricos para cuantificar biomasa**

Para generar ecuaciones para estimar biomasa verde y seca, las variables dendrométricas medidas en campo se transformaron a logaritmo natural y se estableció una relación alométrica entre las variables dependientes: biomasa verde y biomasa seca total (Bs) de *Pinus johannis* M.F. Robert y *Acacia constricta* Benth, y las variables independientes: (diámetro a la base, altura, diámetro de copa) y sus transformaciones logarítmicas (Logaritmo natural de diámetro a la base (LnDb), Logaritmo natural de altura (LnH) y logaritmo natural de diámetro de copa (LnDc)), para en posteriormente utilizar el modelo alométrico tradicional

(1) y su transformación lineal (2) utilizadas por Díaz *et al.* (2007) y Méndez *et al.* (2012) usando el programa Statistical Analysis System (SAS versión 9.0).

Modelo alométrico tradicional

$$Y = B_0 * X^{\beta_1} \quad (1)$$

Su forma lineal

$$\text{Ln } Y = \beta_0 + \beta_1 * \text{Ln } X \quad (2)$$

Donde:

Y = biomasa verde total y biomasa seca total (kg);  $\beta_0$  y  $\beta_1$  = parámetros de la regresión; X = diámetro a la base, altura, diámetro de copa, logaritmo natural de diámetro a la base, logaritmo natural de altura, logaritmo natural de diámetro de copa; Ln Y = logaritmo natural de biomasa verde total y biomasa seca total; Ln X = logaritmo natural de diámetro a la base, altura, diámetro de copa.

Para *Pinus johannis* M.F. Robert el diámetro a la base y su transformación logarítmica se excluyó de las variables independientes, debido a que es difícil de obtener en campo tomando en cuenta las características morfológicas de la especie.

### **Criterios de selección del modelo**

Los criterios empleados en la selección de los mejores modelos para estimar biomasa verde y biomasa seca total de las especies estudiadas, según Nívar *et al.* (2004) y Foroughbakhch *et al.* (2009), fueron los siguientes:

- 1) Valor de  $R^2$  ajustada.
- 2) Error estándar (Sxy).
- 3) Significancia del modelo ( $P < 0.05$ ).

- 4)  $R^2$  de predicción ( $R^2_p$ ).
- 5) Análisis gráfico de dispersión de residuales.
- 6) Test Durbin - Watson.
- 7) Suma de cuadrados del error de predicción (PRESS).
- 8) Coeficiente de variación (%).
- 9) Sencillez del modelo.
- 10) Significancia estadística de los parámetros de regresión ( $P \leq 0.05$ ).

### **Determinación de carbono y carbono equivalente**

Para estudios de captura de carbono, Gayoso y Guerra (2005) destacan la importancia de contar con la cuantificación de carbono con base en información diferenciada por especie y componentes del árbol. En este estudio se toma en cuenta lo dicho por Figueroa *et al.* (2005) donde asumen que sin diferenciar especies el valor de la fracción de carbono en la materia seca es del 50 %, por lo que para cuantificar el carbono almacenado de las especies *Pinus johannis* y *Acacia constricta* se multiplicó la biomasa seca total por la fracción de carbono. El  $CO_2e$  se obtuvo multiplicando el carbono almacenado de las especies *Pinus johannis* M.F. Robert y *Acacia constricta* Benth por el coeficiente resultante del peso de la molécula de  $CO_2$  (44) entre el peso del átomo de carbono (12) (Méndez *et al.*, 2011).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para obtener los modelos alométricos se usaron las ecuaciones tradicionales utilizadas por Méndez *et al.* (2012), sin embargo para *Pinus johannis* y *Acacia constricta* en forma de grupo se obtuvo bajo ajuste en  $R^2$  ajustada ( $< 0.60$ ) y alto coeficiente de variación ( $> 45 \%$ ). El modelo alométrico tradicional para *Acacia constricta* en forma de vara utilizó la variable diámetro a la base y obtuvo un ajuste en  $R^2$  ajustada de 0.90, con coeficientes de variación altos ( $> 60 \%$ ) en comparación con las  $R^2$  (0.95 y .092) y coeficientes de variación (23.8 y 22.22 %) reportados por Návar *et al.* (2004) para *Acacia farnesiana* y *Acacia rigidula*, por lo que se generó el modelo alométrico mediante stepwise, utilizando las siguientes formas: lineal, lineal con interacciones, cuadrática completa, cuadrática con interacción entre las variables, cúbica completa, de segundo orden sin interacción entre las variables y de tercer orden sin interacción entre las variables.

### Estadísticas descriptivas de *Pinus johannis*

El tamaño de muestra para *Pinus johannis* fue de 40 individuos, de los cuales la media del diámetro a la base (Cuadro 1) fue  $19.08 \pm 7.93$  cm, la media de biomasa verde fue 65.47 teniendo una desviación estándar ( $\pm 49.34$  kg) mayor que la del promedio de biomasa seca ( $51.96 \pm 41.42$  kg). Cada árbol presentó una media de  $16.33 \pm 7.85$  número de varas. En cuanto al contenido de humedad el valor mayor fue de 77.78 % perteneciente a un individuo con 12 cm de diámetro a la base, 2.3 m de altura y biomasa verde de 37.08 kg; la pérdida de peso fue de 16.23 kg por lo que su biomasa seca tiene un valor de 20.86 kg siendo este el individuo que perdió más peso.

**Cuadro1.** Estadísticos básicos de las variables dendrométricas de *Pinus johannis* y *Acacia constricta* en Mazapil, Zacatecas, México.

Especie	Forma	N	Db (cm)	H (m)	Dc (m)	Nr	Nv	Bv (kg)	Bs (kg)	CH %
<i>Pinus johannis</i>		40	19.08 ± 7.93	2.83 ± 0.70	3.96 ± 1.25	16.33 ± 7.85	Na	65.47 ± 49.34	51.96 ± 41.42	31.27 ± 15.95
	Vara	50	2.72 ± 1.38	3.56 ± 1.11	0.99 ± 0.28	Na	Na	1.98 ± 2.46	1.45 ± 1.82	36.11 ± 15.43
<i>Acacia constricta</i>		14	0.47 * ± 0.23 *	3.54 ± 1.10	3.15 ± 1.53	Na	13.79 ± 9.01	20.03 ± 17.56	14.15 ± 11.77	38.65 ± 21.24
	Grupo									

Donde: N = tamaño de muestra, Db = diámetro a la base; (\*) = dato en unidad de metros; H = altura; Dc = diámetro de copa; Nr = número de ramas; Na = no aplica; Nv = número de varas; Bv = biomasa total verde; Bs = biomasa total seca; CH = contenido de humedad.

En este estudio se observa un valor promedio de 2.83 m en la variable altura de *Pinus johannis*, lo cual concuerda con la descripción hecha por Perry (1991) quien indica que la altura máxima de esta especie oscila entre 2 y 3 m, de igual forma, la altura presentó menor variación ( $\pm 0.70$  m) que diámetro a la base ( $\pm 7.93$  cm) y diámetro de copa ( $\pm 1.25$  m) dado

que *Pinus johannis* es una especie arbustiva que crece más a lo ancho que en altura (Robert, 1978).

### **Relación alométrica tamaño - biomasa, carbono y carbono equivalente para *Pinus johannis***

Las ecuaciones para estimar biomasa verde y biomasa seca para *Pinus johannis* mostraron la misma estructura de tipo lineal entre sí (Cuadro 2) debido a que se presentó una variación homogénea en el contenido de humedad ( $31.27 \pm 15.95$  %) (Cuadro 1) al pasar de biomasa verde a biomasa seca, vista en forma gráfica biomasa verde y seca permanecieron con un patrón similar permitiendo que la misma ecuación pueda predecir su comportamiento.

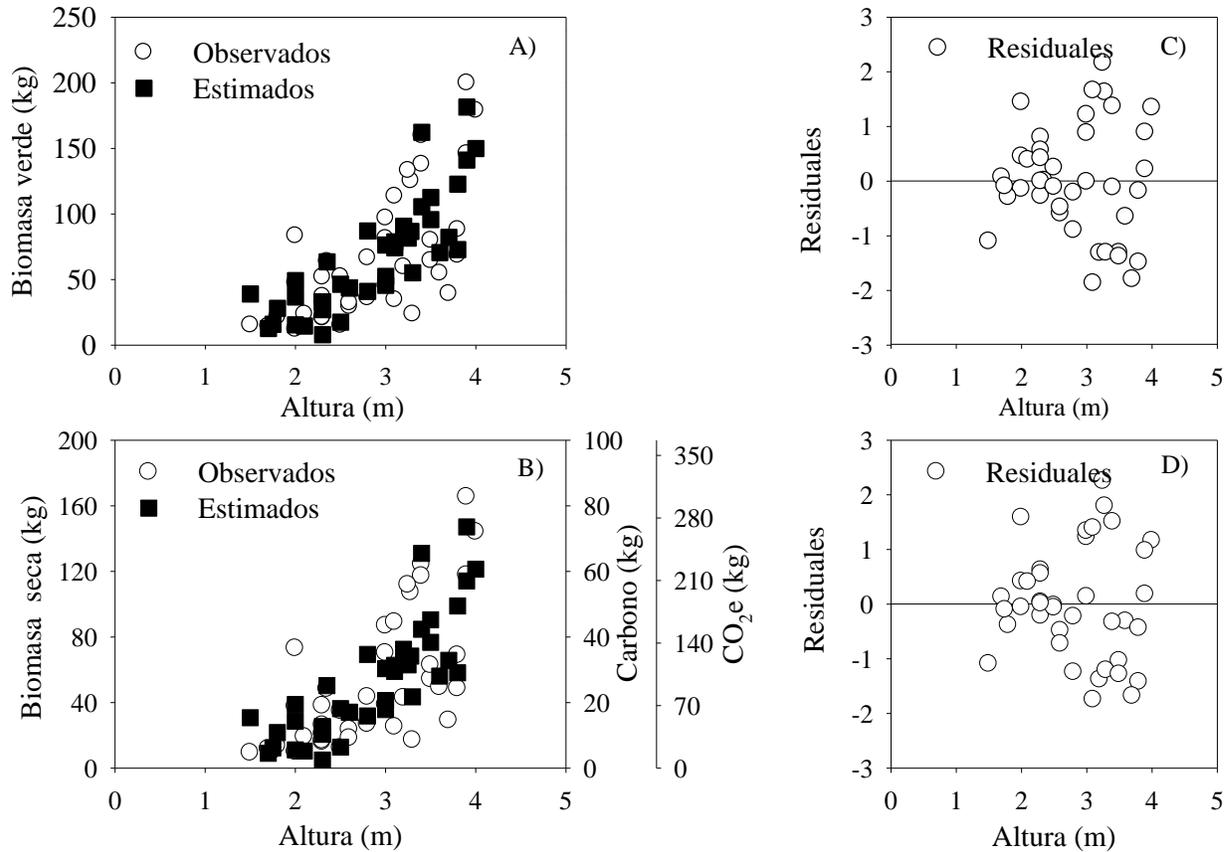
Estimar biomasa verde en *Pinus johannis* (Figura 1A) tuvo un valor de 0.76 en  $R^2$  ajustada, 0.73 en  $R^2$  de predicción, un coeficiente de variación de 37.20 %, distribución de residuales homogéneos (Figura 1C) y un valor P ( $B_1 = 0.0039$  y  $B_2 = 0.0127$ ) en los parámetros de regresión (Cuadro 3) menor que estimar biomasa seca en *Pinus johannis* ( $B_1 = 0.0078$  y  $B_2 = 0.0215$ ). El modelo de biomasa seca en *Pinus johannis* (Figura 1B) tuvo un valor de 0.71 en  $R^2$ , 0.68 en  $R^2$  ajustada, un coeficiente de variación de 42.66 % y una distribución de residuales (Figura 1D) menos homogénea que estimar biomasa verde en *Pinus johannis* (Figura 1C). La ecuación para predecir biomasa verde en *Pinus johannis* presentó mejores valores que biomasa seca en los estadísticos de ajuste antes mencionados (Cuadro 2), sin embargo estimar biomasa seca en *Pinus johannis* presentó mejores valores que estimar biomasa verde en tres estadísticos: 22.16 en error estándar, 21162.87 en la suma de cuadrados del error de predicción (PRESS) y 1.63 en la prueba Durbin - Watson, contra 24.35, 25462.5 y 1.58 respectivamente de la ecuación para predecir biomasa verde.

**Cuadro 2.** Modelos y estadísticos de ajuste para la estimar biomasa verde y seca en *Pinus johannis* y *Acacia constricta* en Mazapil, Zacatecas, México.

Especie	Componente	Y	Ecuación	$R^2_{aj}$	$S_{xy}$	PRESS	$R^2_p$	DW	CV
<i>Pinus johannis</i>		Bv	$= B_0 + B_1 * H * LnDc^2 + B_2 * LnH * LnDc^2$	0.76	24.35	25462.50	0.73	1.58	37.19
		Bs	$= B_0 + B_1 * H * LnDc^2 + B_2 * LnH * LnDc^2$	0.71	22.16	21162.87	0.68	1.63	42.66
<i>Acacia</i>	Vara	Bv	$= B_0 + B_1 * Db * Dc * LnDb$	0.82	1.04	64.09	0.78	1.20	52.52
		Bs	$= B_0 + B_1 * Db * Dc + B_2 * Dc + B_3 * Db$	0.93	0.46	31.30	0.79	1.69	32.72
<i>constricta</i>	Grupo	Bv	$= B_1 * H * LnH^2$	0.86	6.28	595.89	0.85	1.99	31.35
		Bs	$= B_0 + B_1 * Dc * H + B_2 * Dc^2$	0.89	3.99	277.84	0.85	1.56	28.20

Donde: Y = Variable dependiente; Bv = biomasa total verde (kg); Bs = biomasa total seca (kg); H = altura (m); LnDc = logaritmo natural de diámetro de copa; LnH = logaritmo natural de altura; Db = diámetro a la base (cm); Dc = diámetro de copa (m);  $R^2_{aj}$  =  $R^2$  ajustada;  $S_{xy}$  = error estándar (kg); PRESS = suma de cuadrados del error de predicción;  $R^2_p$  =  $R^2$  de predicción; DW = Durbin - Watson d (Prueba para residuos auto correlacionados); CV = coeficiente de variación (%).

Nota: Todos los modelos fueron significativos ( $P < 0.0001$ ).



**Figura 1.** Biomasa verde (A), biomasa seca, carbono, carbono equivalente (B) y distribución de residuales (C, D) para *Pinus johannis* en Mazapil, Zacatecas, México.

El mayor contenido estimado de carbono (82.70 kg) y carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) (303.49 kg) (Figura 1B) de *Pinus johannis* corresponde al individuo con las mayores dimensiones en diámetro a la base (40 cm) y altura (3.9 m), el segundo mayor diámetro de copa (6.3 m), así como uno de los contenidos de humedad más bajos (20 %); por el contrario el menor contenido de carbono estimado (4.69 kg) y carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) (17.22 kg) (Figura 1B) es esta especie, se observa en el segundo menor diámetro a la base (9 cm), la altura más pequeña (1.5 m), el cuarto menor valor de diámetro de copa (2.7 m) y el tercero en mayor contenido de humedad (63.04 %). El análisis de la prueba Durbin - Watson para biomasa

verde y biomasa seca en *Pinus johannis* sugiere estadísticamente una relación altamente significativa, ya que ningún valor es inferior a 1, mientras se tienen valores cercanos a 2 lo cual muestra que los modelos seleccionados para *Pinus johannis* y sus parámetros de regresión (Cuadro 3) contribuyen a estimar adecuadamente la biomasa total verde, biomasa total seca, carbono y CO<sub>2</sub>e.

### **Estadísticas descriptivas de *Acacia constricta***

La biomasa de *Acacia constricta* se obtuvo en dos formas teniendo un tamaño de muestra de 50 individuos en forma de vara. Estudios similares de biomasa realizados en el género *Acacia* por el método destructivo reportan un tamaño de muestra similar (55 árboles) (Giraldo *et al.*, 2006), quienes realizaron una estimación de biomasa y el flujo carbono en *Acacia mangium* en Colombia, utilizando la ecuación  $Bt = 0.1278 D^{2.3635}$ , que a un diámetro promedio (2.72 cm) del presente estudio almacena 1.36 kg de biomasa seca. Northup *et al.* (2005) consideran un tamaño de muestra menor al presente estudio (35 individuos de *Acacia rigidula*) en un estudio para estimar biomasa, contenido de carbono y nitrógeno en un matorral espinoso del sur de Texas, utilizando la ecuación  $\ln(LB) = 3.420 + 1.775 \ln BD$ , que a un diámetro promedio (2.72 cm) del presente estudio almacena 1.65 kg de biomasa seca. Sin embargo Nívar *et al.* (2004) utilizaron un tamaño de muestra de 79, 78 y 18 individuos de *Acacia berlandieri*, *Acacia rigidula* y *Acacia farnesiana* para estimar biomasa en el matorral tamaulipeco del noreste de México utilizando la ecuación  $BT = [0.006009 + (0.241108 * H) + (0.000847 * D^2 * H) (0.47883 * \ln H)] + [(1.946 + (0.01667 * D^2 * H)] + [(- 0.8765 + 0.541821 * D)]$  que a un diámetro (2.72 cm) y altura (3.56 m) promedio del presente estudio almacena 3.26 kg de biomasa seca.

En este estudio, los árboles muestreados de *A. constricta* presentaron en promedio un diámetro a la base de  $2.72 \pm 1.38$  cm (Cuadro 1), con un rango de 1 a 7.4 cm, teniendo un 10 % de individuos con diámetros a la base similares a los reportados por Nívar *et al.* (2004), quienes reportan un diámetro a la base promedio de 6.74 y 5.62 cm en *A. berlandieri* y *A. rigidula* respectivamente. Para *Acacia constricta* por vara se registró una biomasa verde media de  $1.98 \pm 2.46$  kg y una biomasa seca promedio de  $1.45 \pm 1.82$  kg (Cuadro 1); el máximo valor en biomasa verde (15.05 kg) y biomasa seca (11.47 kg) lo presenta el individuo con el mayor diámetro a la base (7.4 cm) y una altura de 4.9 m. El valor máximo de biomasa seca (11.47 kg) para *Acacia constricta* por vara es similar al valor promedio de biomasa seca (11.70 kg) reportado por Northup *et al.* (2005) para *Acacia rigidula*. El diámetro a la copa de *Acacia constricta* por vara presenta un valor promedio de  $0.99 \pm 0.28$  m, siendo similar al valor promedio (1.2 m) de diámetro copa para *Acacia farnesiana* reportado por Nívar *et al.* (2004). El individuo en forma de vara de *Acacia constricta* con mayor pérdida de peso (1.74 kg) presentó una biomasa verde de 3.73 kg, contenido de humedad de 87.76 %, biomasa seca de 1.99 kg, altura de 5.5 m y diámetro a la base de 3.2 cm, se encuentra un poco por arriba de valor promedio (2.72 cm) para diámetro a la base del presente estudio.

La biomasa de *Acacia constricta* (en forma de grupo) se obtuvo una muestra de 14 grupos usando el método destructivo, a diferencia de Foroughbakhch *et al.* (2005) y Foroughbakhch *et al.* (2009) quienes realizaron un estudio para determinar biomasa por métodos no destructivos en 15 especies del noreste de México dentro de las cuales se encuentran *A. berlandieri*, *A. farnesiana* y *A. rigidula* tomando como tamaño de muestra dos grupos de 15 ejemplares de cada especie.

Los grupos muestreados de *Acacia constricta* en forma de grupo en este estudio presentaron un diámetro promedio a la base de  $0.47 \pm 0.23$  m, la biomasa verde media

observada fue de  $20.03 \pm 17.56$  kg, mientras que la biomasa seca presentó una media de  $14.15 \pm 11.17$  kg (Cuadro 1). La máxima pérdida de peso (28.51 kg) se presentó en el individuo con biomasa verde de 54.61 kg, su contenido de humedad fue de 109.25 % correspondiente a una biomasa seca de 26.10 kg. El diámetro de copa tuvo una media de  $3.15 \pm 1.53$  m, con una máxima observada de 5.88 m, la cual es comparable con el diámetro de copa promedio (5.06 m) reportado por Northup *et al.* (2005) en *Acacia rigidula*.

La altura de *Acacia constricta* para vara y grupo registró promedios similares entre sí, 3.56 y 3.54 m con desviación estándar de 1.11 y 1.1 m respectivamente (Cuadro 1), la altura máxima observada en vara y grupo fue de 5.6 m, siendo 0.6 m por arriba de la descripción hecha por Parker (1972), quien afirma que la especie *Acacia constricta* es un arbusto de hasta 5 metros de altura.

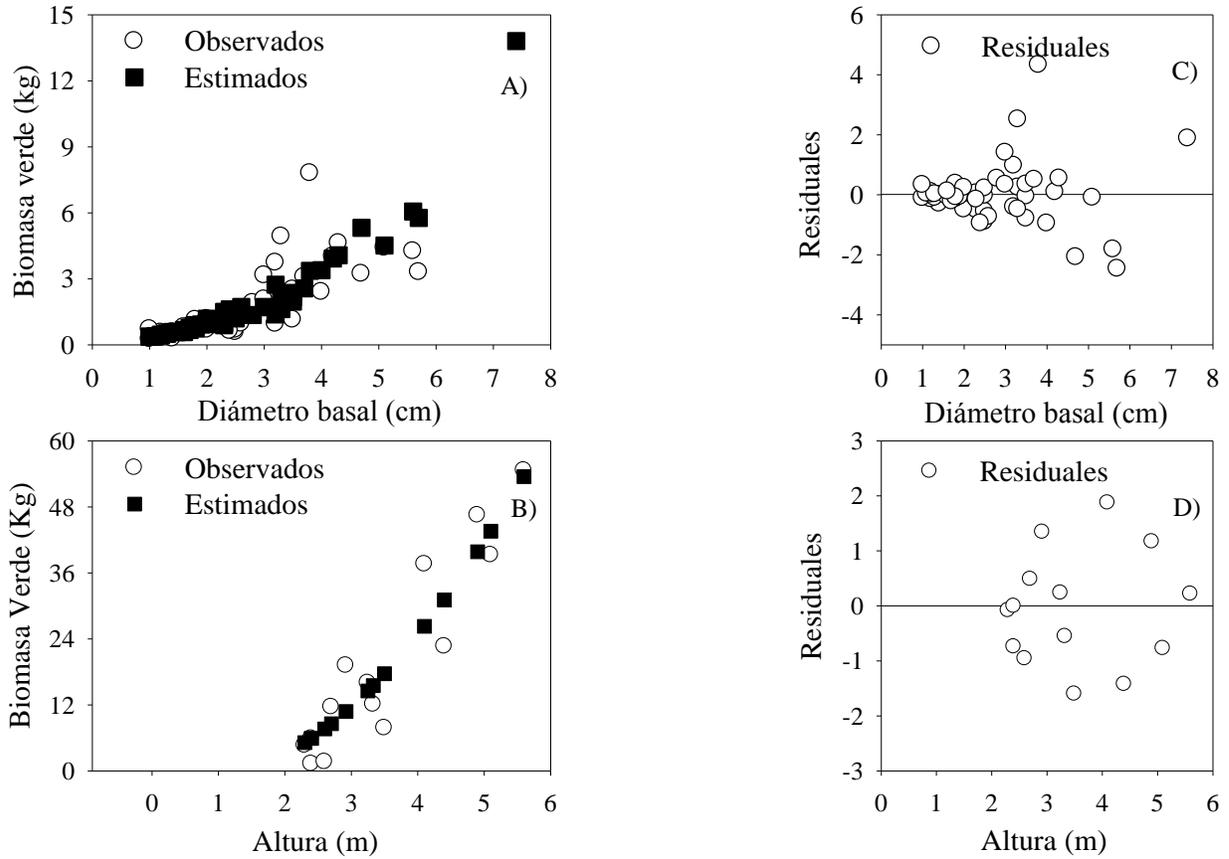
### **Relación alométrica tamaño - biomasa, carbono y carbono equivalente para**

#### ***Acacia constricta***

Para la estimación de biomasa total verde y biomasa total seca en *Acacia constricta* se tienen dos opciones, predecirlas en forma de vara o grupo, dependiendo las características en las que se pueda encontrar en campo. La ecuación para estimar biomasa verde en forma de grupo (Cuadro 2 y Figura 2B) tuvo mejores estadísticos de ajuste que biomasa verde en forma de vara en cinco de sus estadísticos (Cuadro 2), un valor alto de  $R^2$  ajustada (0.86), similar al valor de  $R^2$  (0.87) obtenido por Foroughbakhch *et al.* (2009) para predecir biomasa en *Acacia rigidula*; biomasa verde en forma de grupo tuvo 0.85 en  $R^2$  de predicción siendo el valor más alto registrado para las dos especies (*Pinus johannis* y *Acacia constricta*) en este estadístico. *Acacia constricta* en forma de grupo tuvo un valor de 1.99 en la prueba Durbin - Watson, muy cercano a 2 que sugiere estadísticamente una relación altamente significativa. El coeficiente de

variación (31.35 %) de *Acacia constricta* en forma de grupo indican una homogeneidad alta en la dispersión de los residuales (Figura 2D), siendo menor que el coeficiente de variación (52.52 %) de *Acacia constricta* en forma de vara, que presenta una homogeneidad baja en su dispersión de residuales (Figura 2C). El coeficiente de variación de *Acacia constricta* en forma de grupo (31.35 %) (Cuadro 2) de este estudio fue 0.35% mayor al coeficiente de variación (31 %) reportado por Nívar et al, (2004) para predecir biomasa seca en *Acacia berlandieri*. Con respecto a biomasa verde de *Acacia constricta* en forma de grupo, la Biomasa verde de *Acacia constricta* en forma de vara (Cuadro 2 y Figura 2A) presentó valores bajos en  $R^2$  ajustada (0.82),  $R^2$  de predicción (0.78), test Durbin - Watson (1.20) y coeficiente de variación (52.52 %), sin embargo *Acacia constricta* en forma de vara tiene mejor ajuste que la forma grupo al estimar biomasa, ya que tiene un error estándar de 1.04 kg y PRESS de 64.09, contra 6.28 kg y 595.89 respectivamente del modelo alométrico para estimar biomasa verde por grupo. El error estándar de biomasa verde en forma de vara (1.04) (Cuadro 2) es 0.36 unidades más pequeño que el reportado por Nívar *et al.* (2004) (1.40) para *Acacia rigidula*.

El valor P (0.0001) de los parámetros de regresión (Cuadro 3) fueron iguales entre sí, lo cual nos indica que las ecuaciones y sus parámetros de regresión son confiables para estimar biomasa verde en forma de vara y grupo en *Acacia constricta*.

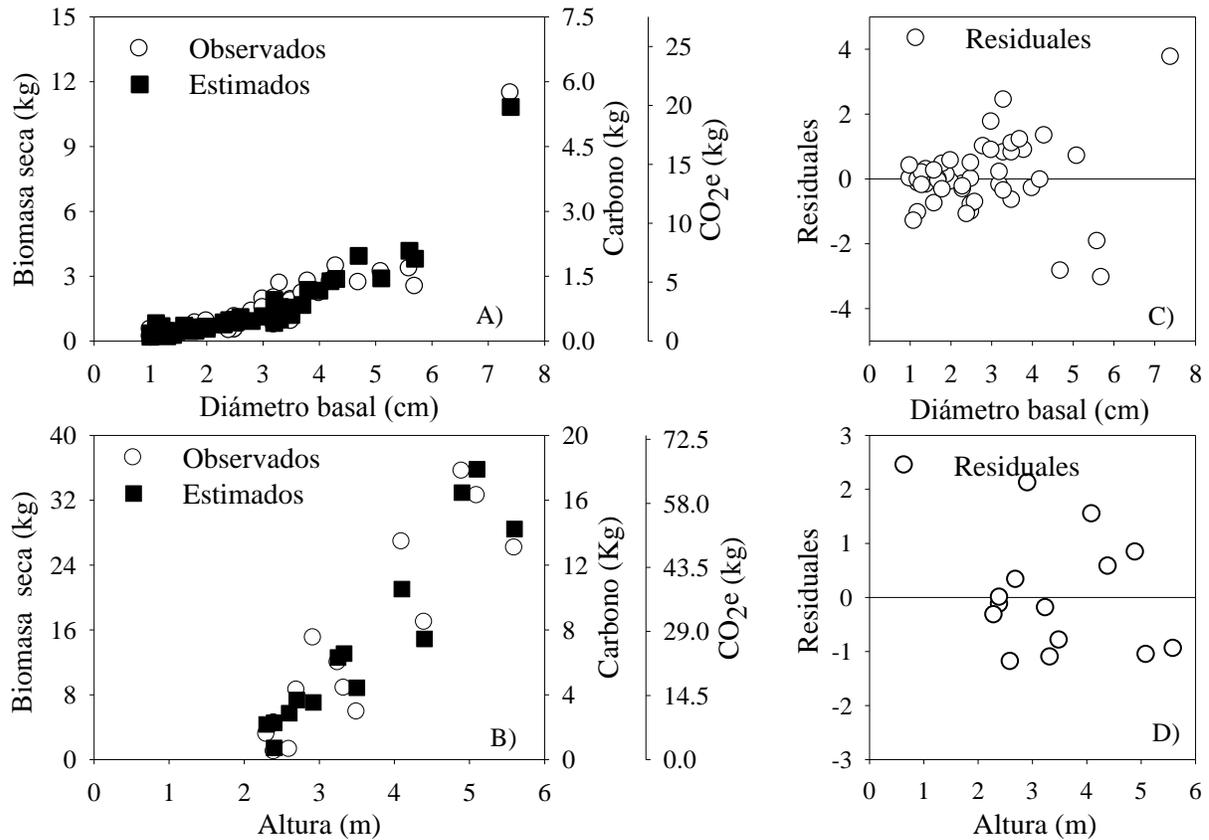


**Figura 2.** Biomasa verde y distribución de residuales de las ecuaciones seleccionadas para la forma vara (A, C) y grupo (B, D) para *Acacia constricta* en Mazapil, Zacatecas, México.

Para estimar biomasa seca en *Acacia constricta* se sugiere hacerlo en forma de vara (Figura 3A) con su ecuación lineal ( $B_s = B_0 + B_1 * Db * Dc + B_2 * Dc + B_3 * Db$ ), ya que en comparación con estimar biomasa seca por grupo (Figura 3B) reúne mejores características en cinco estadísticos de ajuste (Cuadro 2) como la  $R^2$  ajustada más alta de todos los modelos alométricos con un valor de 0.93, igual a la  $R^2$  reportada por Giraldo *et al.* (2006) usando la ecuación lineal  $\ln(y) = -2.0569 + 2.3635 \ln(D)$  para estimar biomasa seca aérea en *Acacia mangium*.

El modelo para estimar biomasa seca en *Acacia constricta* en forma de vara registró un error estándar de 0.46 kg (Cuadro 2), 3.53 unidades más pequeño que el error del componente grupo (3.99 kg) (Cuadro 2). El valor de PRESS (31.30) (Cuadro 2) de biomasa seca de *Acacia constricta* en forma de vara el más pequeño observado para estimar biomasa en ambas especies (*Pinus johannis* y *Acacia constricta*). Biomasa seca de *Acacia constricta* en forma de vara registró mejor valor (1.69) en la prueba Durbin - Watson comparado con biomasa en forma de grupo (1.56) indicando una mayor relación estadísticamente significativa al ser más cercano al valor 2. El modelo de *Acacia constricta* para estimar biomasa seca en forma de vara presenta mejor dispersión de residuales (Figura 3C) que biomasa seca en forma de grupo (Figura 3D). Para estimar biomasa seca de *Acacia constricta* en forma de vara, el valor P de los parámetros de regresión ( $B_1 = 0.0001$ ,  $B_2 = 0.0001$  y  $B_3 = 0.0001$ ) es menor con respecto a los parámetros de regresión ( $B_1 = 0.0002$  y  $B_2 = 0.0192$ ) de biomasa seca en forma de grupo, lo cual indica que sus parámetros son más confiables para estimar biomasa seca en *Acacia constricta*. El modelo para estimar biomasa seca en *Acacia constricta* en forma de grupo presenta mejores valores que la forma vara en dos estadísticos, 0.85 en  $R^2$  de predicción y el coeficiente de variación (28.20 %) más pequeño de los modelos para ambas especies (*Pinus johannis* y *Acacia constricta*), 5.98 unidades más grande que la reportada por Nívar *et al.* (2004) (22.22 %) para *Acacia rigidula*.

El mayor contenido calculado de carbono (5.74 kg) y carbono equivalente ( $CO_2e$ ) (21.05 kg) (Figura 3A) para *Acacia constricta* en forma de vara corresponde al individuo con el mayor valor en diámetro a la base (7.4 cm) y diámetro de copa (2 m). Por el contrario el menor contenido calculado de carbono (0.10 kg) y carbono equivalente ( $CO_2e$ ) (0.36 kg) (Figura 3A) para *Acacia constricta* en forma de vara se observa a un diámetro a la base de 1.4 cm y una altura de 3.1 m.



**Figura 3.** Biomasa seca y distribución de residuales de las ecuaciones seleccionadas para la forma vara (A, C) y grupo (B, D) para *Acacia constricta* en Mazapil, Zacatecas, México.

El mayor contenido de carbono calculado (17.79 kg) y carbono equivalente ( $\text{CO}_2\text{e}$ ) (65.28 kg) (Figura 3B) para *Acacia constricta* en forma de grupo corresponde al individuo con diámetro a la base de 0.9 m y altura de 4.9 m. El menor contenido de carbono calculado (0.47 kg) y carbono equivalente ( $\text{CO}_2\text{e}$ ) (1.73 kg) (Figura 3B) para *Acacia constricta* en forma de grupo se observa en el individuo con las menores dimensiones en las variables diámetro a la base (0.16 m) y diámetro de copa (1 m).

**Cuadro 3.** Parámetros de regresión de las ecuaciones para estimar biomasa total verde y seca en *Pinus johannis* y *Acacia constricta* en Mazapil, Zacatecas, México.

Especie	Forma	Y	Parámetro	Valor	Valor P	S <sub>xy</sub>	T		
<i>Pinus johannis</i>			$B_0$	-4.833	0.5280	7.585	-0.637		
			Bv	$B_1$	82.770	0.0039	26.880	3.079	
				$B_2$	-196.800	0.0127	75.090	-2.621	
				$B_0$	-5.389	0.4390	6.894	-0.782	
				Bs	$B_1$	68.690	0.0078	24.430	2.812
					$B_2$	-163.770	0.0215	68.220	-2.401
<i>Acacia constricta</i>	Vara		Bv	$B_0$	0.371	0.0474	0.182	2.035	
				$B_1$	0.453	0.0001	0.030	15.01	
			Bs	$B_0$	2.360	0.0001	0.490	4.818	
				$B_1$	1.331	0.0001	0.115	11.53	
	Grupo	Bs	$B_2$	-2.926	0.0001	0.506	-5.778		
			$B_3$	-0.726	0.0001	0.149	-4.881		
		Bv	$B_1$	3.219	0.0001	0.212	15.20		
			$B_0$	-3.242	0.1480	2.084	-1.556		
			Bs	$B_1$	2.313	0.0002	0.417	5.539	
				$B_2$	-0.881	0.0192	0.321	-2.742	

Donde: Y = variable dependiente; Bv = biomasa total verde (kg); Bs = biomasa total seca (kg); Valor P = significancia de los parámetros de regresión; S<sub>xy</sub> = error estándar (kg); T = distribución t de student del parámetro.

## CONCLUSIONES

Las ecuaciones generadas para estimar biomasa total verde, total seca, carbono y carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) en *Pinus johannis* y *Acacia constricta* son confiables y pueden usarse en condiciones similares a las del presente estudio y para las mismas especies.

Las ecuaciones generadas para estimar biomasa total verde y seca en *Pinus johannis* tuvieron valores estadísticos de ajuste aceptables en R<sup>2</sup> ajustada (0.77 y 0.71). Las variables con mayor importancia fueron diámetro de copa y altura, puesto que las características morfológicas de la especie dificultan tomar la variable diámetro a la base, sin embargo si posteriormente se quiere obtener mejores estadísticos de ajuste recomienda utilizar la variable diámetro a la base.

Existe una diferencia de 0.04 en el estadístico de ajuste R<sup>2</sup> ajustada en cuando a estimar biomasa verde y biomasa seca en *Acacia constricta* en forma vara y grupo, por lo que se acepta la hipótesis planteada y se pueden utilizar ambas ecuaciones dependiendo de la forma en que se le encuentre en campo (vara o grupo).

El modelo alométrico tradicional no se ajustó adecuadamente para la especie *Pinus johannis* debido a la baja correlación que las variables altura ( $r = 0.69$ ;  $p < 0.001$  y  $r = 0.68$ ;  $p < 0.001$ ) y diámetro de copa ( $r = 0.80$ ;  $p < 0.001$  y  $r = 0.77$ ;  $p < 0.001$ ) tienen en comparación con la correlación del diámetro a la base ( $r = 0.86$ ;  $p < 0.001$  y  $r = 0.84$ ;  $p < 0.001$ ) que fue suprimido para estimar biomasa verde y biomasa seca respectivamente.

## LITERATURA CITADA

- Andrew M. H., I. R. Noble, R. T. Lange. 1979. A non-destructive method for estimating the weight of forage shrubs. *Australian rangeland journal* 1(3): 225 - 231.
- Araújo T. M., N. Higuchi, J. A de Carvalho J. 1999. Comparison of formula for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Par. Brazil. *Forest Ecology and Management* 117: 43 - 52.
- Brown S. 2002. Measuring carbon in forest: current status and future challenges. *Environmental pollution* 116: 363 - 372.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2009. El inventario nacional forestal y de suelos de México 2004 - 2009. Una herramienta que da certeza a la planeación, evaluación y desarrollo forestal de México. Zapopán, Jalisco, México. 22 p.
- Díaz F. R., M. Acosta M., F Carrillo A., E. Buendía R., E. Flores A., J. D Etchevers B. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13(1): 25 - 34.
- Dixon R. K., A. M. Solomon, S. Brown, R. A. Houghton, M. C. Trexler, and J. Wisniewski. 1994. Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science* 263: 185 - 190.
- Fernández W. 1991. Cambios climáticos: el calentamiento global. *Tecnología en Marcha*. 11(2): 11 - 22.
- Figueroa N. C., Etchevers B. J. D., Velásquez M. A., Acosta M. M. 2005. Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca. *Terra latinoamericana* 23(1): 57 - 64.

- Foroughbakhch R., G. Reyes., M. A. Alvarado V., J. Hernández P., A. Rocha E. 2005. Use of quantitative methods to determine leaf biomass on 15 woody shrub species in northeastern of México. *Forest ecology and management* 216: 259 - 366.
- Foroughbakhch R., J. L. Hernández P., M. A. Alvarado V., E. Céspedes C., A. Rocha E., M. L. Cárdenas A. 2009. Leaf biomass determination on woody shrub species in semiarid zones. *Agroforest systems* 77: 181 - 192.
- Gasparri I., E. Manghi. 2004. Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales argentinas, Informe Final. Unidad de manejo del sistema de evaluación forestal.
- Gayoso A. J., Schlegel B. 2001. Proyectos forestales para mitigación de gases de efecto invernadero. *Ambiente y desarrollo* 17(1): 41 - 49.
- Gayoso A. J. y Guerra J. C. 2005. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque* 26(2): 33 - 38.
- Giraldo L. A., M. Zapata y E. Montoya. 2006. Estimación de la captura y flujo de carbono en silvopastoreo de *Acacia mangium* asociada con *Brachiara dictioneura* en Colombia. *Pastos y Forrajes*. 29(4): 421 - 435.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Pachauri, R. K., y A. Reisinge (eds). Ginebra, Suiza. 104 p.
- Medina G. G., J. A. Ruiz C. 2004. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Zacatecas (Período 1961 - 2003). Centro de investigación regional norte centro, Campo experimental Zacatecas. Libro técnico No. 3. 118.

- Méndez G. J., S. L. Luckie N., M. A. Capó A., J. A. Nájera L. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *Pinus pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia*. 45(4): p483.
- Méndez G. J., O. A. Turlan M., J. C. Ríos S. y J. A. Nájera L. 2012. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa en *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. Ex Willd.) M.C. Johnston. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 3(13): 58 - 72.
- Návar J., J. Nájera, E. Jurado. 2001. Biomass estimation equations in the Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Journal of Arid Environments*. 52(2): 167 - 179.
- Návar J., E. Méndez, A. Nájera, J. Graciano, V. Dale, B. Parresol. 2004. Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of North-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments*. 59: 657 - 674.
- Návar C. J. J. 2009. Ecuaciones alométricas y factores de expansión para árboles del trópico seco de Sinaloa, México. *Tropical and subtropical Agroecosystems*. 10(1): 45 -52.
- NORMA Oficial Mexicana NOM - 059 - SEMARNAT - 2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestre-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo.
- Northup B. K., S. F. Zitzer, S. Archer, C. R. McMurtry, T.C. Boutton. 2005. Above-ground biomass and carbon and nitrogen content of woody species in a subtropical thornscrub parkland. *Journal of Arid environments* 62: 23 - 43.
- Parker K. F. 1972. *An illustrated guide to Arizona weeds*. The university of Arizona Press. Tucson, U.S.A. p158, p159, p185.
- Perry J. P. 1991. *The pines of Mexico and Central America*. Portland, OR: Timber Press. 321p.

- Raymond. M. T., J. E. Bowers, T. L. Burgess. 1995. Sonoran Desert Plants: an Ecological Atlas. Tucson: The University of Arizona Press, USA. 501. 15 - 16.
- Robert M. F. 1978. Un nouveau pin pignon mexicain: *Pinus johannis* M. Robert. Adasonia, ser. 2, 18(3): 365. Paris.
- Rzedowski J. 2006. Vegetación de México. 1ra Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, 504p.
- Schlegel B. 2001. Estimación de biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempre verde. Universidad Austral de Chile. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile. 13p.