

# ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA AÉREA MEDIANTE EL USO DE RELACIONES ALOMÉTRICAS EN SEIS ESPECIES ARBÓREAS EN OAXACA, MÉXICO

## ABOVEGROUND BIOMASS ESTIMATION BY MEANS OF ALLOMETRIC RELATIONSHIPS IN SIX HARDWOOD SPECIES IN OAXACA, MÉXICO

Miguel Acosta-Mireles<sup>1</sup>, Jesús Vargas-Hernández<sup>2</sup>, Alejandro Velázquez-Martínez<sup>2</sup> y Jorge D. Etchevers-Barra<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Investigador Titular del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Valle de México. (acostamm@colpos.m). <sup>2</sup>Especialidad Forestal y <sup>3</sup>Especialidad de Edafología. Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (vargashj@colpos.mx), (alejvela@colpos.mx), (jetchev@colpos.mx)

### RESUMEN

Se generaron ecuaciones alométricas para seis especies forestales del bosque mesófilo de montaña y bosque de encino (*Quercus spp*) en Oaxaca, México. Todas las ecuaciones fueron de la forma  $Y=bX^k$ , donde  $Y$  es la biomasa aérea (kg),  $X$  es el diámetro (cm) a la altura del pecho (DAP) y  $b$  y  $k$  son los parámetros a estimar. En todos los casos el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue mayor que 0.97. Se compararon también los parámetros de las ecuaciones alométricas generadas y se encontró que éstos fueron diferentes para cada especie. Sin embargo, las seis especies se separaron en dos subgrupos, de tres especies cada uno, y así se ajustó una ecuación alométrica adecuada y suficiente para cada subgrupo. Los coeficientes de determinación para los modelos ajustados en los subgrupos fueron 0.99 y 0.98

**Palabras clave:** Alometría, biomasa aérea, ecuaciones alométricas.

### INTRODUCCIÓN

El aumento en la concentración de  $CO_2$  en la atmósfera es una preocupación mundial. En los últimos 200 años el incremento fue de 280 a 350 ppm de  $CO_2$  en la atmósfera y el aumento sigue con una tasa promedio un poco superior a 1 ppm al año (Deans *et al.*, 1996). Las plantas utilizan  $CO_2$  y liberan  $O_2$  durante el proceso de la fotosíntesis; a diferencia de las especies anuales, los árboles almacenan los fotoasimilados en componentes de carbono en sus estructuras leñosas por periodos prolongados, por lo que se les debe considerar como reservas naturales de carbono. La capacidad de los ecosistemas forestales para almacenar carbono en forma de biomasa aérea varía en función de la composición florística, la edad y la densidad de población de cada estrato por comunidad vegetal (Schulze *et al.*, 2000). La determinación de esta capacidad constituye un reto cuando se trata de evaluar el potencial de sistemas forestales, naturales, alterados o inducidos por el hombre.

Recibido: Abril, 2002. Aprobado: Octubre, 2002.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 36: 725-736. 2002.

### ABSTRACT

Allometric equations were generated for six forest species of a mixed hardwood and oak forests. All equations were of the form  $Y=bX^k$ , where  $Y$  is the aboveground biomass (kg),  $X$  is the diameter (cm) at breast height (DBH) and  $k$  are the parameters to be estimated. In all cases the coefficient of determination ( $R^2$ ) was above 0.97. The parameters of the equations generated were compared and it was found that they differed for each species. However, the six species were separated into two subgroups, with three species each; thus, an adequate and useful allometric equation was adjusted for each subgroup. Determination coefficients for the models fitted in the subgroups were 0.99 and 0.98.

**Key words:** Allometry, aboveground biomass, allometric equations.

### INTRODUCTION

The increase in  $CO_2$  concentration in the atmosphere is a world concern. Over the last 200 years an increase from 280 to 350 ppm of  $CO_2$  has taken place in the atmosphere and it has continued climbing at an average rate of a little more than 1 ppm per year (Deans *et al.*, 1996). Plants use  $CO_2$  and release  $O_2$  during the photosynthesis process. However, unlike annual species, trees store photosynthesis products in carbon components in their wood structures for long periods of time, so they are considered natural carbon sinks. The capacity of forest ecosystems to store carbon in the form of aerial biomass varies in terms of species composition, age and population density at each layer in the plant community, as the terrestrial carbon cycle is a very dynamic system. (Schulze *et al.*, 2000). Determining this capacity constitutes a challenge when the issue is to evaluate the potential of the different forest ecosystems, either natural, altered, or induced by man.

The measurement of the amount of aboveground biomass in any component of an ecosystem requires either a direct destructive analysis (Brown *et al.*, 1989) or indirect estimations of the plant material to make the

La medición de la cantidad de biomasa aérea en cualquier componente de un ecosistema requiere un análisis destructivo directo (Brown *et al.*, 1989) o estimaciones indirectas del material vegetal para hacer las inferencias respectivas; el segundo caso es más práctico cuando se desea estimar la biomasa aérea de los árboles. Para ello, se debe contar con funciones que estimen la biomasa total con base en el tamaño y dimensiones de los árboles; es decir, funciones matemáticas basadas en las relaciones alométricas que ocurren entre los órganos de un individuo (Huxley, 1932).

Las relaciones alométricas se han utilizado en especies forestales de clima templado-frío para estimar la biomasa aérea total y el área foliar, a partir del diámetro a la altura del pecho (DAP; 1.30 m) o del área de la albura (Grier y Waring, 1974; Geron y Ruark, 1988; Chapman y Gower, 1991; Castellanos *et al.*, 1996). Sin embargo, su uso en las especies arbóreas del bosque mesófilo de montaña ha sido escaso.

Las relaciones entre las dimensiones del fuste y la cantidad de biomasa se han empleado también para estimar la biomasa de los componentes de un árbol (Bartelink, 1996), el carbono presente en diferentes tipos de vegetación (Brown *et al.*, 1989; De Jong *et al.*, 1995 y Deans *et al.*, 1996) y la distribución de biomasa en los árboles (Landsberg y Gower, 1997). Además, constituyen una herramienta importante para construir modelos mecanicistas de crecimiento forestal (Causton, 1985) que han resultado útiles para predecir la captura de carbono por los árboles.

El presente trabajo forma parte del Proyecto Manejo Sustentable de Laderas (PMSL), entre cuyos objetivos se considera la medición de los almacenes de carbono en diferentes sistemas de uso y manejo de la tierra en la Sierra Norte de Oaxaca, México. En los ecosistemas vegetales de esta región se pretende aplicar el mecanismo de desarrollo limpio especificado en el artículo 12 del Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 2002). De acuerdo con este Protocolo, los países en vías de desarrollo podrán beneficiarse con las actividades que resulten en reducciones certificadas de gases tipo invernadero; por ejemplo, mediante el cambio de uso del suelo y un manejo adecuado de sus compartimientos para convertir los terrenos en almacenes importantes de carbono.

Dado que el componente aéreo del estrato arbóreo constituye uno de los principales almacenes de biomasa, y por lo tanto de carbono, en los sistemas tradicionales de manejo en la región, en el presente estudio se propuso conocer la biomasa aérea de las especies leñosas más comunes en tres regiones donde se desarrolla el PMSL y buscar modelos que estimen dicha biomasa en nuevos individuos de estas especies. Generalmente los modelos alométricos se generan por especie; sin embargo, es probable que varias especies que crecen en un mismo tipo

respectivo inferencias; the second option is more practical when the aerial biomass of trees is estimated. To this end, it is necessary to employ functions which estimate the total biomass, based on the size and dimensions of trees; that is, mathematical functions based on the allometric relationships occurring between the organs of an individual (Huxley, 1932).

Allometric relationships have been widely used in temperate forest species to estimate total aboveground biomass and foliage area using diameter at breast height (DBH, at 1.30 m) or the sapwood area (Grier and Waring, 1974; Geron and Ruark, 1988; Chapman and Gower, 1991; Castellanos *et al.*, 1996). Yet, they have not been much used in tree species of the hardwood mixed forest. Relationships between the dimensions of the trunk and the amount of biomass have been also employed to estimate biomass of tree components (Bartelink, 1996), carbon present in different types of vegetation (Brown *et al.*, 1989; De Jong *et al.*, 1995 and Deans *et al.*, 1996) and distribution of tree biomass (Landsberg and Gower, 1977). Also, they constitute a major tool to build mechanistic models of forest growth (Causton, 1985) which have turned out to be useful to predict carbon sequestration by trees.

The present study is part of the Sustainable Hillside Management Project (PMSL), whose goals include the measurement of carbon pools in different land use and management systems in the northern Sierra of Oaxaca, México. In the plant ecosystems of the region, the purpose is to apply the "clean development" mechanism specified in article 12 of Kyoto Protocol (UNFCCC, 2002). According to this Protocol, developing countries will be able to benefit from the activities resulting in certified reductions of greenhouse-type gases; for example, through changes in land use and by using appropriate management of their compartments in order to turn the lands into carbon sinks.

Considering that the aerial component of the tree layer is one of the main biomass pools and, therefore of carbon, in the traditional management systems of the region, the aim of the present research was to study the aboveground biomass of the most common woody species in three regions in which the PMSL is being implemented, and to seek models able to estimate such biomass in new individuals of these species. In general, allometric models are generated by species, though it is likely that several species growing in the same type of vegetation show similarity in their morphological growth pattern and therefore, in the volume of aerial biomass. If this would happen, the same allometric model might be used to estimate the biomass of several species.

The specific goals of this study were: (a) to generate an allometric model to estimate total aboveground biomass by using DBH as independent variable in six

de vegetación presenten similitud del patrón morfológico de crecimiento y, por lo tanto, en la asignación de biomasa aérea. Si esto ocurriera, podría utilizarse un mismo modelo alométrico para estimar la biomasa en varias especies.

Los objetivos del presente estudio fueron: a) generar un modelo alométrico para estimar la biomasa aérea total a partir de la variable DAP en seis especies arbóreas dominantes en los bosques mesófilos de montaña de la Sierra Norte de Oaxaca; y, b) comparar entre sí los modelos generados para cada especie, y explorar la factibilidad de que una sola ecuación se utilice para varias especies.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en tres microcuencas representativas de las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte de Oaxaca, entre las coordenadas 16° 45' y 18° 30' N y 94° 45' y 97° 00' O. En las tres regiones se practica el sistema de cultivo agrícola de laderas, combinado con prácticas de roza-tumba-quema, por lo que parte de la vegetación está conformada por "acahuales" en diferentes estados de desarrollo, con gran diversidad de especies arbóreas. Acahual se refiere a la vegetación secundaria que crece después de cortar el bosque primario, o a la vegetación que crece después de un periodo de descanso de la tierra que se utiliza periódicamente para la producción de cultivos anuales.

Debido a la abundancia relativa de *Clethra hartwegii* Britt. (*Clethra*), *Rapanea myricoides* (Schl.) Lundell. (*Rapanea*), *Alnus glabrata* Fernald. (*Alnus*), *Liquidambar macrophylla* Oerst. (*Liquidambar*), *Inga sp.* (*Inga*) y *Quercus peduncularis* Née. (*Quercus*) en los acahuales y sistemas de vegetación estudiados, se seleccionaron estas especies para desarrollar las ecuaciones alométricas. Las primeras cinco especies son típicas del bosque mesófilo de montaña de las regiones Mazateca y Mixe, mientras que *Quercus* forma parte de los bosques de encino que crecen en la cuenca de la región Cuicateca.

### Generación de las ecuaciones alométricas

En función de la disponibilidad de árboles de cada especie se hizo un muestreo destructivo de diferente número de plantas seleccionadas (Ávila *et al.*, 2001; Locatelli y Leonard, 2001). Se midieron y cortaron de 5 a 12 individuos por especie. Con el propósito de aumentar el intervalo de variación de los árboles medidos y darle validez a las ecuaciones de regresión, en la muestra se incluyeron árboles con dimensiones extremas en cuanto a su tamaño.

En cada árbol seleccionado se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) antes de ser derribado. Los árboles pequeños (2.5 cm < DAP < 10 cm) se cortaron al nivel del suelo y se transportaron completos al laboratorio para obtener su biomasa. Los árboles más grandes (DAP > 10 cm), fueron cortados en secciones para obtener submuestras, tanto del fuste principal como de las ramas. La metodología que se usó fue similar a la descrita por Espinosa-Bancalari y Perry (1987) para estimar la biomasa por árbol de *Pseudotsuga menziesii*.

tree species prevailing in the hardwood mixed forests of the northern Sierra of Oaxaca and, (b) to compare the models generated for each species and to explore the feasibility that one single equation might be used for several species.

## MATERIALS AND METHODS

The study was carried out in three micro basins representative of the Mazateca, Cuicateca and Mixe regions of the northern Sierra of Oaxaca, at latitude 16° 45' and 18° 30' North and 94° 45' and 97° 00' West. In the three regions, the hillside agricultural system is applied, combined with slash and burn practices, so a good part of the vegetation is made up of *acahuales* at different stages of development with a great variety of tree species. *Acahual* is a regional term that refers to secondary vegetation that grows after cutting the primary forest, or to the vegetation that grows after fallow when using the land periodically for the production of annual crops.

Because of the relative abundance of *Clethra hartwegii* Britt. (*Clethra*), *Rapanea myricoides* (Schl.) Lundell. (*Rapanea*), *Alnus glabrata* Fernald. (*Alnus*), *Liquidambar macrophylla* Oerst. (*Liquidambar*), *Inga sp.* (*Inga*) and *Quercus peduncularis* Née. (*Quercus*) in the acahuales and vegetation systems under study, these species were selected to develop allometric equations. The first five species are typical of the hardwood mixed forest in the Mazateca and Mixe regions, while *Quercus* is part of the oak forests growing in the basin of the Cuicateca region.

### Generation of allometric equations

Due to the availability of trees from each specie, a destructive sampling of selected plants was made (Ávila *et al.*, 2001; Locatelli and Leonard, 2001). Five to 12 individuals per species were measured and brought down. In order to expand the variation interval of the trees measured and give validity to the regression equations, trees of extreme dimensions were included in the sample.

The diameter at breast height (DBH) was measured in each selected individual before being brought down. Small trees (2.5 cm < DBH < 10 cm) were cut and carried whole to the laboratory to obtain their biomass. Larger trees (DBH > 10 cm) were cut into sections to obtain subsamples, both of the trunk and branches. The methodology used was similar to that described by Espinosa-Bancalari and Perry (1987) to estimate tree biomass in *Pseudotsuga menziesii*.

In the case of *Inga* only five trees were sampled, as this species is used for shade in coffee plantations and producers would not allow us to cut more of them. However, to increase the number of observations for this particular species, the canopy architecture of *Inga* was used, which has *n* branches at a certain height of the trunk, which then branch out again, keeping a structure similar to *n* branches at each ramification point. The *n* branches stemming from the first ramification were considered independent "trees", based on the modular principle described by Causton (1985), and the diameters of those branches were measured at 1.3 m distance from its union with the trunk, so as to make them equivalent to the DBH measured in the other trees. The

En el caso de *Inga* sólo se muestrearon cinco árboles, ya que esta especie se usa como sombra en los cafetales, y los productores no permitieron cortar un número mayor. Sin embargo, para aumentar el número de observaciones para esta especie en particular, se aprovechó la arquitectura de la copa de *Inga*, que ramifica en  $n$  ramas a determinada altura del tronco, las que posteriormente se vuelven a ramificar, manteniendo una estructura similar de  $n$  ramas en cada punto de ramificación. Las  $n$  ramas que se originan de la primera ramificación se consideraron como "árboles" independientes, con base en el principio modular descrito por Causton (1985), y los diámetros de esas ramas se midieron a 1.3 m de distancia desde su unión con el tronco, para que fueran equivalentes al DAP medido en los otros árboles. La biomasa de cada rama se sumó para obtener la biomasa aérea total del árbol original, el cual se consideró como otro individuo. De esta manera se obtuvo un tamaño de muestra de 12 pares de datos DAP-biomasa: uno de los árboles proporcionó cuatro pares de datos; dos árboles proporcionaron tres pares de datos cada uno; y los otros dos árboles sólo proporcionaron un par de datos cada uno.

Con el fin de determinar la relación peso seco: peso fresco del tronco y de la copa a diferentes alturas y calcular la biomasa total de cada árbol, se obtuvieron siete rodajas de aproximadamente 5 cm de espesor en siete posiciones del tallo principal en los individuos con diámetro >10 cm. Las primeras tres rodajas (P1 a P3) se obtuvieron de la sección correspondiente al fuste limpio; P1 a 0.30 m, P2 a 1.3 m y P3 en la parte media del DAP y la base de la copa (Figura 1). Las otras cuatro rodajas se obtuvieron de cuatro secciones en las que se dividió la copa desde la base de ésta hasta el ápice. Estas rodajas se obtuvieron de la base de cada una de esas secciones (P4 a P7, Figura 1).

Además, se obtuvo una rama como muestra de cada sección de la copa. De cada individuo se obtuvo el peso fresco por separado de las rodajas, y de cada sección del tronco y de la copa, incluyendo el follaje, así como de las ramas muestreadas en cada sección de la copa. En el caso de *Inga*, las rodajas y las ramas muestra se obtuvieron de cada ramificación considerada como individuo. Todas las muestras se transportaron al laboratorio, donde se secaron a peso constante (75 °C durante 48 h) para obtener el peso seco.

La relación peso seco: peso fresco de cada rodaja se utilizó para obtener el peso seco de cada sección del tronco del árbol a partir de su respectivo peso fresco. El mismo procedimiento se utilizó para obtener el peso seco de las ramas (incluyendo el follaje) de cada sección de la copa a partir de la relación peso seco: peso fresco de las ramas muestra. La suma del peso seco de las secciones del tronco y copa constituyó la biomasa total de cada árbol.

Después de obtener la biomasa y el DAP de cada individuo, se seleccionó el siguiente modelo de relaciones alométricas (Ter-Mikaelian y Korzukhin, 1997), por ser uno de los más frecuentemente usados:

$$Y = bX^k \quad (1)$$

donde  $Y$  es la biomasa aérea (kg),  $X$  es el diámetro (cm) a la altura del pecho (DAP) y  $b$  y  $k$  son los parámetros que se estimaron por mínimos cuadrados.

biomass of each branch was added to obtain the total aerial biomass of the original tree, which was considered as another individual. Thus, the sample obtained was of 12 pairs of DBH-biomass data: one tree provided four pairs of data; two provided three pairs each; and the other two only one pair of data each.

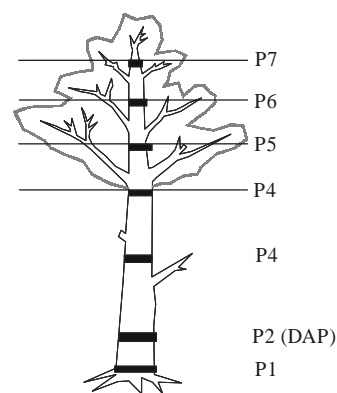
In order to determine the ratio of dry weight: fresh weight of the trunk and canopy at different heights and calculate the total tree biomass, seven slices of about 5 cm thick were obtained from seven different parts of the main trunk in the individuals >10 cm diameter. The first three slices (P1 to P3) were obtained from the trunk below the canopy, P1 at 0.30 m, P2 at 1.3 m from the ground and P3 at half the distance between DBH and the lower part of the canopy (Figure 1). The other four samples were obtained from four sections in which the canopy was divided from its base up to the top. These slices were collected at the base of each one of these sections (P4 to P7, Figure 1).

In addition, one sample branch was obtained from each section of the canopy. Fresh weight of samples was separately measured for each individual, as well as that for each trunk and canopy section, including foliage and branches sampled from each section of the canopy. In the case of *Inga*, sample slices and branches were obtained from each ramification considered as an individual. Next all the samples were carried to the laboratory, where they were dried at a constant weight (75 °C for 48 hours) to obtain dry weight.

The ratio dry weight: fresh weight of each slice was used to obtain the dry weight of each section of the trunk based on its respective fresh weight. The same procedure was used to obtain dry weight of branches (including foliage) of each section of the canopy using the dry weight: fresh weight ratio of the branches in the sample. The sum of the dry weight of the trunk and canopy sections constituted the total biomass for each tree.

After obtaining biomass and DBH for each individual, the following model of allometric relationships was selected (Ter-Mikaelian and Korzukhin, 1997), because it is one of the most frequently used.

$$Y = bX^k \quad (1)$$



**Figura 1. Sitios de muestreo en el tronco de un árbol para determinar la biomasa del fuste y de la copa.**

**Figure 1. Sampling sites in a tree to determine biomass of the trunk and canopy.**

Al expresar el modelo (1) en su forma lineal mediante transformación logarítmica de las variables y ajustarlo empleando los datos de  $Y$  y  $X$  como variables dependiente e independiente, se obtiene el modelo siguiente:

$$\ln(Y)=\ln(b)+k \ln(X) \quad (2)$$

donde  $Y$ ,  $X$ ,  $b$  y  $k$  tienen el mismo significado que en la ecuación (1), y  $\ln(Y)$ ,  $\ln(b)$  y  $\ln(X)$  son los logaritmos naturales de  $Y$ ,  $b$  y  $X$ .

En una primera etapa se ajustó el modelo (2) por mínimos cuadrados para cada especie, con el propósito de obtener los valores estimados de los parámetros  $b$  y  $k$  que representan la ordenada al origen y la pendiente del modelo de regresión, para cada una de las especies. Posteriormente se compararon los parámetros  $b$  y  $k$  ( $p \leq 0.05$ ) de cada especie para saber si estadísticamente pertenecían a un mismo modelo. La hipótesis nula fue que los parámetros  $b$  y  $k$  eran los mismos, independientemente de la especie y, por lo tanto, que un solo modelo podría ser suficiente para estimar la biomasa de las seis especies. De manera complementaria, también se exploró la posibilidad de agrupar a las especies que se ajustaran a un mismo modelo.

#### Comparación de modelos

Al comparar los parámetros  $b$  y  $k$  de los modelos de regresión lineal simple de las seis especies de árboles, pueden presentarse cuatro posibilidades: a) que tanto la ordenada al origen ( $b$ ) como la pendiente ( $k$ ) difieran entre los modelos de cada especie; b) que las líneas sean paralelas pero sin tener la misma ordenada al origen; c) que las líneas sean concurrentes; es decir, tengan la misma ordenada al origen pero con diferentes pendientes; d) que las líneas sean coincidentes, es decir, que tanto la ordenada al origen como la pendiente sean los mismos para todas las especies.

Para establecer la posibilidad de obtener líneas coincidentes, se hizo el siguiente análisis estadístico (Weisberg, 1980; Montgomery y Peck, 1982): si se considera el caso de una regresión lineal simple donde  $n$  observaciones pueden formar parte de  $M$  grupos, con el  $m$ -ésimo grupo con  $n_m$  observaciones, entonces el modelo general completo (MC, caso "a" descrito anteriormente), consiste de  $M$  ecuaciones

$$Y = \beta_{0m} + \beta_{1m}X + \varepsilon_m, \quad m=1,2,\dots,M \quad (3)$$

Mientras que el modelo reducido (MR, caso "d") puede representarse con la ecuación (2), considerando los datos de todas las especies en forma simultánea.

Para probar la hipótesis  $H_0: \beta_{01}=\beta_{02}=\dots=\beta_{0M}; \beta_{11}=\beta_{12}=\dots=\beta_{1M}$ , se usó el estadístico  $F$ :

$$F_0 = \frac{[SS_E(MR) - SS_E(MC)] / (g_{MR} - g_{MC})}{SS_E(MC) / g_{MC}} \quad (4)$$

where  $Y$  is the aboveground biomass (kg),  $X$  is the diameter (cm) at breast height (DBH) and  $b$  and  $k$  are the parameters estimated by least squares.

By expressing model (1) in its lineal form through the logarithmic transformation of the variables involved and adjusting it using the data of  $Y$  and  $X$  as dependent and independent variables, the following model is obtained:

$$\ln(Y)=\ln(b)+k \ln(X) \quad (2)$$

where  $Y$ ,  $X$ ,  $b$  and  $k$  have the same meaning as in equation 1, and  $\ln(Y)$ ,  $\ln(b)$  and  $\ln(X)$  are the natural logarithms of  $Y$ ,  $b$  and  $X$ .

In a first stage, model 2 was fitted by least squares for each species separately, with the purpose of obtaining the estimated values of parameters  $b$  and  $k$  which represent the intercept and the slope of the regression model, for each species. Then, parameters  $b$  and  $k$  ( $p \leq 0.05$ ) for each species were compared to determine if, statistically, they belonged to the same model. The null hypothesis was that parameters  $b$  and  $k$  were the same, regardless of the species and therefore one equation could be enough to estimate the biomass of the six species. The possibility of grouping the species to adjust them to more than one single model was also explored.

#### Comparison of models

When comparing parameters  $b$  and  $k$  of the simple linear regression models for the six tree species, four possible situations may occur: a) that the intercept ( $b$ ) and the slope ( $k$ ) differ among the models of each species; b) that lines be parallel but with different intercepts; c) that lines be concurrent, that is, having the same intercept but with different slopes; and d) that lines be coincidental, that is, that the intercept and the slope be the same for all species.

To establish the possibility of obtaining coincidental lines, the following statistical analysis was made (Weisberg, 1980; Montgomery and Peck, 1982): considering the case of a simple linear regression in which  $n$  observations may be part of  $M$  groups, with the  $m$ -th group with  $n_m$  observations, then the complete general model (MC, case "a" formerly described), consists of  $M$  equations

$$Y = \beta_{0m} + \beta_{1m}X + \varepsilon_m, \quad m=1,2,\dots,M \quad (3)$$

Whereas the reduced model (MR, case "d") may be represented with equation (2), considering simultaneously the data of all species.

To test the hypothesis  $H_0: \beta_{01}=\beta_{02}=\dots=\beta_{0M}; \beta_{11}=\beta_{12}=\dots=\beta_{1M}$ , the  $F$  statistic was used:

$$F_0 = \frac{[SS_E(MR) - SS_E(MC)] / (g_{MR} - g_{MC})}{SS_E(MC) / g_{MC}} \quad (4)$$

donde  $F_0$ =valor calculado del estadístico  $F$ ;  $MR$ =modelo reducido;  $MC$ =modelo completo;  $SS_E$ =suma de cuadrados de los residuales;  $gl$ =grados de libertad.

Para obtener los parámetros del modelo completo (3) se ajustaron las  $M$  ecuaciones de regresión para cada especie y la  $SS_E(MC)$  se encontró agregando las sumas de cuadrados de los residuales de cada regresión. Los grados de libertad para la  $SS_E(MC)$  son:

$$gl_{MC} = \sum_{m=1}^M (n_m - 2) \quad (5)$$

donde  $n_m$ = Número de observaciones para la especie  $m$ .

Para ajustar  $MR$  se ajustó el modelo (2) pero incluyendo los datos de las seis especies como si fuera una sola. La suma de cuadrados del error de este modelo  $SS_E(MR)$  se obtiene directamente del análisis de regresión con  $n-2$  grados de libertad ( $gl_{MR}$ ).

El valor de  $F_0$  obtenido con la expresión (4) se comparó con el valor tabulado de  $F_{\alpha, gl_{MR}, gl_{MC}, gl_{MC}}$  con  $\alpha=0.05$ ; si  $F_0$  es mayor que  $F_{\alpha, gl_{MR}, gl_{MC}, gl_{MC}}$ , se rechaza la hipótesis nula, lo cual implica que el modelo reducido es inadecuado (Weisberg, 1980; Draper y Smith, 1981; Montgomery y Peck, 1982). En este caso los parámetros del modelo de regresión difieren entre especies. En caso contrario, estadísticamente se aceptaría que se use el mismo modelo para todas las especies.

Rechazar la hipótesis nula con esta prueba de  $F$  no necesariamente implica que los parámetros del modelo de regresión difieran para todas las especies; es posible que algunas de ellas sí se ajusten a un mismo modelo. Para explorar esta posibilidad, se estimaron los valores de los parámetros de regresión de cada especie para buscar ciertas similitudes y se graficaron los datos de DAP y biomasa obtenidos para todas las especies para observar su tendencia en cuanto a la relación de estas dos variables, repitiendo el proceso de comparación de parámetros en los modelos con diferentes subgrupos de especies.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Características dasométricas de las especies

El DAP de los árboles muestreados varió de 3.3 (*Liquidambar*) a 25 cm (*Inga*), y la biomasa estimada por árbol de casi 2 (*Quercus*) a 285 kg (*Inga*). La mayoría de los árboles muestreados se mantuvo en esos intervalos, aunque para *Clethra* los valores máximos de DAP y biomasa (14.8 cm y 40.4 kg) fueron los menores con respecto a las demás especies. Esto es una característica de la especie, por lo que en ambas variables se obtuvieron las menores desviaciones estándar (Cuadro 1).

En el otro extremo, *Liquidambar* y *Quercus* presentaron las mayores desviaciones estándar en DAP y biomasa. Aunque en el caso de estas especies pueden existir árboles de mayores dimensiones, no se encontraron en las tres regiones del estudio. Entonces, la validez de la ecuación

where:  $F_0$ =calculated value of the  $F$  statistic;  $MR$ =reduced model;  $MC$ =complete model;  $SS_E$ =sum of squares for residuals;  $gl$ =degrees of freedom.

To obtain the parameters of the complete model (3) the  $M$  regression equations for each species were adjusted and  $SS_E(MC)$  was obtained by adding the sums of squares for residuals from each regression. The degrees of freedom ( $gl$ ) for  $SS_E(MC)$  are:

$$gl_{MC} = \sum_{m=1}^M (n_m - 2) \quad (5)$$

where:  $n_m$ = Number of observations for species  $m$ .

To adjust  $MR$ , model (2) was fitted, but including the data of the six species as if it were a single one. The error sum of squares for this model  $SS_E(MR)$  is directly obtained from the regression analysis with  $n-2$  degrees of freedom ( $gl_{MR}$ ).

The value of  $F_0$  obtained with expression (4) was compared with the tabulated value of  $F_{\alpha, gl_{MR}, gl_{MC}, gl_{MC}}$  with  $\alpha=0.05$ ; if  $F_0$  is higher than  $F_{\alpha, gl_{MR}, gl_{MC}, gl_{MC}}$ , the null hypothesis is rejected, which means that the reduced model is inappropriate (Weisberg, 1980; Draper and Smith, 1981; Montgomery and Peck, 1982). In this case, the parameters of the regression model differ among species. Otherwise, it would be statistically acceptable to use the same model for all species.

Rejection of the null hypothesis with this  $F$  test does not necessarily imply that the parameters of the regression model differ for all species; it is possible that some of them are adjusted by the same model. To explore this possibility, the values of the parameters of the regression model for each species were estimated and the DBH and biomass data obtained in all species were displayed in graphs in order to observe the trend exhibited regarding the relationship between these two variables, repeating the process of comparison of parameters in the models with different subgroups of species.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Dasometric characteristics of the species

DBH of sampled trees varied from 3.3 (*Liquidambar*) to 25 cm (*Inga*) and biomass estimated per tree varied from almost 2 (*Quercus*) to 285 kg (*Inga*). Most of the sampled trees had values between those intervals, though for *Clethra* the maximum values of DBH and biomass (14.8 cm and 40.4 kg) were the lowest compared to the other species. This is a characteristic of this specie, so it had the lowest standard deviation in both variables (Table1).

In the other extreme, *Liquidambar* and *Quercus* showed the highest values of standard deviation in DBH and biomass. Though there may exist trees of larger dimensions than those sampled here for these species, it was not possible to find them in the three regions studied. Hence, the validity of the allometric equation is obviously

**Cuadro 1. Características de los árboles muestreados por especie para determinar las ecuaciones alométricas.**  
**Table 1. Characteristics of trees sampled in each species to determine the allometric equations.**

Especie	$n_m$	DAP (cm)				Biomasa por árbol (kg)			
		Valor promedio	Valor mínimo	Valor máximo	Desviación estándar	Valor promedio	Valor mínimo	Valor máximo	Desviación estándar
<i>Alnus</i>	10	12.84	3.9	23.5	6.42	48.41	2.82	147.17	50.95
<i>Quercus</i>	8	11.97	3.4	22.6	7.17	72.16	1.91	199.11	75.33
<i>Rapanea</i>	6	9.95	4.3	20.6	6.06	35.50	3.94	119.36	44.08
<i>Clethra</i>	6	7.47	3.5	14.8	4.53	15.24	2.22	40.44	16.49
<i>Liquidambar</i>	10	11.68	3.3	23.9	7.55	76.92	2.25	238.24	89.55
<i>Inga</i>	12	15.05	8.4	25.0	5.24	94.55	23.49	285.69	79.03

alométrica obtenida obviamente se restringe al rango de variación de las dimensiones del arbolado incluido en la muestra, lo cual implica que las ecuaciones generadas puedan aplicarse a las mismas especies en otros sitios o regiones, siempre y cuando presenten características similares de tamaño.

### Modelos para la estimación de biomasa

Todas las ecuaciones de regresión generadas para cada especie presentaron coeficientes de determinación ( $R^2$ ) mayores que 0.97. Los valores más altos ( $R^2=0.99$ ) se obtuvieron para *Liquidambar*, *Rapanea*, *Quercus* y *Clethra* (Cuadro 2). Este tipo de ecuaciones para estimar la biomasa ha proporcionado buenos ajustes en otras especies tropicales. Por ejemplo, Deans *et al.* (1996) obtuvieron  $R^2>0.97$  en muestras de 14 árboles de cinco especies tropicales. Sin embargo, en algunos casos los resultados son menos satisfactorios; Geron y Ruark (1988), calcularon una  $R^2$  de sólo 0.62 cuando se utilizó el DAP como variable predictora de la biomasa foliar en *Pinus radiata*. En ese estudio  $R^2$  aumentó a 0.94 cuando en lugar de emplear el DAP se utilizó el diámetro del tronco medido en la base de la copa.

El valor estimado de la ordenada al origen varió desde  $-2.27$  en *Quercus* hasta  $-1.76$  en *Inga*, mientras que el valor estimado de la pendiente ( $k$ ) varió desde 2.15 en *Clethra* hasta 2.45 en *Liquidambar*; *Alnus* presentó un

limited to the variation range in the size of trees included in the sample, which implies that the equations generated may be applied to the same species in other sites or regions, provided they show similar size characteristics.

### Models to estimate biomass

All the regression equations generated for each species showed coefficients of determination ( $R^2$ ) higher than 0.97. The higher values ( $R^2=0.99$ ) were obtained for *Liquidambar*, *Rapanea*, *Quercus* and *Clethra* (Table 2). This kind of equations to estimate biomass has generally provided good adjustments for other tropical species. For example, Deans *et al.* (1996) reported values of  $R^2>0.97$  in samples of 14 trees of five tropical species. However, in some cases results are less satisfactory; Geron and Ruark (1988) calculated a  $R^2$  of only 0.62 when DBH was used as the predicting variable for leaf biomass in *Pinus radiata*. In that study,  $R^2$  increased to 0.94 when stem diameter measured at the base of the canopy was used instead of DBH.

The estimated value for the intercept varied from  $-2.27$  in *Quercus* up to  $-1.76$  in *Inga*, whereas the estimated value of the slope ( $k$ ) varied from 2.15 in *Clethra* up to 2.45 in *Liquidambar*. *Alnus* had an estimated slope value very similar to that of *Clethra*, with 2.23, and *Quercus* a value close to that of *Liquidambar*, of 2.39. (Table 2). Both the estimated values of the intercept and

**Cuadro 2. Valores del ajuste del modelo  $\ln(Y)=\beta_0 + \beta_1 \ln(X)$  para cada especie.**  
**Table 2. Values for adjustment of model  $\ln(Y)=\beta_0 + \beta_1 \ln(X)$  for each species.**

Especie	$n_m$	$\hat{\beta}_0$	p	$\hat{\beta}_1$	p	$R^2$	$gl_m$
<i>Alnus</i>	10	-2.14	(0.00025)	2.23	(0.00001)	0.97	8
<i>Clethra</i>	6	-1.90	(0.00130)	2.15	(0.00006)	0.99	4
<i>Rapanea</i>	6	-1.99	(0.00204)	2.26	(0.00006)	0.99	4
<i>Quercus</i>	8	-2.27	(0.00016)	2.39	(0.00001)	0.99	6
<i>Liquidambar</i>	10	-2.22	(0.00001)	2.45	(0.00001)	0.99	8
<i>Inga</i>	12	-1.76	(0.00024)	2.26	(0.00001)	0.97	10

$M=6$ ;  $n=52$ ;  $p$ =Nivel de significancia para los parámetros estimados ♦  $M=6$ ;  $n=52$ ;  $p$ =Significance level for the estimated parameters.

valor estimado de pendiente muy similar al de *Clethra*, con 2.23, y *Quercus* un valor cercano al de *Liquidambar*, con 2.39 (Cuadro 2). Tanto los valores estimados de la ordenada al origen como de la pendiente son muy cercanos entre especies, porque la diferencia entre los valores extremos es apenas 0.5 en el primer caso y 0.3 en el segundo.

La tendencia de los valores de la biomasa aérea con respecto al DAP de los árboles, fue similar para todas las especies (Figura 2). Lo anterior hizo pensar que los parámetros de regresión podrían pertenecer a un solo modelo que representaría a las seis especies. Sin embargo, *Alnus*, *Clethra* y *Rapanea* tuvieron una tendencia menor de la pendiente  $\beta_1$ , comparada con *Quercus*, *Liquidambar* e *Inga* (Cuadro 2 y Figura 2) formando así dos subgrupos bien definidos.

A pesar de la similitud en el comportamiento de las especies, al comparar la homogeneidad de los parámetros de regresión entre las seis especies, la hipótesis nula (igualdad) fue rechazada, por lo que no se puede ajustar de manera satisfactoria un solo modelo a la base de datos de las especies involucradas en el estudio.

### Comparación de modelos

Considerando las características de crecimiento y forma de la copa de cada una de las especies, los valores estimados de los coeficientes de regresión y la tendencia de los datos presentados en la Figura 2, se decidió formar dos grupos de especies y probar ahora la hipótesis de homogeneidad de parámetros dentro de cada grupo. En el primer grupo se incluyeron a las especies de mayor tamaño en cuanto a biomasa y DAP (*Quercus*, *Liquidambar* e *Inga*, subgrupo QLI) y en el segundo las tres especies restantes (*Alnus*, *Clethra* y *Rapanea*, subgrupo ACR). Los resultados de la nueva prueba de hipótesis mostraron que existe homogeneidad de parámetros dentro de cada subgrupo, por lo que se puede utilizar una sola ecuación para cada uno de ellos (Cuadro 3).

El valor de la ordenada al origen  $\beta_0$  para el subgrupo ACR (-1.969) fue mayor que el del subgrupo QLI (-2.193); este último fue muy similar al valor del parámetro de la ordenada al origen del modelo en donde se incluyeron a todas las especies, (-2.194). En cambio, el valor estimado de la pendiente ( $\beta_1$ ) del subgrupo ACR (2.189), fue menor que el valor de la pendiente del subgrupo QLI (2.412) (Figura 3). Este comportamiento puede deberse a que en el subgrupo ACR se incluyeron a especies de menor porte (*i.e.* menor crecimiento potencial), mientras que en el subgrupo QLI se incluyeron a las especies de mayor tamaño. Por otra parte, se aprecia que el valor estimado de los parámetros para cada subgrupo es similar al valor estimado de los parámetros individuales de las especies que componen cada grupo.

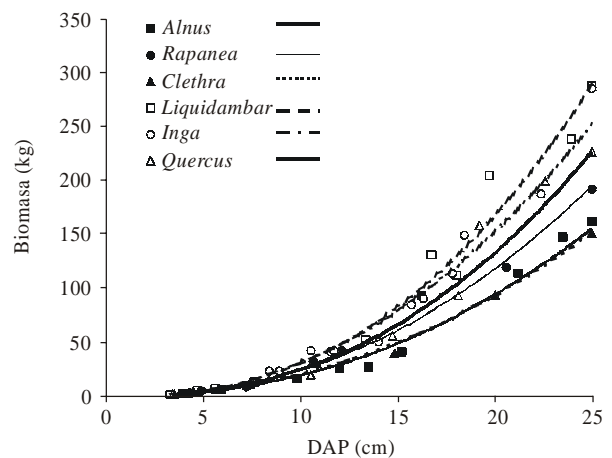
the slope are very similar among species, as the difference between the extreme values is barely 0.5 in the first case and 0.3 in the second.

The trend of the aboveground biomass values as related to DBH of trees was similar for all species (Figure 2), which led to the idea that regression parameters might belong to one single model representing the six species. Nevertheless, *Alnus*, *Clethra* and *Rapanea* showed a smaller slope trend, as compared to *Quercus*, *Liquidambar* and *Inga* (Table 2 and Figure 2), thus forming two well defined subgroups.

Despite the similarity of behaviour among species, the null hypothesis about the homogeneity of the regression parameters among the six species was rejected; therefore it is not possible to satisfactorily fit one single model to the database of the species included in the study.

### Models' comparison

Considering growth characteristics and canopy shape for each one of the species, as well as the estimated values of regression coefficients and trend of data presented in Figure 2, it was decided to form two groups of species and to test now the hypothesis of parameter homogeneity in each group. In the first one, the three biggest species regarding biomass and DBH were included (*Quercus*, *Liquidambar* and *Inga*, subgroup QLI), and in the second the three remaining ones (*Alnus*, *Clethra* and *Rapanea*, subgroup ACR). The results of the new test of hypothesis showed that there is homogeneity of parameters within



**Figura 2.** Dispersión de los datos y líneas de tendencia de los valores observados (transformados a partir del modelo logarítmico) para cada una de las seis especies estudiadas. Los datos de cada especie se distinguen por el símbolo utilizado.

**Figure 2.** Dispersion of data and trend lines of observed values (modified from the logarithmic model) for each one of the six species studied. Data for each species are presented with different symbols.



**Cuadro 3. Valores del ajuste del modelo alométrico y análisis de varianza para el grupo que incluye a todas las especies y los dos subgrupos formados.****Table 3. Adjustment values of the allometric model and variance analysis for the group including all species and for the two subgroups formed.**

Grupo/Subgrupo	<i>n</i>	$\beta_0$	P	$\beta_1$	P	$R^2$	<i>Gl</i>	$F_0$	$F_1$
Todas	52	-2.194	(<0.001)	2.364	(<0.001)	0.972	50	5.18	> 2.08
QLI	30	-2.193	(<0.001)	2.412	(<0.001)	0.986	28	2.07	< 2.78
ACR	22	-1.969	(<0.001)	2.189	(<0.001)	0.975	20	1.34	< 3.06

QLI = *Quercus*, *Liquidambar* e *Inga*.

ACR = *Alnus Clethra* y *Rapanea*.

El coeficiente de determinación obtenido para cada subgrupo fue mayor de 0.97.

La dispersión de los residuales con respecto a los valores esperados de biomasa para cada subgrupo de especies formado (Figura 4) no muestra tendencias que puedan invalidar los análisis (Draper y Smith, 1981).

Al hacer las mediciones de la vegetación en campo para estimar la biomasa en ecosistemas similares al que pertenecen las especies estudiadas, es probable que existan otras especies no consideradas en este estudio. Aunque desde el punto de vista estadístico los modelos desarrollados en este trabajo sólo son aplicables estrictamente a las especies consideradas, varias especies presentan un patrón de crecimiento similar, ajustándose a un mismo modelo alométrico, por lo que cada modelo podría extrapolarse a un mayor número de especies. En este caso, la decisión de incluir a esas especies en uno u otro grupo, dependerá de la similitud en el potencial de crecimiento y arquitectura de la copa de cada una de ellas.

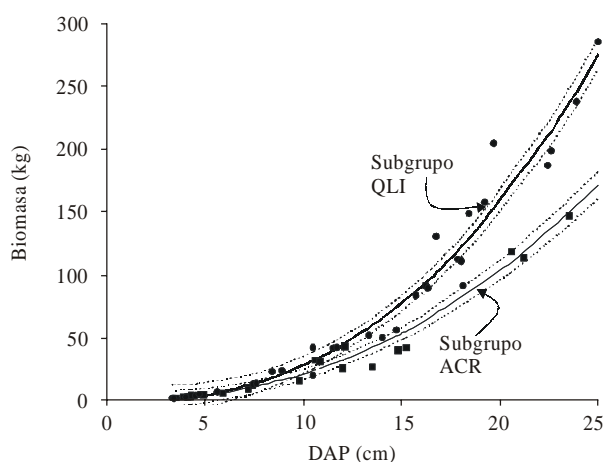
each subgroup, therefore it is possible to use only one equation for each (Table 3).

The value of the intercept  $\beta_0$  for the subgroup ACR (-1.969) was higher than that of the subgroup QLI (-2.193); the latter was very similar to the value of the intercept parameter of the model in which all species were included (-2.194). But the estimated value for the slope ( $\beta_1$ ) of the subgroup ACR (2.189) was lower than that of the subgroup QLI (2.412) (Figure 3). This behavior may be due to the fact that species of smaller size (lower potential growth) were included in subgroup ACR, while those in subgroup QLI were larger. On the other hand, the estimated value of parameters for each subgroup is similar to that of individual parameters of the species making up each group. The determination coefficient obtained for each subgroup was above 0.97.

Dispersion of residuals with respect to expected values of biomass for each subgroup of species (Figure 4) does not show trends that could invalidate the analyses (Draper and Smith, 1981).

On doing plant measurements in the field to estimate biomass in ecosystems similar to that of the species studied, it is likely that species not considered in this study will be found. Although from the statistical point of view, the models developed here are only applicable to the species considered, several species show similar growth trends, adjusting to a single allometric equation; therefore each one of the models developed might be extrapolated to a larger number of species. In this case, the decision of including those species in one or the other group will depend on the similarity of growth potential and canopy architecture of each of them.

If the intention is to extrapolate the allometric functions generated in this study to estimate biomass of the tree stratum of hardwood mixed forests in different regions, it is necessary to consider the level of error in biomass estimation, mainly for large-size species, where the error might be bigger. An advantage of this type of allometric equations is that estimation of total biomass (including foliage) is reliable regardless of the time of the year in which the field sampling is carried out, both in perennial and deciduous species, as the equations were



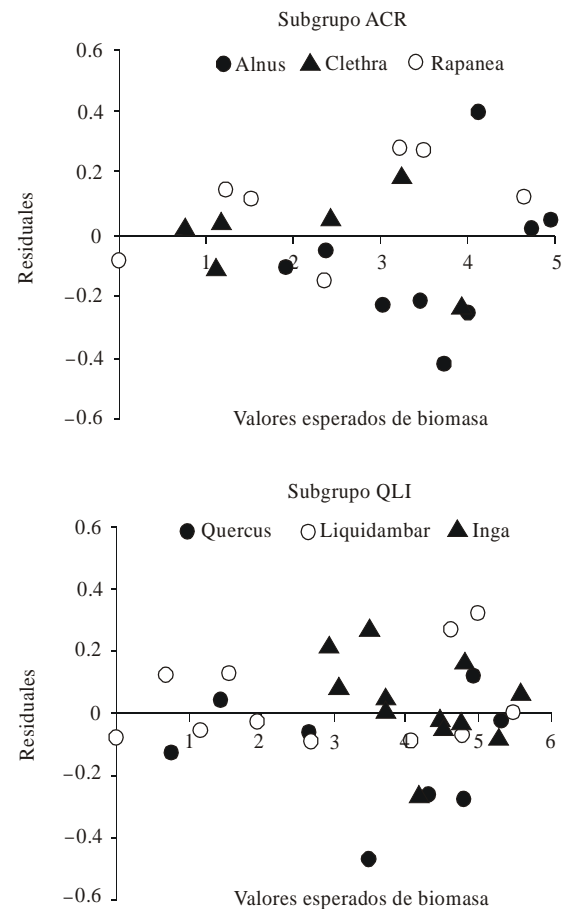
**Figura 3. Tendencia de los valores esperados de biomasa y bandas de confianza ( $\alpha=0.05$ ) con base en el modelo de regresión lineal (datos transformados a partir del modelo logarítmico) para los dos subgrupos de especies.**

**Figure 3. Trend of expected values for biomass and confidence limits ( $\alpha=0.05$ ) based on the lineal regression model (data transformed from the logarithmic model) for the two subgroups of species.**

Si se desea extrapolar las funciones alométricas generadas en este estudio, para estimar la biomasa del estrato arbóreo de grupos vegetales del bosque mesófilo de montaña a regiones diferentes, es necesario considerar el nivel de error en la estimación de la biomasa, principalmente para las especies de porte alto, donde el error podría ser mayor. Una ventaja de este tipo de ecuaciones alométricas es que la estimación de biomasa (incluyendo el follaje) es confiable, independientemente del periodo del año en que se lleva a cabo el muestreo de campo, tanto en especies perennifolias como en caducifolias, ya que las ecuaciones se ajustaron durante el período en que las seis especies contaban con todo su follaje.

Se han utilizado otros métodos para estimar la cantidad de biomasa y carbono presente en un bosque. Hoover *et al.* (2000) usaron como base para calcular la existencia de carbono en diferentes tipos de bosques, el volumen de madera existente en dos sitios reforestados de EE.UU., incluyendo poblaciones naturales y plantaciones de pino, bosques mezclados de encino y otros. Brown y Lugo (1984) se basaron en el volumen del tronco para estimar la biomasa en bosques tropicales. Estas metodologías no incluyeron la biomasa de otros componentes aéreos (ramas, follaje, etc.); además, para convertir el volumen a biomasa es necesario utilizar un factor asociado a la densidad de la madera. Sin embargo, la densidad de la madera es relativamente variable dentro de los árboles en función de su edad, la productividad del sitio, la conformación individual de las especies, etc., lo cual puede generar errores en la estimación. En cambio, el uso de las ecuaciones alométricas permite obtener una estimación más confiable y directa de la biomasa y del carbono en los sistemas vegetales, porque tal estimación es individual y mediante la sumatoria se obtiene una estimación global por cada sistema. En la misma ecuación está considerada la variabilidad que pueden presentar los individuos, por edad y competencia, al mismo tiempo que su crecimiento refleja la productividad del sitio.

Existen otros métodos que estiman en forma rápida los almacenes de carbono en diferentes ecosistemas, aun con la heterogeneidad de las áreas forestales en cuanto a topografía, clima, suelo, y vegetación. Mediante técnicas de sensores remotos, los datos de los diferentes ecosistemas se incorporan a modelos de simulación que cuantifican los procesos ecofisiológicos (especialmente intercambio gaseoso) con base en las características propias de los ecosistemas (Waring y Running, 1998), y a partir de ellos se estima la biomasa presente. Sin embargo, para calibrar y verificar la eficiencia de estos métodos, es necesario utilizar las ecuaciones alométricas que proporcionan información más precisa de la biomasa existente. Un aspecto importante es que los modelos alométricos aquí desarrollados pueden ser utilizados en situaciones de vegetación similar para estimar la cantidad de biomasa



**Figura 4.** Distribución de los residuales (errores) con respecto a los valores esperados de biomasa con base en el modelo de regresión para cada subgrupo de especies.

**Figure 4.** Distribution of residuals (errors) with respect to expected values of biomass based on the regression model for each subgroup of species.

adjusted during the period in which the six species had all their foliage.

Other methods to estimate amount of biomass and carbon present in forest trees have been used. Hoover *et al.* (2000) based their estimations of the presence of carbon in different forest types on the wood volume existing in two reforested sites of the United States, including natural populations and plantations of pine, mixed oak forests and others. Brown and Lugo (1984) also used stem volume to calculate biomass in tropical forests. These methodologies did not include biomass of other aboveground components (branches, leaves, etc.); besides, in order to convert wood volume into biomass a factor relating wood density is required. However, wood density varies within trees as a function of age, site productivity, individual conformation of species etc, all

sa de manera confiable, debido al valor alto de los coeficientes de determinación que se obtuvieron.

### CONCLUSIONES

El modelo alométrico propuesto para predecir la biomasa de especies dominantes en la Sierra Norte de Oaxaca, México, tuvo valores altos del coeficiente de determinación ( $R^2 > 0.97$ ) para las seis especies estudiadas, utilizando sólo la variable diámetro a la altura del pecho.

Aun cuando hubo similitud en el patrón de crecimiento y arquitectura de la copa de las seis especies, no fue posible ajustarlas a la misma ecuación alométrica para estimar la biomasa conjunta. La comparación de diferentes ecuaciones de regresión permitió agrupar a las seis especies en dos subgrupos. En uno ellos se incluyeron las tres especies de mayor porte (subgrupo QLI) mientras que en el otro se incluyeron las tres de menor tamaño (subgrupo ACR).

### AGRADECIMIENTOS

Al Global Environment Facility (GEF), al Banco Mundial (BM), a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México (SAGARPA), al Gobierno del estado de Oaxaca y a todas las personas que con sus esfuerzos de coordinación y trabajo, colaboraron en la realización de este estudio.

### LITERATURA CITADA

- Ávila, G., F. Jiménez, J. Beer, M. Gómez, y M. Ibrahim. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 8(30): 32-35.
- Bartelink, H. H. 1996. Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir. *For. Ecol. Manag.* 86: 193-203.
- Brown, S. and A. E. Lugo. 1984. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science* 223 No. 4642: 1290-1293.
- Brown, S., J. R. Gillespie A. and A. E. Lugo. 1989. Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *For. Sci.* 35(4): 881-902.
- Castellanos, B. J., A. Velásquez M., J. Vargas H., C. Rodríguez F. y A. Fierros G. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia* 30: 123-128.
- Causton, D. R. 1985. Biometrical, structural and physiological relationships among tree parts. *In: Attributes of trees as crop plants.* Cannell, M. G. R. and J. E. Jackson (eds). *Inst. Terrestrial Ecology, Huntingdon.* pp: 137-159.
- Chapman, J. W. and S. T. Gower. 1991. Aboveground production and canopy dynamics in sugar maple and red oak trees in southwestern Wisconsin. *Can. J. For. Res.* 21: 1533-1543.
- Deans, J. D., J. Mora., and J. Grace. 1996. Biomass relationships for tree species in regenerating semi-deciduous tropical moist forest in Cameroon. *For. Ecol. Manag.* 88: 215-225.
- De Jong, B. H. J., G. Montoya-Gómez, K. Nelson, L. Soto-Pinto, and R. Tipper. 1995. Community forest management and carbon sequestration: A feasibility study from Chiapas, México. *Interciencia* 20(6): 409-416.
- Draper, N. R., and H. Smith. 1981. *Applied Regression Analysis.* Second Ed. John Wiley & Sons. USA. 709 p.

of which can lead to estimation errors. The use of allometric equations allows to obtain a more reliable and direct estimation of biomass and carbon in plant systems, since such estimation is done at the tree level, and by adding individual-tree values, a global estimation for each system is obtained. The variability among individuals, related to age and competition, is included in the same equation, and their growth is a measure of site productivity.

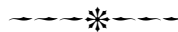
There are other methods to rapidly estimate carbon pools in different ecosystems, in spite of the heterogeneity of forest areas as related to their topography, climate, soil, and vegetation. Using remote sensing techniques, data from different ecosystems is integrated into simulation models that quantify the ecophysiological processes (especially gas exchange) based on characteristics of the ecosystems (Waring and Running, 1998), to estimate the biomass present. Yet, to calibrate and verify the efficiency of these methods, allometric equations must be used, as they provide more accurate information about the existing biomass. An important aspect worth considering is that allometric models developed in this study can be used in situations of similar plant communities to estimate the amount of biomass in a reliable way, due to the high determination coefficients obtained.

### CONCLUSIONS

The allometric model proposed to predict the biomass of tree species prevailing in the Northern Sierra of Oaxaca, México, using diameter at breast height as predictor variable had a high determination coefficient ( $R^2 > 0.97$ ) for the six species studied.

In spite of the similarity of the growth pattern and the canopy architecture in the six species, it was not possible to fit to them the same allometric equation to estimate overall biomass. The comparison of the different regression equations allowed to group the six species into two subgroups. In one them the three larger-size species were included (subgroup QLI), while the other included the three smaller ones (subgroup ACR).

—End of the English version—



- Espinosa-Bancalari, M. A., and D. A. Perry. 1987. Distribution and increment of biomass in adjacent young Douglas-fir stands with different early growth rates. *Can. J. For. Res.* 17: 722-730.
- Geron, C. D., and G. A. Ruark. 1988. Comparison of constant and variable allometric ratios for predicting foliar biomass of various tree genera. *Can. J. For. Res.* 18(10): 1298-1304.
- Grier, C. C., and R. H. Waring. 1974. Conifer foliage mass related to sapwood area. *For. Sci.* 20:205-206.

- Hoover, C. M., R. A. Birdsey, L. S. Heath, and S. L. Stout. 2000. How to estimate carbon sequestration on small forest tracts. *J. Forestry*. 98(9):13-19.
- Huxley, J. S. 1932. *Problems of Relative Growth*. The Dial Press, New York. 276 p.
- Landsberg, J. J., and S. T. Gower. 1997. *Applications of Physiological Ecology to Forest Management*. Academic Press. San Diego, U.S.A. 354 p.
- Locatelli, B., y S. Leonard 2001. Un método para medir el carbono almacenado en los bosques de Malleco (Chile). *Bois et Forêts des Tropiques*. 276(1): 69-80.
- Montgomery, D. C., and E. A. Peck. 1982. *Introduction to Linear Regression Analysis*. John Wiley & Sons. New York, U. S. A. 504 p.
- Schulze, E. D., Ch. Wirth and M. Heimann. 2000. Managing forests after Kyoto. *Science* 289 (5487):2058-2059.
- Ter-Mikaelian, M. T., and M. D. Korzukhin. 1997. Biomass equation for sixty-five North American tree species. *For. Ecol. Manag.* 97: 1-24.
- UNFCCC. 2002. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf> (17 de julio de 2002).
- Waring, R. H., and S. W. Running. 1998. *Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales*. Second. Edition. Academic Press. San Diego, Ca. 370 p.
- Weisberg, S. 1980. *Applied Linear Regression*. John Wiley & Sons. New York, U. S. A. 323 p.