

Forest volume estimation techniques with special emphasis on the tropics

Técnicas de estimación del volumen forestal con especial énfasis en los trópicos

Juan Carlos Guzmán-Santiago¹; Oscar Alberto Aguirre-Calderón^{1*}; Benedicto Vargas-Larreta²

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Nacional km 145. C. P. 67700. Linares, Nuevo León, México.

²Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto. Tecnológico núm. 101, La Forestal. C. P. 34947. El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, México.

*Corresponding author: oscar.aguirrecl@uanl.edu.mx; tel.: +52 821 212 4251 ext. 112.

Abstract

Introduction: Volume is an important variable in forest management since it allows evaluating the growth and development of individuals in stands.

Objective: To analyze the techniques for estimating forest volume with an emphasis on the tropics.

Materials and methods: The work was developed with the non-probabilistic snowball technique, in which the bibliography reported in an investigation suggested the search for similar works to enrich the subject.

Results and discussion: In tropical forests, tree measurement variables provide valuable information for estimating stem or total volume using a xylometer, Pressler and standing tree volume formulas, dendrometric bodies, rigorous volume estimation, graphical method or conventional equations and neural networks. Accurate volume information is only obtained with the xylometer technique, which is the only one that allows estimating volume using the direct method. The rigorous volume estimation technique is the most used in the tropics to obtain the volume of individual sections, which are fitted by conventional or neural network equations to estimate the total volume. Most researchers selected the best models using the coefficient of determination, root mean square error, bias, Durbin-Watson test, and Akaike and Bayesian information criteria.

Conclusion: Model selection depends directly on the researchers; however, the xylometer technique is the only one that estimates volume with the direct method and in an accurate way.

Resumen

Introducción: El volumen es una variable importante en la gestión forestal, ya que permite evaluar el crecimiento y desarrollo de los individuos en los rodales.

Objetivo: Analizar las técnicas de estimación de volumen forestal con énfasis en los trópicos.

Materiales y métodos: El trabajo se desarrolló con la técnica no probabilística bola de nieve, en la que mediante la bibliografía reportada en una investigación se sugirió la búsqueda de trabajos similares para enriquecer el tema.

Resultados y discusión: En los bosques tropicales, las variables dasométricas proporcionan información valiosa para estimar el volumen fustal o total mediante xilómetro, fórmulas de Pressler y cubicación en pie, cuerpos dendrométricos, estimación rigurosa, método gráfico o las ecuaciones convencionales y las redes neuronales. La información volumétrica exacta solo se obtiene con la técnica del xilómetro que es la única que permite estimar el volumen mediante el método directo. La técnica de cubicación rigurosa es la más utilizada en los trópicos para obtener el volumen de las secciones, las cuales son ajustadas por las ecuaciones de tipo convencional o de redes neuronales para estimar el volumen total. La mayoría de los investigadores seleccionaron los mejores modelos mediante el coeficiente de determinación, raíz del error medio cuadrático, sesgo, prueba de Durbin-Watson y criterios de información de Akaike y de información bayesiano.

Conclusión: La selección de los modelos depende directamente de los investigadores; no obstante, la técnica del xilómetro es la única que estima el volumen con el método directo y de manera precisa.

Keywords: tropical forests; timber volume; xylometer; rigorous volume estimation; volume equations.

Palabras clave: bosques tropicales; volumen maderable; xilómetro; cubicación rigurosa; ecuaciones de volumen.

Introduction

Timber volume estimation allows us to infer the growth and development of forest stands, through the application of silvicultural treatments, with the intention of improving the quality of each of the individuals that comprise them (Diéguez-Aranda et al., 2009). In this sense, forest inventories are tools that allow for the evaluation of the resources available in forests, since they provide an overview of their current situation and enable decision-making on management, conservation, restoration or use of the trees and the commercial distribution of the products (Alvis-Gordo, 2009; Corral-Rivas & Nívar-Cháidez, 2009; Del Rio, Montes, Cañellas, & Montero, 2003; El-Juhany, Aref, & El-Wakeel, 2002).

Timber stocks can be quantified by both direct and indirect methods. The xylometer technique is based solely on the direct method (destructive sampling) (Aldana-Pereira, 2008; Cruz-Cobos, Mendía-Santana, Jiménez-Flores, Nájera-Luna, & Cruz-García, 2016), while the Pressler (or guidepoint) and standing tree volume techniques, dendrometric bodies, rigorous volume estimation, the graphical method, conventional equations and artificial neural networks can be calculated using both methods.

Several equations estimated by the direct and indirect methods allow the quantification of timber stocks in natural forests or in plantations of mainly commercial interest, through forest inventories. Mathematical models are tools that allow representing a phenomenon through an equation, facilitating the interpretation of the prediction about the future behavior of an event, for making decisions about resource management. The application of these models guarantees optimal results in timber harvesting work (Diéguez-Aranda et al., 2009). In this context, equations are essential for modeling the variety of relationships between response and estimated variables. Nonlinear (logistic and exponential) equations are ideal to describe biological and physical systems of species (Urbano, Machado, Figueiredo-Filho, Sanquetta, & Zea-Camaño, 2018).

In tropical ecosystems there is a wide diversity of species with morphological structures that contribute to growth and development conditions (Guariguata et al., 2009; Martínez-Tobón, Aunta-Duarte, & Valero-Fandiño, 2013); for example, the tree stem presents difficulties in terms of quantifying forest volume and, consequently, for the distribution of products (Cancino-Cancino, 2012; De Azevêdo, Paes, Calegari, & Do Nascimento, 2014). Given the scarcity of information on volume modeling in tropical species and its importance in forestry, especially in the commercial

Introducción

La estimación del volumen maderable permite inferir el crecimiento y desarrollo de las masas forestales, a través de la aplicación de tratamientos silvícolas, con la intención de mejorar la calidad de cada uno de los individuos que las integran (Diéguez-Aranda et al., 2009). En este sentido, los inventarios forestales son herramientas que permiten evaluar los recursos disponibles en los bosques, ya que brindan un panorama general de su situación actual y posibilitan la toma de decisiones en el manejo, conservación, restauración o aprovechamiento de los árboles y la distribución comercial de los productos (Alvis-Gordo, 2009; Corral-Rivas & Nívar-Cháidez, 2009; Del Rio, Montes, Cañellas, & Montero, 2003; El-Juhany, Aref, & El-Wakeel, 2002).

Las existencias maderables se pueden cuantificar mediante los métodos directo e indirecto. La técnica del xilómetro se basa únicamente en el método directo (muestreo destructivo) (Aldana-Pereira, 2008; Cruz-Cobos, Mendía-Santana, Jiménez-Flores, Nájera-Luna, & Cruz-García, 2016), mientras que las técnicas de Pressler o punto directriz, de cubicación en pie, cuerpos dendrométricos, cubicación rigurosa, método gráfico, ecuaciones convencionales y redes neuronales artificiales se pueden calcular mediante los dos métodos.

Varias ecuaciones estimadas por los métodos directo e indirecto permiten la cuantificación de las existencias maderables en bosques naturales o en plantaciones de interés comercial principalmente, a través de los inventarios forestales. Los modelos matemáticos son herramientas que permiten representar un fenómeno mediante una ecuación, facilitando la interpretación de la predicción sobre el comportamiento futuro de un evento, para la toma de decisiones sobre el manejo de los recursos. La aplicación de estos modelos garantiza un resultado óptimo en trabajos de aprovechamiento maderable (Diéguez-Aranda et al., 2009). En este contexto, las ecuaciones son fundamentales para modelar la variedad de relaciones entre las variables respuesta y estimadas. Las ecuaciones de tipo no lineal (logística y exponencial) son ideales para describir sistemas biológicos y físicos de las especies (Urbano, Machado, Figueiredo-Filho, Sanquetta, & Zea-Camaño, 2018).

En los ecosistemas tropicales existe una amplia diversidad de especies con estructuras morfológicas que contribuyen en las condiciones de crecimiento y desarrollo (Guariguata et al., 2009; Martínez-Tobón, Aunta-Duarte, & Valero-Fandiño, 2013); por ejemplo, el fuste de los árboles, el cual presenta dificultades para la cuantificación del volumen forestal y, en consecuencia, para la distribución de productos (Cancino-Cancino,

sector, the objective of this work was to investigate volume estimation techniques in the tropics.

Materials and methods

The paper was developed with the non-probabilistic snowball technique, in which the bibliography reported in an investigation suggested the search for other similar works to enrich the subject (Baltar & Gorjup, 2012; Vásquez-Bautista, Zamudio-Sánchez, Alvarado-Segura, & Romo-Lozano, 2016). For this, books, scientific journals in the EBSCOhost, Scopus, Google Scholar and Elsevier search engines, and libraries of various educational institutions were explored.

The search focused on locating volume equation systems for forest species in tropical zones; in addition, the digital library of the Forest Planning System (SiPlaFor) platform for temperate forests was viewed. Some keywords were used such as: trees, volume estimation, equations, tropical species, estimation methods, accuracy and volume. Subsequently, volume and yield estimation techniques were compared to analyze their application and predictive capabilities.

Results and discussion

Direct and indirect methods

The equations estimated by the direct and indirect methods allow the quantification of timber stocks in natural forests or in plantations of mainly commercial interest, through forest inventories. Based on careful analysis, it can be deduced that the xylometer technique is the only one that can be considered as a direct method (destructive sampling) for volume estimation, since the other techniques can use both methods; the use of the method is at the discretion of the researcher when planning fieldwork.

Each method has its advantages and disadvantages; for example, the indirect method is very practical since it does not imply felling the tree and the variables to be used can be obtained with available tools, such as the Bitterlich tele-relaskop, TruPulse hypsometer or Criterion RD1000 and Barr-Stroud dendrometers (Costas, Veran, Lorán, López, Fosco, & González, 2006; Gómez-González, Domínguez-Domínguez, Martínez-Zurimendi, & Ramírez-Valverde, 2018; Valencia-Manzo et al., 2017; Williams, Cormier, Briggs, & Martínez, 1999). In the direct method, tree measurement information can be obtained through destructive sampling and by means of mountaineering or forest bicycle equipment, telescopic poles, grade rods, and the use of a diameter tape or tree caliper, with which the diameters are measured at different heights (Diéguez-Aranda et al., 2003). The same equipment can be used in the indirect method. Destructive sampling consists

2012; De Azevêdo, Paes, Calegari, & Do Nascimento, 2014). Dada la escasez de información sobre modelación volumétrica en especies tropicales y su importancia en el ámbito forestal, sobre todo en el sector comercial, el objetivo de este trabajo fue investigar las técnicas de estimación de volumen en los trópicos.

Materiales y métodos

El trabajo se desarrolló con la técnica no probabilística bola de nieve, en la que mediante la bibliografía reportada en una investigación se sugirió la búsqueda de otros trabajos similares para enriquecer el tema (Baltar & Gorjup, 2012; Vásquez-Bautista, Zamudio-Sánchez, Alvarado-Segura, & Romo-Lozano, 2016). Para ello, se consultaron libros, revistas científicas en los buscadores EBSCOhost, Scopus, Google Scholar y Elsevier, así como bibliotecas de varias instituciones educativas.

La búsqueda se enfocó en la localización de sistemas de ecuaciones de volumen para especies de bosques en zonas tropicales; además, se consultó la biblioteca digital de la plataforma Sistema de Planeación Forestal (SiPlaFor) para bosques templados. Se utilizaron algunas palabras claves como: árboles, cubicación, ecuaciones, especies tropicales, métodos de estimación, precisión y volumen. Posteriormente, las técnicas de estimación volumétrica y de rendimiento se compararon para analizar su aplicación y capacidad de predicción.

Resultados y discusión

Métodos directos e indirectos

Las ecuaciones estimadas por los métodos directo e indirecto permiten la cuantificación de las existencias maderables en bosques naturales o en plantaciones de interés comercial principalmente, a través de inventarios forestales. Del análisis minucioso se deduce que la técnica del xilómetro es la única que puede ser considerada como método directo (muestreo destructivo) para la estimación del volumen, ya que las demás técnicas pueden utilizar ambos métodos; el uso del método queda a criterio del investigador al planificar el trabajo de campo.

Cada método tiene sus ventajas y desventajas; por ejemplo, el método indirecto es muy práctico, ya que no implica el derribo del arbolado y las variables a utilizar pueden obtenerse con las herramientas disponibles, tales como el telerrelascopio de Bitterlich, hipsómetro True Pulse o los dendrómetros Criterion RD1000 y Barr-Stroud (Costas, Veran, Lorán, López, Fosco, & González, 2006; Gómez-González, Domínguez-Domínguez, Martínez-Zurimendi, & Ramírez-Valverde, 2018; Valencia-Manzo et al., 2017; Williams, Cormier, Briggs, & Martínez, 1999). En el método directo, la

of felling previously selected individuals; because the measurement process can be carried out very easily, the quality of the information obtained is slightly better than that generated with the indirect method and with the equipment (Melo & Lizarazo, 2017).

Xylometer technique

Although not frequently used, this technique, also known as Archimedes' displacement, is the most accurate for estimating the volume of individual trees through the displacement of water caused by submerging each of the pieces in a previously calibrated container (xylometer) (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 1980). This method is based on the principle that a body submerged in a static fluid tends to receive a vertical (upward) thrust equal to the volume of fluid displaced by the object (Romahn de la Vega & Ramírez-Maldonado, 2010). The volume is calculated with the following formula:

$$V = W_1 - W_2 + e$$

where,

V = volume (m^3)

W_1 = initial weight (kg)

W_2 = final weight (kg)

e = model error.

Martin (1984) concluded that this technique obtained excellent results compared to rigorous volume estimation techniques when experimenting with various broadleaf and shrub species; likewise, Biging (1988) supported this information. On the other hand, Figueiredo-Filho and Budant-Schaaf (1999) indicated that the xylometer technique is more accurate than conventional methods, and even more so when fitted to taper-volume equations; however, despite the high reliability, the use of the xylometer is limited since its application lies in areas with shrub or scrub species that do not have a defined stem (Aldana-Pereira, 2008), while in large logs it is difficult to use (Cancino-Cancino, 2012).

Pressler and standing tree volume formulas

Most of the time, the Pressler (or guidepoint) and standing tree volume formulas have been applied to unfelled trees, as they provide quality information. Volume tables generated with Pressler's formulas provide excellent results for cone-shaped or paraboloid solid bodies and allow estimating the stem without having to divide it (Gómez-González et al., 2018); however, these have been displaced by mathematical models (Da Cunha & Guimarães-Finger, 2009), due to the difficulty in measuring the height at which half the diameter at breast height is found. The standing tree

información dasométrica se puede obtener a través del muestreo destructivo y mediante equipos de alpinismo o bicicleta forestal, pértigas telescópicas, jalones, estadales y el uso de una cinta diamétrica o forcípula, con los cuales se logra la medición de los diámetros a alturas distintas (Diéguez-Aranda et al., 2003). Estos mismos equipos pueden utilizarse en el método indirecto. El muestreo destructivo consiste en derribar los individuos seleccionados previamente; debido a que el proceso de medición se puede realizar con gran facilidad, la calidad de la información obtenida es ligeramente mejor que la generada con el método indirecto y con los equipos (Melo & Lizarazo, 2017).

Técnica del xilómetro

A pesar de que no se usa frecuentemente, esta técnica conocida también como desplazamiento de Arquímedes es la más precisa para estimar el volumen de árboles individuales a través del desplazamiento de agua ocasionado por el sumergimiento de cada uno de los trozos en un recipiente (xilómetro) previamente calibrado (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 1980). Este método se basa en el principio que afirma que un cuerpo sumergido en un fluido estático tiende a recibir un empuje vertical (hacia arriba) igual al volumen de fluido desplazado por el objeto (Romahn de la Vega & Ramírez-Maldonado, 2010). El volumen se calcula con la fórmula siguiente:

$$V = P_1 - P_2 + e$$

donde,

V = volumen (m^3)

P_1 = peso inicial (kg)

P_2 = peso final (kg)

e = error del modelo.

Martin (1984) concluyó que con esta técnica se obtienen resultados excelentes en comparación con las técnicas de cubicación rigurosa, al experimentar con varias especies de latifoliadas y arbustivas; de igual forma, Biging (1988) respaldó esta información. Por otra parte, Figueiredo-Filho y Budant-Schaaf (1999) indicaron que la técnica del xilómetro es más precisa que los métodos convencionales, y más aún cuando se adapta a ecuaciones de ahusamiento-volumen; sin embargo, a pesar de la alta confiabilidad, el uso del xilómetro está limitado, ya que su aplicación radica en áreas con vegetación arbustivas o matorrales que no tienen un fuste definido (Aldana-Pereira, 2008), mientras que en trozas de grandes dimensiones se dificulta el uso (Cancino-Cancino, 2012).

Fórmulas de Pressler y de cubicación en pie

La mayoría de las veces, las fórmulas de Pressler o punto directriz y de cubicación en pie se han aplicado para

volume formula consists of measuring the diameter at breast height (1.30 m from ground level) of a representative sample of trees, with the aid of a tree caliper or diameter tape; subsequently, a morphic coefficient is used to estimate the volume, although this factor often does not correspond to the species (Hazard & Berger, 1972).

The Pressler (or guidepoint) and standing tree volume equations are expressed, respectively, as follows:

$$V = \frac{2}{3} + g \cdot h_p + e$$

$$V = \frac{0.7854 \cdot d^2 \cdot hc}{4} + e$$

$$V = \frac{0.7854 \cdot d^2 \cdot (h \cdot f)}{4} + e$$

where,

V = volume (m³)

g = basal area (m²)

h_p = guidepoint height (m)

d = diameter at breast height (cm) at 1.30 m above ground level

mh = merchantable height (m)

h = total height (m)

f = form factor

e = model error.

The form or morphic coefficient consists of dividing the merchantable or actual volume of the stem by the volume of the conventional geometric body of the same base as the diameter at breast height section of the tree and its same height (Ugalde, 1981). The value of the coefficients depends on the forms of the stem, which can be neiloid, cylindrical, parabolic or conical, with the cylindrical form factor being the most commonly used (Cancino-Cancino, 2012). This coefficient is always less than 1 for the classic dendrometric types (Diéguez-Aranda et al., 2003).

The volume of standing trees can be estimated in plantations or natural forests using the morphic coefficient with excellent results, which makes it possible to prepare a standardized volume table for the species of interest (Michela, Kees, & Skoko, 2018). It is important to highlight the above, since in some works the 0.75 coefficient is still used for several pine species and some broadleaf or tropical ones (Rojas-Gutiérrez, 1977), which overestimates or underestimates the volume, because the coefficient varies with the dimensions of the stem and the species (Aguilar, Sequeira, & Peralta, 2017) and therefore does not always generate confidence (De Azevêdo et al., 2014).

árboles no derribados, ya que proporcionan información de calidad. Las tablas de volumen generadas con las fórmulas de Pressler brindan resultados excelentes en cuerpos sólidos en forma de cono o paraboloides y permiten estimar el fuste sin necesidad de dividirlo (Gómez-González et al., 2018); sin embargo, estas han sido desplazadas por los modelos matemáticos (Da Cunha & Guimarães-Finger, 2009), debido a la dificultad para medir la altura a la que se encuentra la mitad del diámetro normal. La fórmula de cubicación en pie consiste en medir el diámetro normal (a 1.30 m desde el nivel del suelo) de una muestra representativa de árboles, con apoyo de una forcípula o cinta diamétrica; posteriormente, un coeficiente mórfoico se utiliza para estimar el volumen, aunque muchas veces este factor no corresponde a la especie (Hazard & Berger, 1972).

Las ecuaciones de Pressler o punto directriz y de cubicación en pie se expresan, respectivamente, de la manera siguiente:

$$V = \frac{2}{3} + g \cdot h_p + e$$

$$V = \frac{0.7854 \cdot d^2 \cdot hc}{4} + e$$

$$V = \frac{0.7854 \cdot d^2 \cdot (h \cdot f)}{4} + e$$

donde,

V = volumen (m³)

g = área basal (m²)

h_p = altura del punto directriz (m)

d = diámetro normal (cm) a 1.30 m sobre el nivel del suelo

hc = altura comercial (m)

h = altura total (m)

f = factor de forma

e = error del modelo.

El coeficiente de forma o mórfoico consiste en dividir el volumen comercial o real del fuste entre el volumen del cuerpo geométrico convencional de la misma base que la sección normal del árbol y su misma altura (Ugalde, 1981). El valor de los coeficientes depende de las formas del fuste que pueden ser neiloide, cilíndricos, parabólicos o cónicos, siendo el factor de forma cilíndrico el de uso más habitual (Cancino-Cancino, 2012). Dicho coeficiente siempre es menor de 1 para los tipos dendrométricos clásicos (Diéguez-Aranda et al., 2003).

El volumen de los árboles en pie se puede estimar en plantaciones o bosques naturales empleando el coeficiente mórfoico con resultados excelentes, lo cual hace posible elaborar una tabla de volumen

Estimation by dendrometric bodies

Environmental interactions, as well as forestry activities, are responsible for the shape of a tree's trunk, mainly in most tropical species, where the base of the tree resembles a parabola known as a neiloid that changes to a cylinder, while the middle part takes a shape called a paraboloid and the tip resembles a cone (Cancino-Cancino, 2012). Given this, criteria are taken for field measurements to obtain reliable information, where stems bifurcated below the diameter at breast height (1.30 m) are considered to be two trees and averaged, while those bifurcated above 1.30 m are considered to be a single tree (Cruz-Cobos et al., 2016). In these cases, the tree sections are determined using solids of revolution. The equations for the dendrometric bodies are as follows:

$$\text{Neiloid} \quad V = \frac{1}{4} * g_i * H + e$$

$$\text{Cylinder} \quad V = g_i * H + e$$

$$\text{Paraboloid} \quad V = \frac{1}{2} * g_i * H + e$$

$$\text{Cone} \quad V = \frac{1}{3} * g_i * H + e$$

where,

V = volume (m^3)

g_i = sectional area of one end of the section (m^2)

H = height in one third (m)

e = model error.

Stems that resemble the neiloid shape have a form factor of less than 0.38; cylindrical stems can take values equal to or greater than 0.75; paraboloid-shaped ones vary from 0.40 to 0.74; and those resembling a cone range from 0.27 to 0.39. Table 1 indicates some tropical species of commercial interest according to the geometric figures that the stem represents (Hernández-Ramos et al., 2018; Rojas-Gutiérrez, 1977; Moras & Vallejos, 2013; Tewari, Mariswamy, & Arunkumar, 2013).

The estimation method by dendrometric bodies is used as a basis for research work, since it provides accurate information; however, most of the time the rigorous volume estimation method is used because it is easier (Melo & Lizarazo, 2017; Romahn de la Vega & Ramírez-Maldonado, 2010).

Rigorous volumen estimation

Volume of stem and branch sections in tropical species are frequently estimated with the Smalian, Newton

estandarizado para la especie de interés (Michela, Kees, & Skoko, 2018). Es importante destacar lo anterior, ya que en algunos trabajos aún se utiliza el coeficiente 0.75 para varias especies de pino y algunas latifoliadas o tropicales (Rojas-Gutiérrez, 1977), lo cual sobrestima o subestima el volumen, debido que el coeficiente varía con las dimensiones del fuste y de la especie (Aguilar, Sequeira, & Peralta, 2017) por lo que no siempre genera confianza (De Azevêdo et al., 2014).

Estimación por cuerpos dendrométricos

Las interacciones del medio ambiente, así como las actividades de silvicultura, son responsables de la forma del fuste de los árboles, principalmente en la mayoría de las especies tropicales, donde la base del árbol se asemeja a una parábola conocida como neiloide que tiende a un cilindro, mientras que la parte intermedia toma una forma llamada paraboloides y la punta se asemeja a un cono (Cancino-Cancino, 2012). Ante ello se toman criterios para las mediciones en campo que permitan obtener información confiable, donde los fustes bifurcados antes del diámetro normal (1.30 m) se consideran dos árboles y se promedian; mientras que los bifurcados por arriba de 1.30 m se considera un solo árbol (Cruz-Cobos et al., 2016). En estos casos, las secciones del arbolado se determinan mediante sólidos de revolución. Las ecuaciones de los cuerpos dendrométricos son las siguientes:

$$\text{Neiloide} \quad V = \frac{1}{4} * g_i * H + e$$

$$\text{Cilindro} \quad V = g_i * H + e$$

$$\text{Paraboloides} \quad V = \frac{1}{2} * g_i * H + e$$

$$\text{Cono} \quad V = \frac{1}{3} * g_i * H + e$$

donde,

V = volumen (m^3)

g_i = área seccional de un extremo de la sección (m^2)

H = altura en un tercio (m)

e = error del modelo.

Los fustes que se asemejan a la forma del neiloide tiene un factor de forma menor de 0.38; los cilíndricos puede tomar valores iguales o mayores de 0.75; los que poseen forma de paraboloides varían de 0.40 a 0.74; y los que se asemejan a un cono oscilan de 0.27 a 0.39. El Cuadro 1 indica algunas especies tropicales de interés comercial de acuerdo con las figuras geométricas que el fuste representa (Hernández-Ramos et al., 2018; Rojas-Gutiérrez, 1977; Moras & Vallejos, 2013; Tewari, Mariswamy, & Arunkumar, 2013).

Table 1. Tropical species with defined dendrometric bodies.
Cuadro 1. Especies tropicales con cuerpos dendrométricos definidos.

Species / Especies	Form / Forma
<i>Carapa guianensis</i> Aubl.	Neiloid / Neiloide
<i>Hymenaea palustris</i> Ducke	Neiloid / Neiloide
<i>Pterocarpus officinalis</i> Jacq.	Neiloid / Neiloide
<i>Clathrotropis brunnea</i> Amshoff	Neiloid / Neiloide
<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken	Neiloid / Neiloide
<i>Fraxinus chinensis</i> Roxb.	Neiloid / Neiloide
<i>Eucalyptus</i> sp.	Neiloid / Neiloide
<i>Prioria copaifera</i> Griseb.	Cylinder / Cilindro
<i>Brosimum utile</i> (H.B.K.) Pittier	Cylinder / Cilindro
<i>Humiriastrum procerum</i> (Little) Cuatrec.	Cylinder / Cilindro
<i>Huberodendron patinoi</i> Cuatrec.	Cylinder / Cilindro
<i>Tectona grandis</i> L. f.	Cylinder / Cilindro
<i>Swietenia macrophylla</i> King	Cylinder / Cilindro
<i>Cedrela odorata</i> L.	Paraboloid / Paraboloide
<i>Protium neglectum</i> Swart	Paraboloid / Paraboloide
<i>Camptosperma panamense</i> Standl.	Paraboloid / Paraboloide
<i>Tapirira guianensis</i> Aubl.	Paraboloid / Paraboloide
<i>Cariniana pyriformis</i> Miers	Paraboloid / Paraboloide
<i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D. Don	Paraboloid / Paraboloide
<i>Guarea trichilioides</i> L.	Paraboloid / Paraboloide
<i>Couma macrocarpa</i> Barb. Rodr.	Paraboloid / Paraboloide
<i>Pinus</i> sp.	Paraboloid / Paraboloide
<i>Pouteria caimito</i> (Ruiz & Pav.) Radlk.	Cone / Cono
<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) A. DC.	Cone / Cono
<i>Anacardium excelsum</i> (Kunth) Skeels	Cone / Cono
<i>Symphonia globulifera</i> L. f.	Cone / Cono
<i>Dialyanthera acuminata</i> Standl.	Cone / Cono
<i>Otoba</i> sp.	Cone / Cono

and Huber equations, expressed respectively with the following formulas:

$$V = \frac{(g_i + g_{s+i})}{2} * L + e$$

$$V = g_m * L + e$$

$$V = \left(\frac{g_i + 4g_m + g_s}{6} \right) * L + e$$

El método de estimación por cuerpos dendrométricos se utiliza como base en trabajos de investigación, ya que aporta información precisa; sin embargo, la mayoría de las veces se utiliza el método de cubicación rigurosa por ser más sencillo (Melo & Lizarazo, 2017; Romahn de la Vega & Ramírez-Maldonado, 2010).

Cubicación rigurosa

Las secciones del fuste y de ramas en las especies tropicales son cubicadas frecuentemente con las

where,

V = volume (m^3)

g_i = sectional area at one end of the section (m^2)

g_{s+1} = sectional area at the other end of the section (m^2)

g_m = sectional area taken in the middle of the section (m^2)

L = length (m)

e = model error.

These equations are more accurate in volume estimations; furthermore, they are the basis for deriving the merchantable or total volume equations, which range from the simplest to the most complex ones (Biging, 1988; Fraver, Ringvall, & Jonsson, 2007; Tlaxcala-Méndez, De los Santos-Posadas, Hernández-De la Rosa, & López-Ayala, 2016).

The accuracy of the equations depends on the morphological characteristics of the species, since sometimes Smalian's formula provides better estimates (Machado, Pereira, & Ríos, 2003; Marques da Silva-Binoti, Breda-Binoti, Gleriani, & García-Leite, 2009) and sometimes Newton's equation is usually more accurate than Smalian's (Fraver et al., 2007). This can be seen in the work of Akindele and LeMay (2006), who obtained the best volume estimates of tropical trees in Nigeria, Africa, using Newton's formula. Atha, Romero, and Forrest (2005) found no notable differences in estimates with the Smalian and Newton methods, while Biging (1988) had better results with the Newton and Huber equations.

Graphical method

This technique involves measuring diameters at different heights to determine the corresponding cross-sectional areas. These areas are plotted based on the height of volume estimation and a curve joining the points is drawn; subsequently, the curve is measured using a planimeter or computer programs, in order to quantify the area occupied by the solid (Aldana-Pereira, 2008), given by the following formula:

$$V = K * \frac{\pi}{4} * (d_i)^2 + e$$

where,

V = volume (m^3)

K = transformation or scale coefficient

d_i = diameter at a height (m)

e = model error.

Prodan (1961) considers that graphical methods provided the guideline to calculate the regressions analytically and, consequently, the development of the current statistical methods, where the analysis and interpretation of the regression are simpler through the

ecuaciones de Smalian, Newton y Huber, expresadas de manera respectiva con las fórmulas siguientes:

$$V = \frac{(g_i + g_{s+1})}{2} * L + e$$

$$V = g_m * L + e$$

$$V = \left(\frac{g_i + 4g_m + g_s}{6} \right) * L + e$$

donde,

V = volumen (m^3)

g_i = área seccional de un extremo de la sección (m^2)

g_{s+1} = área seccional del otro extremo de la sección (m^2)

g_m = área seccional tomada en el medio de la sección (m^2)

L = longitud (m)

e = error del modelo.

Estas ecuaciones son más precisas en las estimaciones volumétricas; además, son la base para derivar las ecuaciones de volumen comercial o total, que van desde las más simples hasta las más complejas (Biging, 1988; Fraver, Ringvall, & Jonsson, 2007; Tlaxcala-Méndez, De los Santos-Posadas, Hernández-De la Rosa, & López-Ayala, 2016).

La precisión de las ecuaciones depende de las características morfológicas de las especies, ya que en ocasiones la fórmula de Smalian brinda mejores estimaciones (Machado, Pereira, & Ríos, 2003; Marques da Silva-Binoti, Breda-Binoti, Gleriani, & García-Leite, 2009) y a veces la ecuación de Newton suele ser más precisa que la de Smalian (Fraver et al., 2007). Lo anterior se puede comprobar en el trabajo de Akindele y LeMay (2006), quienes obtuvieron las mejores estimaciones de volumen de árboles tropicales en Nigeria, África, con la fórmula de Newton. Atha, Romero, y Forrest (2005) no encontraron diferencias notables en las estimaciones con los métodos de Smalian y Newton, mientras que Biging (1988) tuvo mejores resultados con las ecuaciones de Newton y Huber.

Método gráfico

Esta técnica consiste en la medición de los diámetros a distintas alturas para la determinación de las áreas transversales correspondientes. Estas áreas se grafican en función de la altura de cubicación y se dibuja una curva que siga la tendencia de los puntos; posteriormente, la curva se mide usando un planímetro o programas de cómputo, con el objetivo de cuantificar la superficie ocupada por el sólido (Aldana-Pereira, 2008), dada por la siguiente fórmula:

$$V = K * \frac{\pi}{4} * (d_i)^2 + e$$

use of computer systems. Logarithmic and arithmetic models can be described from the regressions.

Conventional equation systems

Equation systems allow estimating the volume of segments of interest of the tree, such as total stem volume, branch volume or total tree volume outside and inside bark, which can be at individual tree or stand level (Kitikidou, Milios, & Katsogridakis, 2017). The systems are based on regression models (Atha et al., 2005; Callister, England, & Collins, 2013; Da Cunha & Guimarães-Finger, 2009; Gómez-González et al., 2018; Goussanou et al., 2016; Machado et al., 2003; Mayaka, Eba'a-Atyi, & Momo, 2017) known as conventional equations; these can be linear, non-linear or logarithmic, among others. Non-linear equations are the most effective, as they best describe volume trends (Corral-Rivas & Nívar-Chaidez, 2009). In the papers reviewed, it was found that the Schumacher and Hall (1933) equation, followed by Spurr's (1952), are frequently used in tropical species since they adequately represent the estimated data sets with respect to observed ones (Crecente-Campo, Corral-Rivas, Vargas-Larreta, & Wehenkel, 2014). The models for estimating total tree volume are expressed as follows:

$$\begin{array}{ll} \text{Schumacher and Hall} & V = b_0 * d^{b_1} * h^{b_2} + e \\ \text{Spurr} & V = b_0 * d^2 * h + e \\ \text{Cone} & V = b_0 * d^2 + e \end{array}$$

where,

V = volume (m³)

d = diameter at breast height (cm) at 1.30 m above ground level

h = total height (m)

b_i = parameters to be estimated

e = model error.

Through simultaneous equations it is possible to estimate the total volume, by mathematically integrating a volume equation and the cone formula, for scaling the branches (Fang & Bailey, 2001; Özçelik & Göçeri, 2015):

$$V = b_0 * d^{b_1} * h^{b_2} + b_0 * d^2 * h + e$$

Several authors agree that the Schumacher and Hall (1933) function guarantees accurate estimates for different species Cruz-Cobos, De los Santos-Posadas, & Valdez-Lazalde, 2008 (Parresol, Hotvedt, & Cao, 1987; Vargas-Larreta et al., 2017), through ordinary least squares regression fitting techniques and the apparently uncorrelated regression technique, the latter providing significant gains in parameter optimization (Tamarit-Urias, 2013).

donde,

V = volumen (m³)

K = coeficiente de transformación o de escala

d_i = diámetro a una altura (m)

e = error del modelo.

Prodan (1961) considera que los métodos gráficos dieron la pauta para calcular las regresiones analíticamente y, en consecuencia, el desarrollo de los métodos estadísticos actuales, donde el análisis e interpretación de la regresión son más sencillos mediante el uso de sistemas computacionales. A partir de las regresiones se pueden describir modelos logarítmicos y aritméticos.

Sistemas de ecuaciones convencionales

Los sistemas de ecuaciones permiten estimar el volumen de segmentos de interés del arbolado como el volumen rollo total árbol, volumen de ramas o el volumen total árbol con y sin corteza, mismos que pueden ser a nivel de árbol individual o de rodal (Kitikidou, Milios, & Katsogridakis, 2017). Los sistemas se basan en modelos de regresión (Atha et al., 2005; Callister, England, & Collins, 2013; Da Cunha & Guimarães-Finger, 2009; Gómez-González et al., 2018; Goussanou et al., 2016; Machado et al., 2003; Mayaka, Eba'a-Atyi, & Momo, 2017) conocidos como ecuaciones convencionales; estas pueden ser lineales, no lineales o logarítmicas, entre otras. Las ecuaciones no lineales son las más eficaces, ya que describen de mejor forma las tendencias del volumen (Corral-Rivas & Nívar-Chaidez, 2009). En los trabajos revisados se encontró que la ecuación de Schumacher y Hall (1933), seguida de Spurr (1952), son utilizadas con frecuencia en especies tropicales, ya que representan adecuadamente los conjuntos de datos estimados con respecto a los observados (Crecente-Campo, Corral-Rivas, Vargas-Larreta, & Wehenkel, 2014). Los modelos de estimación del volumen rollo total árbol se expresan de la manera siguiente:

$$\begin{array}{ll} \text{Schumacher y Hall} & V = b_0 * d^{b_1} * h^{b_2} + e \\ \text{Spurr} & V = b_0 * d^2 * h + e \\ \text{Cono} & V = b_0 * d^2 + e \end{array}$$

donde,

V = volumen (m³)

d = diámetro normal (cm) a 1.30 m sobre el nivel del suelo

h = altura total (m)

b_i = parámetros a ser estimados

e = error del modelo.

A través de las ecuaciones simultáneas es posible estimar el volumen total, mediante la integración matemática de una ecuación de volumen y la fórmula del cono, para la cubicación de las ramas (Fang & Bailey, 2001; Özçelik & Göçeri, 2015):

Similarly, traditional volume-taper equations have been used, from the most basic (Kozak, Munro, & Smith, 1969) to the most complex, such as segmented models which involve integrating merchantable volume and relative diameter for tropical species (López, Barrios, & Trincado, 2015; Özçelik & Göçeri, 2015; Niño-López, Ramos-Molina, Barrios, & López-Aguirre, 2018).

The Fang, Borders, and Bailey (2000) equation has also been used to estimate volume:

$$V_c = C_1^2 h^{b_1} \left[b_1 r_0 + (I_1 + I_2) + (b_2 - b_1) r_1 + I_2 \right] + e$$

$$C_1 = \sqrt{\frac{\alpha_0 d^{\alpha_1} h^{\alpha_2 - \frac{k}{b_1}}}{b_1(r_0 - r_1) + b_2(r_1 - \alpha_1 r_2) + b_3 \alpha_1 r_2}}$$

$$r_0 = (1 - h_b/h)^{\frac{k}{b_1}}; r_1 = (1 - p_1)^{\frac{k}{b_1}}; r_2 = (1 - p_2)^{\frac{k}{b_2}}$$

where,

V_c = merchantable volume (m^3)

h = total height (m)

h_b = stump height (m)

$k = \pi/40000$

$q = h_b/h$

α_1, b_1, p_1 = parameters to be estimated

e = model error.

All volume models improve in the estimation of their parameters with the mixed effects fitting technique, adding a bivariate formula with fixed and random effects, which allows accurately describing the stem of individual trees (Bueno-López & Bevilacqua, 2012; Kitikidou et al., 2017). This avoids any anomaly of correlation, multicollinearity and inflation of variances, surpassing previous methods in predictive ability (Fang & Bailey, 2001).

Because of this, Melo and Lizarazo (2017) generated a polynomial-type model as an alternative means of estimating both the merchantable and total volume of the standing tree, at different sections and that is flexible enough to model the volume of individual trees and stands:

$$p(x) = \sum_{i=0}^{10} \left[\prod_{k=0}^{10} \frac{\left(\frac{x - kh}{10}\right)}{\left(\frac{ih}{10} - \frac{kh}{10}\right)} \right] \cdot \frac{(x-1.3)}{\left(\frac{ih}{10}-1.3\right)} \frac{di}{2} + \left[\prod_{k=0}^{10} \frac{\left(\frac{x - kh}{10}\right)}{1.3 - \frac{kh}{10}} \right] \cdot \frac{d}{2} + e$$

where,

$p(x)$ = polynomial function

d = diameter at breast height (cm) at 1.30 m above ground level

h = total tree height (m)

di = diameter at a height $ih/10$ (cm)

$$V = b_0 * d^{b_1} * h^{b_2} + b_0 * d^2 * + e$$

Varios autores concuerdan en que la función de Schumacher y Hall (1933) garantiza estimaciones precisas para distintas especies Cruz-Cobos, De los Santos-Posadas, & Valdez-Lazalde, 2008 (Parresol, Hotvedt, & Cao, 1987; Vargas-Larreta et al., 2017), a través de técnicas de ajustes de regresión de mínimos cuadrados ordinarios y la técnica de regresión aparentemente no correlacionada, siendo esta última la que brinda ganancias significativas en la optimización de los parámetros (Tamarit-Urias, 2013).

De igual forma, se han utilizado ecuaciones de volumen-ahusamiento de tipo tradicional, desde lo más básico (Kozak, Munro, & Smith, 1969) hasta lo más complejo como los modelos segmentados, que consisten en la integración del volumen comercial y el diámetro relativo para especies tropicales (López, Barrios, & Trincado, 2015; Özçelik & Göçeri, 2015; Niño-López, Ramos-Molina, Barrios, & López-Aguirre, 2018).

La ecuación de Fang, Borders, y Bailey (2000) también se ha utilizado para estimar volumen:

$$V_c = C_1^2 h^{b_1} \left[b_1 r_0 + (I_1 + I_2) + (b_2 - b_1) r_1 + I_2 \right] + e$$

$$C_1 = \sqrt{\frac{\alpha_0 d^{\alpha_1} h^{\alpha_2 - \frac{k}{b_1}}}{b_1(r_0 - r_1) + b_2(r_1 - \alpha_1 r_2) + b_3 \alpha_1 r_2}}$$

$$r_0 = (1 - h_b/h)^{\frac{k}{b_1}}; r_1 = (1 - p_1)^{\frac{k}{b_1}}; r_2 = (1 - p_2)^{\frac{k}{b_2}}$$

donde,

V_c = volumen comercial (m^3)

h = altura total (m)

h_b = altura del tocón (m)

$k = \pi/40000$

$q = h_b/h$

α_1, b_1, p_1 = parámetros a ser estimados

e = error del modelo.

Todos los modelos de volumen mejoran en la estimación de sus parámetros con la técnica de ajuste de efectos mixtos, añadiendo una fórmula bivariada con efectos fijos y aleatorios, lo cual permite describir el fuste de los árboles individuales de manera precisa (Bueno-López & Bevilacqua, 2012; Kitikidou et al., 2017). Lo anterior evita cualquier anomalía de correlación, multicolinealidad e inflación de varianzas, superando a los métodos anteriores en capacidad de predicción (Fang & Bailey, 2001).

Debido a esto, Melo y Lizarazo (2017) generaron un modelo de tipo polinomial como medio alternativo para estimar el volumen comercial y volumen total del

ih/10 = number of sections drawn on the tree (m)
e = model error.

There is another technique for estimating total volume known as volume ratio function, developed by Burkhart (1977), which allows calculating the volume for different values of diameter or height defined in a simpler way than the taper models for tropical species (Barrios, López, & Nieto, 2014; Gilabert & Paci, 2010; Pece, 1994). Ratio functions provide significant gains to parameters (Hernández-Ramos et al., 2017). Due to the conditions of the growth sites, competition, and other environmental factors, a tree with greater taper has less volume than one with lesser taper having the same diameter at breast height (1.30 m) (Kitikidou et al., 2017). Using these expressions, it is possible to generate volume rates or volume tables of one input, two inputs (Guerra, Soudre, & Chota, 2008) and three inputs (diameter at breast height, height and form factor) for various species, preferably commercial (Aldana-Pereira, 2008), although the three-input ones are not frequently used.

The Cao, Burkhart, and Max (1980) and Burkhart (1977) equations have been frequently used and have provided good estimates for *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden, *E. pellita* F. Muell., *E. urophylla* S. T. Blake, *E. nitens* (H. Deane & Maiden) Maiden, *Swietenia macrophylla* King and *Avicennia germinans* (L.) L., among others (Hernández-Ramos et al., 2017, 2018). These equations are expressed respectively as follows:

$$R_h = 1 + b_0(h-mh) + e$$

$$R_d = 1 + b_0 \left(\frac{d_i^{b_1}}{d^{b_2}} \right) + e$$

where,

R_h = ratio of volume to height (m³)

R_d = ratio of volume to diameter (m³)

mh = merchantable height (m)

h = total height (m)

d = diameter at breast height (cm) at 1.30 m above ground level

d_i = diameter at a height (m)

b_i = parameter to be estimated

e = model error.

Artificial neural networks

The artificial neural network method allows accurately estimating the total volume through diameter, total height, diameters at different heights and volume in different sections. The method provides reliable estimates as well as linear regression techniques, specifically the Schumacher and Hall (1933) equation that has been used in several studies (Marques da Silva

árbol en pie, a diferentes secciones y que es flexible para modelar el volumen de árboles individuales y de rodales:

$$p(x) = \sum_{i=0}^{10} \left[\prod_{k=0}^{10} \left(\frac{x - \frac{kh}{10}}{\frac{ih}{10} - \frac{kh}{10}} \right) \right] \cdot \frac{(x-1.3)}{(\frac{ih}{10}-1.3)} \cdot \frac{d_i}{2} + \left[\prod_{k=0}^{10} \left(\frac{x - \frac{kh}{10}}{1.3 - \frac{kh}{10}} \right) \right] \cdot \frac{d}{2} + e$$

donde,

p(x) = función de polinomio

d = diámetro normal (cm) a 1.30 m sobre el nivel del suelo

h = altura total del árbol (m)

d_i = diámetro a una altura ih/10 (cm)

ih/10 = número de secciones trazadas sobre el árbol (m)

e = error del modelo

Existe otra técnica de estimación de volumen total conocida como función de razón volumétrica, desarrollada por Burkhart (1977), la cual permite calcular el volumen para distintos valores de diámetro o altura definida de una forma más simple que los modelos de ahusamiento para especies tropicales (Barrios, López, & Nieto, 2014; Gilabert & Paci, 2010; Pece, 1994). Las funciones de razón proporcionan ganancias significativas a los parámetros (Hernández-Ramos et al., 2017). Debido a las condiciones de los sitios de crecimiento, competencia y otros factores ambientales, un árbol con mayor ahusamiento tiene menos volumen que uno con menor ahusamiento teniendo el mismo diámetro normal (1.30 m) (Kitikidou et al., 2017). Mediante estas expresiones es posible generar tarifas volumétricas o tablas de volumen de una entrada, dos entradas (Guerra, Soudre, & Chota, 2008) y tres entradas (diámetro normal, altura y factor de forma) para varias especies, preferentemente comerciales (Aldana-Pereira, 2008), aunque las de tres entradas no se utilizan con frecuencia.

Las ecuaciones de Cao, Burkhart, y Max (1980) y Burkhart (1977) se han utilizado con frecuencia y han proporcionado buenas estimaciones para *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden, *E. pellita* F. Muell., *E. urophylla* S. T. Blake, *E. nitens* (H. Deane & Maiden) Maiden, *Swietenia macrophylla* King y *Avicennia germinans* (L.) L., entre otras (Hernández-Ramos et al., 2017, 2018). Dichas ecuaciones se expresan respectivamente de la manera siguiente:

$$R_h = 1 + b_0(h-mh) + e$$

$$R_d = 1 + b_0 \left(\frac{d_i^{b_1}}{d^{b_2}} \right) + e$$

donde,

R_h = razón de volumen con altura (m³)

R_d = razón de volumen con diámetro (m³)

Binoti et al., 2009; Mena-Frau & Montecinos-Guajardo, 2006); however, in some studies, the Levenberg-Marquardt neural models have outperformed nonlinear equations in terms of mean error and fit index (Özçelik, Diamantopoulou, & Brooks, 2014). The advantage of the method is that it requires few measurements of the diameter at different heights of representative trees, which consequently reduces costs without losing accuracy in estimating the merchantable or total volume outside and inside bark (Marques da Silva-Binoti et al., 2014).

Criteria for the selection of the analyzed techniques

Based on the review, the accuracy of techniques such as the xylometer, Pressler and standing tree volume procedures, as well as dendrometric bodies, rigorous volume estimation and the graphical method, depends on the good use of equipment in the field work, the species, geometric shape of the tree and the personnel trained to analyze the data; these are criteria that guarantee the quality of the information. In the conventional and neural network equations, most researchers selected the best models using the following criteria: the coefficient of determination (R^2) or adjusted coefficient of determination (R^2_{adj}), which should be close to 1, and the root mean square error (RMSE), which should tend to zero (Guzmán-Santiago et al., 2019). On some occasions they also considered bias, which holds that the average of the residuals should be equal to zero, thus making the estimator centered or unbiased; the Durbin-Watson test, which should be equal to 2 to indicate that there is no autocorrelation; and the Akaike and Bayesian information criteria that allow choosing the model with the lowest value (Del Carmen-García, Castellana, Rapelli, Koegel, & Catalano, 2014).

To reaffirm the selection of the models, some authors prefer to make a graphical analysis of the residuals against the predicted values, since this procedure is considered one of the most efficient ways of evaluating the fit capacity of a model (Martínez-Rodríguez, 2005).

Conclusions

The structures of the equations for estimating volume range from the simplest to the most complex. In this case, since we are dealing with biological material (trees), it is not possible to generate the data of interest accurately in a regression, so there are no better models than others, since each one is fitted to the researcher's needs. Nevertheless, the xylometer technique is considered the most accurate to estimate volume, since it is used directly; however, the application of this technique is difficult in large logs. On the other hand, the rigorous volume estimation

hc = altura comercial (m)

h = altura total (m)

d = diámetro normal (cm) a 1.30 m sobre el nivel del suelo

di = diámetro a una altura (m)

b_1 = parámetro a ser estimado

e = error del modelo.

Redes neuronales artificiales

El método de redes neuronales artificiales permite estimar el volumen total en forma precisa a través del diámetro, altura total, diámetros a distintas alturas y volumen en diferentes secciones. El método brinda estimaciones confiables al igual que las técnicas de regresión lineal, en específico la ecuación de Schumacher y Hall (1933) que ha sido usada en varios estudios (Marques da Silva-Binoti et al., 2009; Mena-Frau & Montecinos-Guajardo, 2006); sin embargo, en algunos estudios, los modelos neuronales de Levenberg-Marquardt han superado las ecuaciones no lineales en términos de error medio e índice de ajustes (Özçelik, Diamantopoulou, & Brooks, 2014). La ventaja del método es que requiere pocas mediciones del diámetro a diferentes alturas de árboles representativos, lo que en consecuencia reduce costos sin perder precisión en la estimación del volumen comercial o total con y sin corteza (Marques da Silva-Binoti et al., 2014).

Criterios para la selección de las técnicas analizadas

Con base en la revisión, la precisión de técnicas como el xilómetro, Pressler y de cubicación en pie, cuerpos dendrométricos, cubicación rigurosa y el método gráfico, depende del buen uso de los equipos en el trabajo de campo, la especie, forma geométrica del arbolado y del personal capacitado para analizar los datos; estos son criterios que garantizan la calidad de la información. En las ecuaciones convencionales y de redes neuronales, la mayoría de los investigadores seleccionaron los mejores modelos mediante los criterios siguientes: el coeficiente de determinación (R^2) o coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) que debe ser cercano a 1 y la raíz del error medio cuadrático (REMC) que debe tender a cero (Guzmán-Santiago et al., 2019). En algunas ocasiones también consideraron el sesgo, el cual sostiene que el promedio de los residuales sea igual a cero, con lo que se logra que el estimador sea centrado o insesgado; la prueba de Durbin-Watson que debe ser igual a 2 para indicar que no existe autocorrelación; y los criterios de información de Akaike y de información bayesiano que permiten elegir el modelo que tenga menor valor (Del Carmen-García, Castellana, Rapelli, Koegel, & Catalano, 2014).

Para reaffirmar la selección de los modelos, algunos autores prefieren hacer un análisis gráfico de los

technique is the most used in the tropics to obtain the volume of the individual sections, which are fitted by the conventional or neural network equations to estimate the total volume; the latter generate slightly superior results.

End of English version

References / Referencias

- Aguilar, R. C., Sequeira, G. A., & Peralta, T. E. (2017). Factor de forma para la *Tectona grandis* L. f., empresa MLR-Forestal, Siuna, Costa Caribe Norte de Nicaragua. *Ciencia e Interculturalidad*, 21(2), 74–84. doi: 10.5377/rci.v21i2.5602
- Akindele, S. O., & LeMay, V. M. (2006). Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rain forest area of Nigeria. *Forest Ecology and Management*, 226(1), 41–48. doi: 10.1016/j.foreco.2006.01.022
- Aldana-Pereira, C. E. (2008). *Medición forestal*. Cuba: Ed. Félix Varela. Retrieved from <http://enciclopediaforestal.cubava.cu/180/>
- Alvis-Gordo, J. F. (2009). Análisis estructural de un bosque natural localizado en zona rural del municipio de Popayán. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 7(1), 115–122. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v7n1/v7n1a13.pdf>
- Atha, D. E., Romero, L., & Forrest, T. (2005). Bark volume determination of *Bursera simaruba* in Belize. *Caribbean Journal of Science*, 41(4), 843–848. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/237298331_Bark_Volume_Determination_of_Bursera_simaruba_in_Belize
- Baltar, F., & Gorjup, M. T. (2012). Muestreo mixto online: Una aplicación en poblaciones ocultas. *Intangible Capital*, 8(1), 123–149. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2099/12244>
- Barrios, A., López, A. M., & Nieto, V. (2014). Predicción de volúmenes comerciales de *Eucalyptus grandis* a través de modelos de volumen total y de razón. *Colombia Forestal*, 17(2), 137–149. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=423939663002>
- Biging, G. S. (1988). Estimating the accuracy of volume equations using taper equations of stem profile. *Canadian Journal of Forest Research*, 18(8), 1002–1007. doi: 10.1139/x88-153
- Bueno-López, S. W., & Bevilacqua, E. (2012). Nonlinear mixed model approaches to estimating merchantable bole volume for *Pinus occidentalis*. *iForest-Biogeoeciences and Forestry*, 5(5), 247. doi:10.3832/ifer0630-005
- Burkhart, H. E. (1977). Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit. *Southern Journal of Applied Forestry*, 1(2), 7–9. doi: 10.1093/sjaf/1.2.7
- Callister, A. N., England, N., & Collins, S. (2013). Predicted genetic gain and realised gain in stand volume

residuos frente a los valores predichos, ya que este procedimiento se considera una de las maneras más eficientes de evaluar la capacidad de ajuste de un modelo (Martínez-Rodríguez, 2005).

Conclusiones

Las estructuras de las ecuaciones para estimar volumen van desde lo más simple hasta los más complejo. En este caso, al tratarse de material biológico (árboles), no es posible generar los datos de interés con exactitud en una regresión, por lo que no existen modelos mejores que otros, ya que cada uno se ajusta a las necesidades del investigador. No obstante, la técnica del xilómetro se considera la más precisa para estimar el volumen, ya que su uso es de manera directa; sin embargo, la aplicación de esta técnica se dificulta en trozas de grandes dimensiones. Por otra parte, la técnica de cubicación rigurosa es la más utilizada en los trópicos para obtener el volumen de las secciones, las cuales son ajustadas por las ecuaciones de tipo convencional o de redes neuronales para estimar el volumen total; estas últimas generan resultados ligeramente superiores.

Fin de la versión en español

- of *Eucalyptus globulus*. *Tree Genetics & Genomes*, 9(2), 361–375. doi 10.1007/s11295-012-0558-8
- Cancino-Cancino, J. O. (2012). *Dendrometría básica*. Chile: Universidad de Concepción.
- Cao, Q. V., Burkhart, H. E., & Max, T. A. (1980). Evaluation of two methods for cubic-volume prediction of loblolly pine to any merchantable limit. *Forest Science*, 26(1), 71–80. doi: 10.1093/forestscience/26.1.71
- Corral-Rivas, S., & Návar-Cháidez, J. D. (2009). Comparación de técnicas de estimación de volumen fustal total para cinco especies de pino de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(1), 5–13. Retrieved from https://www.chapingo.mx/revistas/forestales/contenido.php?seccion=numero&id_revista_numero=39
- Costas, R., Veran, N., Lorán, D., López, L., Fosco, I., & González, J. (2006). Funciones de volumen para especies de bosque secundario de La Reserva Guaraní. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 38(2). Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382838559006>
- Crecente-Campo, F., Corral-Rivas, J., Vargas-Larreta, B., & Wehenkel, C. (2014). Can random components explain differences in the height–diameter relationship in mixed uneven-aged stands? *Annals of Forest Science*, 71(1), 51–70. doi: 10.1007/s13595-013-0332-6
- Cruz-Cobos, F., De los Santos-Posadas, H. M., & Valdez-Lazalde, J. R. (2008). Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia*, 42(4), 473–485. Retrieved from

- http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S140531952008000400010&script=sci_arttext
- Cruz-Cobos, F., Mendía-Santana, R., Jiménez-Flores, A. A., Nájera-Luna, J. A., & Cruz-García, F. (2016). Ecuaciones de volumen para *Arbutus* spp. (madroño) en la región de Pueblo Nuevo, Durango. *Investigación y Ciencia*, 24(68), 41–47. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67448742006>
- Da Cunha, T. A., & Guimarães-Finger, C. A. (2009). Modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza de árboles de *Pinus taeda* L. en el sur de Brasil. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 6(16), 1–15. Retrieved from <http://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/400>
- De Azevêdo, T. K., Paes, J. B., Calegari, L., & Do Nascimento, J. W. (2014). Relações entre volume e massa da madeira e casca de jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*). *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 9(1), 97–102. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=119030125017>
- Del Carmen-García, M., Castellana, N., Rapelli, C., Koegel, L., & Catalano, M. (2014). Criterios de información y predictivos para la selección de un modelo lineal mixto. *SaberEs*, 6, 61–76. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5515546>
- Del Rio, M., Montes, F., Cañellas, I., & Montero, G. (2003). Revisión: Índices de diversidad estructural en masas forestales. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 12(1), 159–176. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Miren_Rio2/publication/28061992
- Diéguez-Aranda, U., Barrio-Anta, M., Castedo-Dorado, F., Ruiz-González, A. D., Álvarez-Taboada, M. F., Álvarez-González, J. G., ...Rojo-Alboreca, A. (2003). *Dendrometría*. Madrid, España: Editorial Mundiprensa.
- Diéguez-Aranda, U., Rojo-Alboreca, A., Castedo-Dorado, F., Álvarez-González, J. G., Barrio-Anta, M., Crecente-Campo, F., ...Sánchez-Rodríguez, F. (2009). *Herramientas silvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia*. Galicia, España: Dirección Xeral de Montes, Consellería de Medio Rural.
- El-Juhany, L. I., Aref, I. M., & El-Wakeel, A. O. (2002). Evaluation of above-ground biomass and stem volume of three Casuarina species grown in the central region of Saudi Arabia. *Emirates Journal of Agriculture Science*, 14(1), 08–13. doi: 10.9755/ejfa.v13i1.4980
- Fang, Z., & Bailey, R. L. (2001). Nonlinear mixed effects modeling for slash pine dominant height growth following intensive silvicultural treatments. *Forest Science*, 47(3), 287–300. doi: 10.1093/forestscience/47.3.287
- Fang, Z., Borders, B. E., & Bailey, R. L. (2000). Compatible volume taper models for loblolly and slash pine based on system with segmented-stem form factors. *Forest Science*, 46(1), 1–12. doi: 10.1093/forestscience/46.1.1
- Figueiredo-Filho, A., & Budant-Schaaf, L. (1999). Comparison between predicted volumes estimated by taper equations and true volumes obtained by the water displacement technique (xylometer). *Canadian Journal of Forest Research*, 29(4), 451–461. doi: 10.1139/x99-013
- Fraver, S., Ringvall, A., & Jonsson, B. G. (2007). Refining volume estimates of down woody debris. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(3), 627–633. doi:10.1139/X06-269
- Gilabert, H., & Paci, C. (2010). An assessment of volume-ratio functions for *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in Chile. *Ciencia e Investigación Agraria*, 37(1), 5–15. doi: 10.7764/rcia.v37i1.180
- Gómez-González, J. P., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P., & Ramírez-Valverde, G. (2018). Ecuaciones de volumen para estimar la producción maderable de *Hevea brasiliensis* Müell Arg. en plantaciones de etapas adulta y vejez. *Madera y Bosques*, 24(2), 2–18. doi: 10.21829/myb.2018.2421867
- Goussanou, C. A., Guendehou S., Assogbadjo, A. E., Kaire, M., Sinsin, B., & Cuni-Sánchez, A. (2016). Specific and generic stem biomass and volume models of tree species in a West African tropical semi-deciduous forest. *Silva Fennica*, 50(2), id 1474. doi: 10.14214/sf.1474
- Guariguata, M. R., García-Fernández, C., Nasi, R., Sheil, D., Herrero-Jáuregui, C., Cronkleton, P., ...Ingram, V. (2009). *Hacia un manejo múltiple en bosques tropicales: Consideraciones sobre la compatibilidad del manejo de madera y productos forestales no maderables*. Indonesia: CIFOR. Retrieved from http://www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/BGuariguata0901.pdf
- Guerra, W., Soudre, M., & Chota, M. (2008). Tabla de volumen comercial de bolaina blanca (*Guazuma crinita* Mart.) de las plantaciones experimentales de Alexander Von Humboldt, Ucayali, Perú. *Folia Amazónica*, 17(1-2), 47–58. doi: 10.24841/fa.v17i1-2.266
- Guzmán-Santiago, J. C., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Vargas-Larreta, B., ...De los Santos-Posada, H. M. (2019). Relación altura-diámetro para *Abies religiosa* Kunth Schltld. & Cham. en el centro y sur de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(52), 100–120. doi: 10.29298/rmcf.v10i52.483
- Hazard, J. W., & Berger, J. M. (1972). Volume tables vs. dendrometers for forest surveys. *Journal of Forestry*, 70(4), 216–219. doi:10.1093/jof/70.4.216
- Hernández-Ramos, J., Hernández-Ramos, A., García-Cuevas, X., Tamarit-Urias, J. C., Martínez-Ángel, L., & García-Magaña, J. (2018). Ecuaciones de volumen total y de razón para estimar el volumen comercial de *Swietenia macrophylla* King. *Colombia Forestal*, 21(1), 34–46. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=423954588003>
- Hernández-Ramos, J., Santos-Posadas, H. M., Valdéz-Lazalde, J. R., Tamarit-Urias, J. C., Ángeles-Pérez, G., Hernández-Ramos, A., ...Peduzzi, A. (2017). Estimación del volumen comercial en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* con modelos de volumen total y de razón. *Agrociencia*, 51(5), 561–580. Retrieved from

- <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v51n5/1405-3195-agro-51-05-00561-en.pdf>
- Kitikidou, K., Milios, E., & Katsogridakis, S. (2017). Meta-analysis for the volume of *Pinus sylvestris* in Europe. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(1), 23–34. doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.11.052
- Kozak, A., Munro, D., & Smith, J. H. (1969). Taper functions and their application in forest inventory. *The Forestry Chronicle*, 45(4), 278–283. doi: 10.5558/tfc45278-4
- López, A., Barrios, A., & Trincado, G. (2015). Modelos de perfiles fustales con una estructura de error autorregresiva para plantaciones de *Eucalyptus tereticornis* en Colombia. *Madera y Bosques*, 21(2), 73–88. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712015000200005
- Machado, C., Pereira, A., & Ríos, N. A. (2003). Tabla de volumen para *Buchenavia capitata*, Vahl. *Quebracho*, 10, 76–82. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48101009>
- Marques da Silva-Binoti, M. L., Breda-Binoti, D. H., Gleriani, J. M., & García-Leite, H. (2009). Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. *Revista Árvore*, 33(6), 1133–1139. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48815855015>
- Marques da Silva-Binoti, M. L., Breda-Binoti, D. H., García-Leite, H., Ribeiro-García, S., Ferreira, M., Rode, R., ... Araújo-Lopes da Silva, A. (2014). Redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores. *Revista Árvore*, 38(2), 283–287. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48831289008>
- Martin, A. J. (1984). Testing volume equation accuracy with water displacement techniques. *Forest Science*, 30(1), 41–50. doi:10.1093/forestscience/30.1.41
- Martínez-Rodríguez, E. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense*, 38, 315–331.
- Martínez-Tobón, C. D., Aunta-Duarte, J. E., & Valero-Fandiño, J. A. (2013). Aplicación de datos LiDAR en la estimación del volumen forestal en el parque metropolitano Bosque San Carlos. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23(1), 1–21. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91129721001>
- Mayaka, T. B., Eba'a-Atyi, R., & Momo, S. T. (2017). Construction of multispecies allometric equations: Is there a statistical palliative for destructive tree sampling? *Journal of Tropical Forest Science*, 29(3), 282–296. doi:10.26525/jtfs2017.29.3.282296
- Melo, O. R., & Lizarazo, I. (2017). Estimación del volumen de madera en árboles mediante polinomio único de ahusamiento. *Colombia Forestal*, 20(1), 52–62. doi: 10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.1.a05
- Mena-Frau, C., & Montecinos-Guajardo, R. (2006). Comparación de redes neuronales y regresión lineal para estimar productividad de sitio en plantaciones forestales, utilizando geomática. *Bosque*, 27(1), 35–43. Retrieved from <http://mingaonline.uach.cl/scielo.php>
- Michela, J. F., Kees, S. M., & Skoko, J. J. (2018). Coeficiente mórfico para estimación de volumen comercial de *Prosopis alba* Griseb. en Chaco, Argentina. *Multequina: Latin American Journal of Natural Resources*, 27, 1–12. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=42857911002>
- Moras, G., & Vallejos, O. S. (2013). Tablas de volumen para árboles individuales de *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* cultivados en la región sur de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 17(2), 11–24. Retrieved from <http://www.scielo.edu.uy/pdf/agro/v17n2/v17n2a02.pdf>
- Niño-López, G. S., Ramos-Molina, P. A., Barrios, A., & López-Aguirre, A. M. (2018). Modelos compatibles de ahusamiento-volumen para árboles de *Gmelina arborea* Roxb. en el Alto Magdalena, Colombia. *Colombia Forestal*, 21(2), 174–187. doi: 10.14483/2256201X.12249
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1980). *Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos: predicción del rendimiento*. Italy: Author. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-ap354s.pdf>
- Özçelik, R., Diamantopoulou, M. J., & Brooks, J. R. (2014). The use of tree crown variables in over-bark diameter and volume prediction models. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 7(3), 132–139. doi: 10.3832/ifer0878-007
- Özçelik, R., & Göçeri, M. F. (2015). Compatible merchantable stem volume and taper equations for *Eucalyptus* sp. plantations in the Eastern Mediterranean Region of Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 39(6), 851–863. doi:10.3906/tar-1501-27
- Parresol, B. R., Hotvedt, J. E., & Cao, Q. V. (1987). A volume and taper prediction system for bald clonal grouping. *Canadian Journal of Forest Research*, 17, 250–259. Retrieved from <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/1392>
- Pece, R. M. (1994). Tabla de volumen comercial para *Eucalyptus pellita* utilizando el método de la razón volumétrica. *Quebracho*, 2, 54–63. Retrieved from http://fcf.unse.edu.ar/archivos/quebracho/q2_07.pdf
- Prodan, M. (1961). *Forstliche Biometrie*. Munchen, Bonn, Wien: BLV Verlagsgesellschaft.
- Rojas-Gutiérrez, A. M. (1977). *Dasometría práctica*. Ibagué, Colombia: Universidad de Tolima.
- Romahn de la Vega, C. F., & Ramírez-Maldonado, H. (2010). Dendrometría. Retrieved from <http://dicifo.chapingo.mx/pdf/publicaciones/dendrometria.pdf>
- Schumacher, F. X., & Hall, F. S. (1933). Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal Agriculture Research*, 47(9), 719–734. Retrieved from <https://ci.nii.ac.jp/naid/10029733560/>
- Spurr, S. H. (1952). *Forest inventory*. New York, USA: John Wiley and Sons.
- Tamarit-Urias, J. C. (2013). *Cubicación, crecimiento y rendimiento madera e inventario operativo para Tectona grandis en el sureste de México*. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México.
- Tewari, V. P., Mariswamy, K. M., & Arunkumar, A. N. (2013). Total and merchantable volume equations for *Tectona*

- grandis* Linn. f. plantations in Karnataka, India. *Journal of Sustainable Forestry*, 32(3), 213–229. doi: 10.1080/10549811.2013.762187
- Tlaxcala-Méndez, R. M., De los Santos-Posadas, H. M., Hernández-De la Rosa, P., & López-Ayala, J. L. (2016). Variación del factor de forma y el ahusamiento en procedencias de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.). *Agrociencia*, 50(1), 89–15. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952016000100089&lng=es&tln g=es
- Ugalde, L. A. (1981). *Conceptos básicos de dasometría*. Turriaba, Costa Rica: CATIE.
- Urbano, E., Machado, S. D. A., Figueiredo-Filho, A., Sanquetta, C. R., & Zea-Camaño, J. D. (2018). Modelación del volumen de rodal para especies secundarias en bosques nativos de *Mimosa scabrella* en la región metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil. *Bosque*, 39(2), 227–237. doi: 10.4067/S0717-92002018000200227
- Valencia-Manzo, S., Trujillo-Gómez, S. A., Cornejo-Oviedo, E. H., Flores-López, C., Díaz-Balderas, J. A., & González-López, H. D. (2017). Ecuación de Pressler para estimar volumen de fuste en árboles de *Pinus patula* Schl. et Cham. var. *longepedunculata* Look. *Foresta Veracruzana*, 19(1), 29–34. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49752128005>
- Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J., Aguirre-Calderón, O. A., López-Martínez, J. O., De los Santos-Posadas, H. M., Zamudio-Sánchez, F. J., ... Aguirre-Calderón, C. G. (2017). SiBiFor: Forest Biometric System for forest management in Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(3), 437–455. doi:10.5154/r.rchscfa.2017.06.040
- Vásquez-Bautista, N., Zamudio-Sánchez, F. J., Alvarado-Segura, A. A., & Romo-Lozano, J. L. (2016). Forest biometric models in Hidalgo, Mexico: State of the art. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(3), 351–367. doi: 10.5154/r.rchscfa.2015.09.043
- Williams, M. S., Cormier, K. L., Briggs, R. G., & Martínez, D. L. (1999). Evaluation of the Barr & Stroud FP15 and Criterion 400 laser dendrometers for measuring upper stem diameters and heights. *Forest Science*, 45(1), 53–61. doi:10.1093/forestscience/45.1.53