



Artículo / Article

Ecuaciones para predecir el diámetro normal en función del diámetro del tocón para *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham.

Equations to predict the normal diameter based on the stump diameter of *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham.

Xavier García-Cuevas¹, Victorino Herrera-Ávila², Jonathan Hernández-Ramos¹,
José de Jesús García-Magaña² y Adrián Hernández Ramos³

Resumen

En las zonas forestales bajo aprovechamiento se requiere del diámetro normal (dn) para calcular los volúmenes removidos. El dn se estima en función del diámetro del tocón (dt), mediante una ecuación de regresión. A partir de una ecuación que dependa del dn o del dt y una tarifa de volúmenes se estima el volumen (v). El objetivo fue desarrollar ecuaciones predictivas del diámetro normal en función del diámetro del tocón para *Abies religiosa*, en Tancítaro, Michoacán. Se tomaron 1 083 pares de datos de dn - dt , de diferentes categorías diamétricas. Para el ajuste se usó PROC MODEL y la selección de la mejor ecuación se hizo con base en el Cuadrado Medio del Error (CME), la Raíz del Cuadrado Medio del Error (RCME), nivel de significancia de los estimadores ($Pr > |t|$) y el Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), además se analizó la distribución de residuales. El cumplimiento de los supuestos de la regresión, se verificó con la prueba de Shapiro Wilk y para la precisión de las predicciones se estimó el sesgo (\bar{E}). Las ecuaciones obtenidas son: $d = 1.11149 + 0.92267 dt$, $d = 0.173763 dt \left(\frac{1.3}{dt}\right)^{1048363}$, y $d = 1.11149 + 0.92267 (0.92267 dt)$. Los estadísticos CME=2.216, 2.093 y 2.216, la R^2_{adj} =0.9938, 0.9942 y 0.9938, la significancia de los parámetros $Pr > |t| < 0.0001$, la prueba de normalidad de Shapiro Wilk, así como su capacidad predictiva, permite inferir que las ecuaciones son válidas para predecir el dn en función del dt . Las expresiones que se ajustaron indican una tendencia lineal entre las variables dn y dt .

Palabras clave: *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham., alometría, manejo, predicción, regresión, volumen.

Abstract

In forest areas under exploitation, we require the normal diameter (DBH) to estimate the removed volume. The DBH is estimated based on the stump diameter (SD) by regression and a volume equation. With support from an equation that depends on the ND or the SD, the volume (V) is estimated. The aim was to develop predictive equations of the normal diameter depending on the diameter of the stump for *Abies religiosa* in Tancítaro, Michoacán. 1 083 pairs of data of SD-ND of different diameter categories were taken. For setting PROC MODEL was used and the selection of the best equation was based on the Mean Square Error (MSE), the Root Mean Square Error (RMSE), significance level of estimators ($Pr > |t|$) and the fitted coefficient of determination (R^2_{adj}) and the residual distribution. To verify compliance with the assumptions of regression, Shapiro Wilk test was used and for the prediction, accuracy was estimated bias (\bar{E}). The equations obtained are: $d = 1.11149 + 0.92267 dt$, $d = 0.173763 dt \left(\frac{1.3}{dt}\right)^{1048363}$, and $d = 1.11149 + 0.92267 (0.92267 dt)$. Based on the SME = 2.216, 2.093 and 2.216, the R^2_{adj} = 0.9938, 0.9942 and 0.9938, the significance of the parameters $Pr > |t| < 0.0001$, normality test of Shapiro Wilk and its predictive capacity, it follows that the equations are valid for predicting the function of ND-SD. The fitted models indicate a linear trend between DBH and SD.

Key words: *Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham., allometry, management, regression, prediction, volume.

Fecha de recepción/Reception date: 23 de noviembre de 2015; Fecha de aceptación/Acceptance date: 15 de julio de 2016.

¹ INIFAP. Centro de Investigación Sureste. Campo Experimental Chetumal. México. Correo-e: xavier_garciacuevas@yahoo.com.mx

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

³ Posgrado Forestal. Colegio de Postgraduados. México.

Introducción

El diámetro normal (dn) es indispensable para caracterizar la estructura de la masa arbórea original y a partir de ella, estimar los volúmenes extraídos (v) después de realizar las cortas (López *et al.*, 2003; Pompa-García *et al.*, 2011) e incluso la biomasa (B), o la cantidad de carbono secuestrado (C) (Hernández, 2016).

Lo anterior, se logra a través de modelos alométricos que estimen el diámetro normal (dn), en función del diámetro del tocón (dt) y una tarifa de volumen que dependa del diámetro normal (Diéguez *et al.*, 2003), o del diámetro del tocón.

La estimación del diámetro normal (dn) en función del diámetro del tocón (dt), mediante procesos de regresión puede usarse para calcular los volúmenes (Bava y López, 2006; Pompa-García *et al.*, 2011).

Ejemplo son el cálculo de diámetro normal (dn), con respecto al volumen (v), biomasa (B), índice de área foliar (IAF) o carbono (C) (Martin *et al.*, 1998); de las relaciones de dn con la altura total (h) (Zeide y Vanderschaaf, 2002); las funciones de dn-h para los estudios de crecimiento (Delgado *et al.*, 2005), o la relación funcional entre el diámetro de tocón (dt) con el dn, h y v (Bava y López, 2006; Martínez-López y Acosta-Ramos, 2014).

Conocer la relación entre dt y dn puede ser referencia de predicciones en variables como h (Martínez-López y Acosta-Ramos, 2014), que posteriormente se toman como base para realizar estimaciones de volumen (Aigbe *et al.*, 2012).

Dado que no siempre se cuenta con las dimensiones del dn, para realizar cálculos de volumen, por ejemplo; cuando ocurren talas o desmontes ilegales, en la cuantificación de los aprovechamientos en grandes extensiones, en la evaluación de las prácticas silvícolas aplicadas en el bosque después del aprovechamiento o simplemente por extravío de la información del inventario; conocer la relación entre dn y el dt es de gran utilidad para cuantificar el volumen removido (Benítez-Naranjo *et al.*, 2004).

La relación alométrica entre el diámetro del tocón y el diámetro normal es una herramienta para los administradores de los recursos forestales y evaluadores de las prácticas de aprovechamientos aplicadas en los bosques; por lo cual, se planteó el objetivo de desarrollar ecuaciones predictivas del diámetro normal en función del diámetro del tocón para *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham., en Tancítaro, Michoacán.

Introduction

The normal diameter (DN) is essential for characterizing the structure of the original mass and, based on it, for estimating the extracted volumes (V) after prunings are performed in the forest masses (López *et al.*, 2001; Pompa-García *et al.*, 2011), and even the biomass (B) or the amount of sequestered carbon (C), (Hernández, 2016).

This is achieved through allometric models estimating the normal diameter (ND) in relation to the stump diameter (SD) and the volume rate based on the normal diameter (Diéguez *et al.*, 2003) or on the stump diameter.

The estimation of the normal diameter (DN) with regard to the stump diameter (SD) can be carried out through regression processes and thus be used to calculate the volumes (Bava and López, 2006; Pompa-García *et al.*, 2011).

Examples of these studies are the estimations of the normal diameter (ND) with regard to the volume (V), biomass (B), leaf area index (LAI) or carbon (C) (Martin *et al.*, 1998), the ratio of the ND to the total height (H) (Zeide and Vanderschaaf, 2002), the functions of ND-H for growth studies (Delgado *et al.*, 2005) or the functional relationship between the stump diameter (SD) and the ND, H and V (Bava and López, 2006; Martínez-López and Acosta-Ramos, 2014).

Knowledge of the ratio of the SD to the ND can be reference for predictions of such variables as H (Martínez-López and Acosta, 2014) on which volume estimations can subsequently be based (Aigbe *et al.*, 2012).

Because the ND size is not always available to estimate the volume, for example, when illegal loggings or clearings occur, in the quantification of exploitations in large areas, in the evaluation of the silvicultural practices applied in the forest after harvesting, or simply due to loss of inventory information, knowledge of the ratio of the ND to the SD is very helpful for quantifying the removed volume (Benítez-Naranjo *et al.*, 2004).

The allometric relationship between the stump diameter and the normal diameter is a useful tool for the managers of forest resources and the evaluators of the land-use practices applied in forests. This fact has led to proposing the development of predictive equations of the normal diameter based on the stump diameter of *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. trees in Tancítaro, Michoacán, as an objective.



Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de investigación se encuentra dentro de la zona de Protección de Flora y Fauna (APFF) Pico de Tancítaro, en el estado de Michoacán de Ocampo; se ubica en los municipios Tancítaro, Peribán, Uruapan y Nuevo Parangaricutiro; en un intervalo altitudinal de 2 200 a 3 850 m, y cuenta con una superficie de 23405-92-09.55 ha, según su decreto de creación. Las coordenadas extremas del APFF son 19°31'09.83"-19°20'30.61" N. y 102°13'14.34" a 102°24'07.42" O.

Particularmente, el predio se ubica en la Provincia Eje Neovolcánico, de la Subprovincia Neovolcánica Tarasca (X9) y Estrato Volcán (S1) (Inegi, 1985).

El clima predominante es del tipo C(m)(w), templado subhúmedo, con un verano cálido subhúmedo, y abundantes lluvias. Precipitación media anual de 1 000-1 200 mm y temperatura media anual de 10-12 °C (García, 1983). La unidad dominante de suelo es Andosol ócrico, y con textura gruesa (To+1), son suelos de áreas con actividad volcánica reciente, sustentan vegetación de bosque de pino, abeto y encino, principalmente (Inegi, 1985).

Datos

En una superficie de 110 ha (Figura 1), se recolectó una muestra de 1 083 pares de datos de diámetro normal-diámetro del tocón en árboles completamente sanos, completos, con un solo fuste, lo más recto posible, y que no estuvieron aislados, ni a las orillas del rodal; en el cual se midió arbolado de 2.5 a 80 cm de diámetro normal (d); la medida se consideró a la altura de 1.30 m así como la altura total mediante un clinómetro marca *Suunto* en 107 sitios de muestreo de forma circular (500 m²), distribuidos en forma sistemática a 100 m entre sitios y 100 m entre líneas de muestreo, que se delimitaron mediante cuerda compensada de pendiente.

Variabes

Se registraron las siguientes variables: especie, número de árbol, diámetro normal (d), altura total (h), condición, daños y dominancia. En cada sitio se determinó la edad y tiempo de paso a tres árboles. Mediante la medición directa de 1 083 pares de datos de d, medido a 1.3 m; y de dt medido a 0.3 m, se obtuvieron datos de diferentes categorías diamétricas y condiciones de crecimiento.

Materials and Methods

Study area

The research area is located within the *Zona de Protección de Flora y Fauna Pico de Tancítaro* (Tancítaro Peak Flora and Fauna Protection Area) (FFPA), in the state of Michoacán de Ocampo, specifically in Tancítaro, Peribán, Uruapan and Nuevo Parangaricutiro municipalities. It has an altitudinal range between 2 200 and 3 850 masl and a surface of 23405-92-09.55 ha according to its creation decree. The extreme coordinates of the FFPA are 19°31'09.83" to 19°20'30.61" N and 102°13'14.34" to 102°24'07.42" W.

Specifically, the plot is located in *Provincia Eje Neovolcánico* (the Neovolcanic Axis Province), of the *Subprovincia Neovolcánica Tarasca* (Tarascan Subprovince) (X9) and the *Estrato Volcán* (Volcano Stratum) (S1) (Inegi, 1985).

The prevailing climate is temperate sub-humid C(m)(w), with a sub-humid warm summer with abundant rains, a mean annual precipitation of 1 000-1 200 mm and a mean annual temperature of 10-12 °C (García, 1983). The predominant soil unit is ochric andosol, with a coarse texture (To+1); this type of soils are found in areas where volcanic activity has recently occurred, and they hold primarily pine, spruce and holm oak forest vegetations (Inegi, 1985).

Data

A sample of 1 083 normal diameter-stump diameter data pairs was collected in a surface area of 110 ha (Figure 1), from complete, totally healthy trees with a single stem as straight as possible, that are neither isolated nor located at the edges of the stand, in which trees with a normal diameter (ND) of 2.5 to 80 cm were measured; the measure was taken at a height of 1.30 m as well as the total height with a *Suunto* clinometer in 107 sampling sites of circular shape (500 m²) distributed in a systematic way, at a distance of 100 m between sites and of 100 m between sampling lines, which were marked with a slope compensated rope.

Variables

The following variables were recorded: species, tree number, normal diameter (D), total height (H), condition, damage and predominance. The age and the passage of time were measured in three trees per site. 1 083 pairs of data of D measured at a height of 1.3 m and SD measured at 0.3 m were obtained for different diametric categories and growth conditions through the direct measurement.



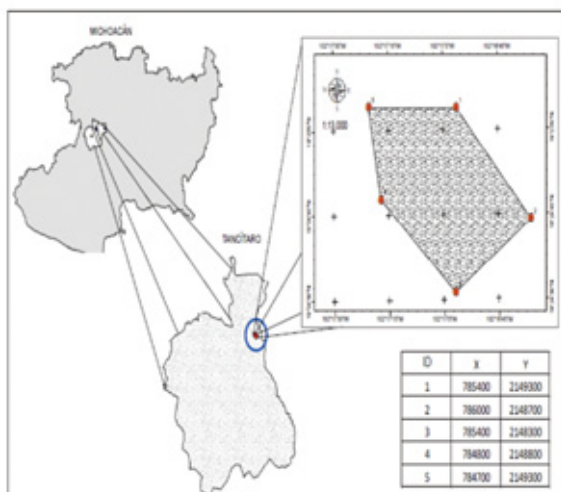


Figura 1. Ubicación del área de estudio en la zona de Protección de Flora y Fauna Pico de Tancitaro, Michoacán.

Figure 1. Location of the study area in the Zona de Protección de Flora y Fauna Pico de Tancitaro (Tancitaro Peak Flora and Fauna Protection Area) in Michoacán.

Modelos utilizados

Los modelos utilizados fueron los propuestos por Quiñonez *et al.* (2012) y Pompa-García *et al.* (2011) para la estimación del *dt* a partir del *dn*, debido a que esta sección tiene una forma de tipo neiloide truncado (Cuadro 1).

Análisis estadístico

Se graficaron los datos y para detectar datos atípicos en el diagrama de dispersión, se hizo una corrida preliminar de los modelos con PROG REG y la opción R-INFLUENCE para obtener los residuales estudentizados; cuando estos fueron mayores de 2 (absoluto) se consideraron atípicos, por lo que se procedió a eliminar la observación. Para el ajuste final, se usó el procedimiento PROC MODEL (SAS, 2003).

Utilized models

The models utilized were those proposed by Quiñonez *et al.* (2012) and Pompa-García *et al.* (2011) for the estimation of the SD from the ND, given that this section has the shape of a truncated neiloid (Table 1).

Statistical Analysis

The information was graphed in order to detect atypical data in the scatter plot, and a preliminary run of the PROG REG models and of the R-INFLUENCE option was carried out to obtain the studentized residuals; when the value of the latter was above 2 (absolute), they were considered to be atypical, and therefore the observation was deleted. The PROC MODEL procedure was used for the final adjustment (SAS, 2003).

Cuadro 1. Modelos usados para predecir el diámetro normal (*dn*) a partir del diámetro del tocón (*dt*).

Autor	Modelos	Expresión matemática
Pompa-García <i>et al.</i> (2011)	M1	$d_n = b_0 + b_1 (d_t) + \epsilon$
Pompa-García <i>et al.</i> (2011)	M2	$d_n = b_0 d_t (\frac{1.3}{h_t})^{b_1} + \epsilon$
Quiñonez <i>et al.</i> (2012)	M3	$d_n = b_0 + b_1 (b_1 d_t) + \epsilon$
Quiñonez <i>et al.</i> (2012)	M4	$d_n = b_0 + b_1 (d_t)^2 + \epsilon$
Quiñonez <i>et al.</i> (2012)	M5	$d_n = b_0 + b_1 (d_t) + (b_2 (d_t)^2) + \epsilon$

Table 1. Models used to predict the normal diameter (ND) from the stump diameter (SD).

Author	Models	Mathematical expression
Pompa-García <i>et al.</i> (2011)	M1	$d_n = b_0 + b_1 (d_s) + \epsilon$
Pompa-García <i>et al.</i> (2011)	M2	$d_n = b_0 d_s \left(\frac{1.3}{h_s}\right)^{b_1} + \epsilon$
Quiñonez <i>et al.</i> (2012)	M3	$d_n = b_0 + b_1 (b_1 d_s) + \epsilon$
Quiñonez <i>et al.</i> (2012)	M4	$d_n = b_0 + b_1 (d_s)^2 + \epsilon$
Quiñonez <i>et al.</i> (2012)	M5	$d_n = b_0 + b_1 (d_s) + (b_2 (d_s)^2) + \epsilon$

La selección de la mejor ecuación se hizo con base en el Cuadrado Medio del Error (CME), la Raíz del Cuadrado Medio del Error (RCME), nivel de significancia de los estimadores ($P < |t|$) y el Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), además se verificó la distribución de residuales. Para verificar el cumplimiento de los supuestos de la regresión, se usó la prueba de Shapiro - Wilk (SAS, 2003). Por otra parte, se graficaron las frecuencias relativas y acumuladas de los residuales para observar si se asemejaban a una línea recta, respecto de la probabilidad de la distribución normal, y si sus porcentajes también se parecían a una campana de Gauss (SAS, 2003).

La capacidad de ajuste se analizó a partir de los residuos y de los estadísticos: el Sesgo (\bar{E}), la Raíz del Error Medio Cuadrático (REMC) y el R^2_{adj} , el cual se refiere al porcentaje que explica la variable de respuesta y que tienen en cuenta el número total de los parámetros estimados (Barrio *et al.*, 2004, Trincado y Leal, 2006).

Resultados y Discusión

En el Cuadro 2, se resume del análisis de varianza para cada uno de las ecuaciones ajustadas. Se observan los estimadores estadísticos de los cinco modelos analizados, así como los indicadores de bondad de ajuste.

Los modelos de menor CME fueron M2 y M5, pero el segundo tiene un parámetro no significativo, los modelos M1 y M3 registraron valores iguales (Cuadro 2). Este es uno de los indicadores más importantes para decidir sobre el mejor modelo; por lo que, de acuerdo a su valor, en el presente estudio fueron M2, M1 y M3.

The selection of the best equation was based on the Mean Square Error (MSE), the Root of Square Means of Error (RMSE), the level of significance of the estimators ($P < |t|$) and the fitted coefficient of determination (R^2_{adj}); the distribution of the residuals was also verified. Compliance with the regression assumptions was verified using the Shapiro-Wilk test (SAS, 2003). On the other hand, the relative and accumulated frequencies of the residuals were graphed in order to determine any similarities with a straight line in relation to the probability of the normal distribution, as well as between their percentages and a Gauss bell curve (SAS, 2003).

The capacity of fit was analyzed based on the residuals and on three statistics, namely the Bias (\bar{E}), the Root of the Mean Square Error (RMSE) and the R^2_{adj} ; the latter refers to the percentage to which the response variable is explained and is taken into account in the total number of the estimated parameters (Barrio *et al.*, 2004; Trincado and Leal, 2006).

Results and Discussion

Table 2 presents a summary of the variance analysis for each of the fitted equations and shows the statistical estimators for the five models analyzed, as well as the indicators of goodness of fit.

The models with the least MSE were M2 and M5; however, the latter includes a non-significant parameter. Models M1 and M3 yielded equal values (Table 2). This is one of the most important indicators for deciding on the best model; its value shows models M2, M1 and M3 to be the best.



Cuadro 2. Valores de los parámetros y estadísticos de bondad de ajuste para los modelos utilizados.

Modelo	CME	Raíz CME	R ² _{adj}	Coefficiente	Estimador	Error std aprox.	Valor T	Aprox Pr> t	S.W.	Pr<W	Sesgo \bar{E}
M1	2.216	1.489	0.9938	β_0	-1.11149	0.0858	-12.96	<.0001	0.97335	<.0001	1.089
				β_1	0.922678	0.00158	584.04	<.0001			
M2	2.093	1.447	0.9942	β_0	0.173763	0.00149	116.54	<.0001	0.9608	<.0001	1.683
				β_1	1.048363	0.00233	450.82	<.0001			
M3	2.216	1.489	0.9938	β_0	-1.11149	0.0858	-12.96	<.0001	0.97335	<.0001	1.089
				β_1	0.960564	0.000822	1168.06	<.0001			
M4	23.599	4.858	0.9343	β_0	12.33252	0.1488	82.91	<.0001	0.95344	<.0001	3.2364
				β_1	0.011132	0.000042	262.5	<.0001			
M5	2.0861	1.444	0.9942	β_0	-0.24795	0.1605	-1.54	0.1226	0.96059	<.0001	1.192
				β_1	0.858087	0.00714	120.23	<.0001			
				β_2	2.89E-02	1.25E-03	23.18	<.0001			

Table 2. Values of the parameters and statistics of goodness of fit for the models used.

Model	MSE	MSE Root	R ² _{adj}	Coefficient	Estimator	Approx Std Error.	T Value	Approx Pr> t	S.W.	Pr<W	\bar{E} bias
M1	2.216	1.489	0.9938	β_0	-1.11149	0.0858	-12.96	<.0001	0.97335	<.0001	1.089
				β_1	0.922678	0.00158	584.04	<.0001			
M2	2.093	1.447	0.9942	β_0	0.173763	0.00149	116.54	<.0001	0.9608	<.0001	1.683
				β_1	1.048363	0.00233	450.82	<.0001			
M3	2.216	1.489	0.9938	β_0	-1.11149	0.0858	-12.96	<.0001	0.97335	<.0001	1.089
				β_1	0.960564	0.000822	1168.06	<.0001			
M4	23.599	4.858	0.9343	β_0	12.33252	0.1488	82.91	<.0001	0.95344	<.0001	3.2364
				β_1	0.011132	0.000042	262.5	<.0001			
M5	2.0861	1.444	0.9942	β_0	-0.24795	0.1605	-1.54	0.1226	0.96059	<.0001	1.192
				β_1	0.858087	0.00714	120.23	<.0001			
				β_2	2.89E-02	1.25E-03	23.18	<.0001			

Los coeficientes R² ajustada explican el ajuste de la ecuación a los datos y toma en cuenta el número de coeficientes utilizados (Pompa-García *et al.*, 2011). Los modelos M2 y M5 lograron los valores más cercanos a la unidad, seguidos de M1 y M3, con valor igual en ambos. Los resultados que se obtuvieron son superiores a los documentados por Alder y Cailliez (1980), quienes expresan que las mejores funciones pueden tener coeficientes por arriba de 0.7 y 0.8; Gujarati (2004) plantea que un modelo es satisfactorio, si su valor es alrededor de 0.8. Lo anterior indica que con los modelos se obtienen buenas estimaciones. El M2 sigue siendo el mejor, ya que M5 tiene el parámetro β_0 no significativo; y coincide con el registrado por Pompa-García *et al.* (2011), quien cita 0.96 para *Pinus durangensis* Martínez.

Los coeficientes β_0 y β_1 de los modelos M1, M2 y M3 son significativos ($p \leq 0.0001$), no así el coeficiente β_0 del M5 ($p=0.1226$), que tuvo el más alto error estándar en el coeficiente

The values of the fitted R² coefficient explain the fit of the model to the data and take into account the number of coefficients used (Pompa-García *et al.*, 2011). Models M2 and M5 yielded the closest values to the unit, followed by models M1 and M3, both with an equal value. These results are higher than those reported by Alder and Cailliez (1980), who state that the best features may have coefficients above 0.7 and 0.8, and by Gujarati (2004), according to whom a model is satisfactory when the value of this coefficient is approximately 0.8. This is an indication that the models yield satisfactory estimates. In this case, model M2 remains the best, since M5 includes the non-significant parameter β_0 . This model coincides with the one obtained by Pompa-García *et al.* (2011), who estimated values of 0.96 for *Pinus durangensis* Martínez.

Coefficients β_0 and β_1 of models M1, M2 and M3 are significant ($p < 0.0001$), but not so the coefficient β_0 of model M5 ($p=0.1226$), which shows the highest value for the standard

de regresión. El parámetro β_0 caracteriza la forma de la relación del diámetro de tocón - diámetro normal, por lo que es importante maximizar la precisión de su estimación, por lo tanto, se descarta el empleo de modelo M5.

La RCME permite evaluar la precisión de las estimaciones realizadas (Benítez-Naranjo *et al.*, 2004). El modelo M2 presentó el menor valor de RCME, mientras que en M1 y M3 el índice fue igual. El mejor modelo resultó ser el M2.

El uso de los criterios anteriores tiende a seleccionar los modelos más sencillos, debido a que penalizan el valor de acuerdo al principio de parsimonia (Gómez-Aparicio *et al.*, 2013).

Con base en la prueba de Shapiro Wilk, en ningún caso se violó el supuesto de normalidad, ya que los valores fueron cercanos a 1, y el nivel de significancia ($Pr < W$) fue alto (< 0.0001) (Velazco *et al.*, 2006). Como se trabajó con una muestra suficientemente grande, de acuerdo al teorema central del límite, estas muestras tienden a aproximarse a la normalidad (Martínez-González *et al.*, 2006); por lo que se asume que la distribución de los residuales se aproxima suficientemente a la normal (Augusto *et al.*, 2009).

En el Cuadro 2 se presentan como medidas de precisión en las estimaciones realizadas: la desviación de los modelos M1 y M3, respecto a los datos observados contra los predichos (\bar{E}) que es baja, y en ese orden le sigue el modelo M2.

Estos tres modelos tuvieron buena capacidad predictiva, de acuerdo a los valores pequeños de la raíz del error medio cuadrático, sesgo, y mayor R^2_{adj} (Cuadro 2). Para los sesgos positivos, indica en cuantas unidades se subestima la predicción a nivel de árbol individual. Lo anterior, mejora lo señalado por Pompa-García *et al.* (2011), cuyos valores son superiores a RCME de mayores de 5.7, sesgo mayor a 2.39 y R^2_{adj} de 0.96, para *Pinus durangensis*.

En la Figura 2 se muestra la fidelidad de los datos predichos, en relación a los observados con los modelos que alcanzaron los mejores ajustes; y no hay mayor sesgo en las predicciones. Con cualquiera de las tres ecuaciones se predice, en forma confiable, el diámetro normal en función de las dimensiones del tocón.

error of the regression coefficient. The parameter β_0 is the one that characterizes the form of the ratio of the stump diameter to the normal diameter; for this reason, it is important to maximize the accuracy of its estimation, and therefore model M5 should not be used.

The RMSE makes it possible to evaluate the accuracy of the estimations carried out (Benítez-Naranjo *et al.*, 2004). Model M2 produced the lowest value of RMSE, and M1 and M3 both yielded the same index. In this case, the best model is M2.

These criteria lead to select the simplest models because they penalize the value according to the principle of parsimony (Gómez-Aparicio *et al.*, 2013).

According to the Shapiro-Wilk test, the assumption of normality is not violated in any case, since values close to 1 are obtained and the level of significance ($Pr < W$) is high (< 0.0001) (Velazco *et al.*, 2006). Given that the study sample was sufficiently large according to the central limit theorem, these samples tend to be closer to normality (Martínez-González, *et al.*, 2006), and consequently it may be assumed that the distribution of the residuals is close enough to normal (Augusto *et al.*, 2009).

Table 2 shows the deviation of models M1 and M3 with respect to the observed values versus the predicted values (\bar{E}) as measures of accuracy of the estimations; such deviation is low, and therefore these models are followed in order by model M2.

These three models have good predictive capacity in accordance with the low values of the root of the mean square error and bias, and the higher value of R^2_{adj} (Table 2). A positive bias indicates by how many units the prediction is underestimated at the individual tree level. This is an improvement over the results obtained by Pompa-García *et al.* (2011), who obtained values above 5.7 for the RMSE, a bias of over 2.39, and an R^2_{adj} of 0.96 for *Pinus durangensis*.

Figure 2 shows the fidelity of the predicted data in relation to those obtained with models that had the best fits; no significant bias was observed in the predictions. It is possible to obtain a reliable prediction of the normal diameter with any of the three equations, depending on the dimensions of the stump.



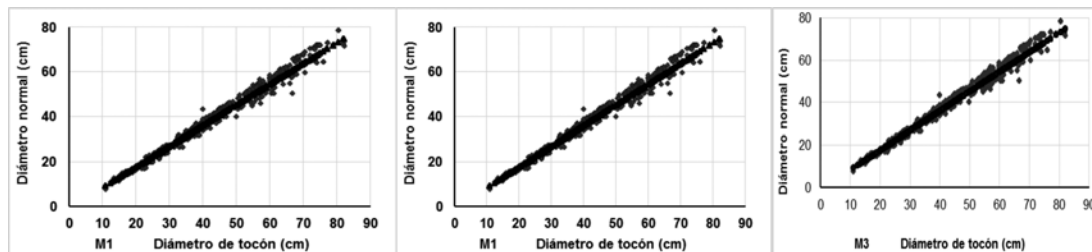


Figura 2. Estimaciones del dn a partir del dt con los modelos M1, M2 y M3 mejor ajustados para *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. et Cham. en Tancítaro, Michoacán.

Figure 2. Estimates of the ND based on the SD using the models M1, M2 and M3 best adjusted for *Abies religiosa* (Kunth) Schtdl. et Cham. in Tancítaro, Michoacán.

Para ilustrar el uso de las ecuaciones, se considerará un tocón de 50 cm de diámetro, que fue cortado a una altura de 30 cm. Los diámetros estimados con las tres ecuaciones son los siguientes:

$$M1: dn = -1.11149 + 0.922678(50) = 45.0224 \text{ cm}$$

$$M2: dn = 0.173763(50) \left(\frac{1.3}{45}\right)^{1.048863} = 43.5864 \text{ cm}$$

$$M3: dn = 1.11149 + 0.922678(0.922678*50) = 45.0227 \text{ cm}$$

Los valores calculados del diámetro normal en centímetros son muy semejantes en los modelos M1 y M3; pero, debido a la parsimonia o simplicidad se recomienda usar el modelo M1, tal como lo sugieren Martínez-López y Acosta-Ramos (2014), y Corral-Rivas *et al.* (2007). Con la estimación del diámetro normal a partir del diámetro de tocón, es posible realizar la cuantificación y evaluación de talas clandestinas, desastres naturales, reconstrucción de la estructura del bosque y la evaluación de las prácticas de aprovechamiento aplicadas.

Conclusiones

El ajuste de los modelos indica que existe una tendencia lineal entre las variables diámetro del tocón y el diámetro normal, por lo que la estimación del diámetro normal a partir del diámetro del tocón puede hacer de forma confiable con una regresión lineal simple.

Los modelos M1 y M3 presentan estadísticos con buenos ajustes y el menor sesgo, por lo que es factible para emplearlos en la predicción del diámetro normal, en función del diámetro del tocón.

El modelo M1, por ser el más sencillo y fácil de usar, es el que se recomienda para estimar el diámetro normal en función del diámetro del tocón, y en combinación de una tarifa de cubicación, estimar el volumen del fuste para *Abies religiosa* en la región de estudio.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

In order to illustrate the use of the equations, we will assume that we have a stump with a 50 cm diameter cut at a height of 30 cm. The following diameters were obtained with the three equations:

$$M1: dn = -1.11149 + 0.922678(50) = 45.0224 \text{ cm}$$

$$M2: dn = 0.173763(50) \left(\frac{1.3}{45}\right)^{1.048863} = 43.5864 \text{ cm}$$

$$M3: dn = 1.11149 + 0.922678(0.922678*50) = 45.0227 \text{ cm}$$

The estimated values of the normal diameter in cm are very similar in models M1 and M3—although, due to the parsimony or simplicity, model M1 is recommended by Martínez-López and Acosta-Ramos (2014)—and closely resemble the results reported by Corral-Rivas *et al.* (2007) for the *Pinus* species of northern Mexico. The estimation of the normal diameter based on the stump diameter makes it possible to quantify and assess clandestine loggings, natural disasters, the reconstruction of the structure of the forest and the exploitation practices applied.

Conclusions

The fit of the models indicates that there is a linear trend between the stump diameter and the normal diameter variables; therefore, a reliable estimate of the normal diameter can be obtained based on the stump diameter using a simple linear regression.

Models M1 and M3 present statistics with good fits and with the least bias; for this reason, they can be used in the prediction of the normal diameter based on the stump diameter.

Because model M1 is the most simple and easy to use, it is recommended for estimating the normal diameter based on the stump diameter and, in combination with a cubication rate, for estimating the stem volume of *Abies religiosa* in the study region.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests.

Contribución por autor

Xavier García-Cuevas: análisis de datos, escrito y corrección del documento; Jonathan Hernández-Ramos: análisis de datos y escrito del documento; José de Jesús García Magaña: coordinación de toma de datos de campo y revisión del documento; Victorino Herrera Ávila: toma de datos de campo y captura de información; Adrián Hernández Ramos: toma de datos de campo y captura de información

Referencias

- Aigbe, H. I., W. W. Modogu and B. A. Oyebade. 2012. Modeling volume from stump diameter of *Terminalia ivorensis* (A. Chev) in Sokponba Forest Reserve, Edo State, Nigeria. *ARPN Journal of Agricultural and Biological Science* 7(3):146-151.
- Augusto C., T., J. O. Vargas M. y M. Escalier H., 2009. Ajuste y selección de modelos de regresión para estimar el volumen total de árboles. Escuela de Ciencia Forestales de la Universidad Mayor de San Simón. Documento Técnico Núm. 5. Cochabamba, Bolivia. 27 p.
- Alder, D. y F. Cailliez. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos. *Estudios FAO Montes* 22/2. Vol. 2. Roma, Italia. 91 p.
- Barrio A., M., J. G. Álvarez G., I. J. Díaz M. H. y C. A. López S. 2004. Relación altura diámetro generalizada para *Quercus robur* L. en Galicia. *Cuadernos de la Sociedad Española de las Ciencias Forestales* 18: 141-146.
- Bava, J. O. y P. M. López B. 2006. Predicción del diámetro a la altura de pecho en función de las dimensiones del tocón de árboles de lenga (*Nothofagus pumilio*) en Tierra del Fuego, Argentina. *Quebracho* 13:87-92.
- Benítez-Naranjo, J. Y., M. Rivero-Vega, A. Vidal-Corona, J. Rodríguez-Rodríguez y R. C. Álvarez-Rivera. 2004. Estimación del diámetro normal a partir del diámetro del tocón en plantaciones de *Casuarina equisetifolia* Forst. en la provincia Camaquëy, Cuba. *Revista Chapingo Serie de Ciencias Forestales y del Ambiente* 10(1):25-30.
- Corral-Rivas, J. J., M. Barrio-Anta, O. A. Aguirre-Calderón and U. Diéguez-Aranda. 2007. Use of stump diameter to estimate diameter at breast height and tree volume for major pine species in El Salto, Durango (México). *Forestry* 80 (1): 29-40.
- Delgado, L. A., M. F. Acevedo, H. Castellanos, H. Ramírez y J. Serrano. 2005. Relaciones alométricas y patrones de crecimiento para especies de árboles de la Reserva Forestal Imataca, Venezuela. *Interciencia* 30(5):275-283.
- Diéguez, A. U., M. Barrio A., M. F. Castedo D. y M. Balboa M. 2003. Estimación del diámetro normal y del volumen del tronco a partir de las dimensiones del tocón para seis especies forestales comerciales de Galicia. *Investigación Agraria Sistemas y Recursos Forestales* 12(2): 131-139.
- García, E. 1983. 1964. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köepen (para adaptarlas a las condiciones de la República Mexicana). Universidad Autónoma de México. Instituto de Geografía. México, D. F., México. 252 p.
- Gómez-Aparicio, L., J. M. Ávila y L. Cayuela. 2013. Métodos de máxima verosimilitud en ecología y su aplicación en modelos de vecindad. *Ecosistemas* 22(3):12-20.

Contribution by author

Xavier García-Cuevas: data analysis, writing and correction of the manuscript; Jonathan Hernández-Ramos: data analysis and writing of the manuscript; José de Jesús García Magaña: coordination of data taking at the field and review of the manuscript; Victorino Herrera Ávila: data taking at the field and data collection; Adrián Hernández Ramos: data taking at the field and data collection.

End of the English version

- Gujarati D., N. 2004. *Econometría*. 4a ed. McGraw-Hill Interamericana Editores. México, D.F., México. 972 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (Inegi). 1985. *Cartas topográficas y edafológicas*. Inegi. SPP. México, D.F., México. s/p.
- Hernández R., J. 2016. Estimación de biomasa aérea y volumen en plantaciones forestales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake en Huimanguillo, Tabasco. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de Méx., México. 104 p.
- López S. C. A., J. Gorgoso V., F. Castedo D., A. Rojo A., R. Rodríguez S., J. G. Álvarez G. y F. Sánchez R. 2003. A height-diameter model for *Pinus radiata* D. Don in Galicia (Northwest Spain). *Annals of Forest Science* 60: 237-245. DOI: 10.1051/forest: 2003015.
- Martin, J. G., B. D. Kloeppel, T. L. Schaefer, D. L. Kimbler and S. G. Manuly. 1998. Aboveground biomass and nitrogen allocation of ten deciduous southern Appalachian tree species. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 1648-1659.
- Martínez-González, M. A., A. Sánchez-Villegas y J. Faulin-Fajardo. 2006. *Bioestadística amigable*. 2ª. Ed. Ediciones Díaz Santo. Madrid, España. 919 p.
- Martínez-López, L. y A. Acosta-Ramos. 2014. Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del diámetro del tocón para *Quercus laurina* en Ixtlán, Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 20 (1):59-70.
- Pompa-García, M., H. M. De los Santos-Posadas, M. E. Zepeda-Bautista y J. J. Corral-Rivas. 2011. Un modelo dendrométrico para estimación del diámetro normal a partir de las dimensiones del tocón. *Agrociencia* 45(3): 379-387.
- Quiñonez, B. G., F. Cruz C., B. Vargas L. y F. J. Hernández. 2012. Diámetro, altura y volumen a partir del tocón para especies forestales de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(9): 23-39.
- Statistical Analysis System Institute (SAS) 2003. *SAS/STATM User's guide*. Release 9.1 Edition. Statistical Analysis System Institute. Cary, NC, USA. 409 p.
- Trincado, G. y C. Leal D. 2006. Ecuaciones locales y generalizadas de altura-diámetro para pino radiata (*Pinus radiata*). *Bosque* 27(1): 23-34.
- Velasco B., E., S. Madrigal H., I. Vázquez C., A. González H. y F. Moreno S. 2006. Manual para la elaboración de tablas de volumen fustal en pinos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México, D. F., México. Libro técnico Núm. 1. 34 p.
- Zeide, B. and C. Vanderschaaf. 2002. The effect of density on the height-diameter relationship. In: Outcalt, K. W. (ed.). Proceedings of the eleventh biennial southern silvicultural research conference. Gen. Tech. Rep. SRS-48. USDA. Ashville, NC, USA. pp. 463-466.

