

Species-specific and regional volume models for 12 forest species in Durango, Mexico

Modelos de volumen específicos y regionales para 12 especies forestales en el estado de Durango, México

Bernardo Simental-Cano¹; Carlos A. López-Sánchez¹; Christian Wehenkel¹; Benedicto Vargas-Larreta²; Juan G. Álvarez-González³; José J. Corral-Rivas^{1*}

¹Universidad Juárez del Estado de Durango, Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera. Bulevar del Guadiana 501, fracc. Ciudad Universitaria. C. P. 34120. Durango, México.

²Instituto Tecnológico de El Salto. Mesa del Tecnológico s/n. C. P. 34942. El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, México.

³Universidad de Santiago de Compostela, Departamento de Enxeñería Agroforestal. Escuela Politécnica Superior, Campus Universitario 27002. Lugo, España.

Corresponding author: jcorral@ujed.mx Tel.: 52+ (618) 8251886

Abstract

Introduction: Estimating the volume of individual trees is an important aspect in dendrometry and in the conducting of forest inventories.

Objective: Significant differences were evaluated in additive equation systems for estimating the total volume of individual trees in nine species of the genus *Pinus* (*P. cooperi*, *P. durangensis*, *P. arizonica*, *P. leiophylla*, *P. teocote*, *P. engelmannii*, *P. lumholtzii*, *P. strobiformis* and *P. herrerae*), and three of the genus *Quercus* (*Q. sideroxylla*, *Q. durifolia* and *Q. rugosa*), and among regional forest management units (UMAFOR) when dealing with the same species.

Materials and methods: To evaluate whether equation systems are different among tree species of the same genus and among the UMAFORs for the same species, two complementary statistical analyzes were used based on the fitting of a reduced and a full equation system: the *F* test of nonlinear extra sum of squares method, and the parameter significance analysis.

Results and discussion: For most of the species studied, equation systems are significantly different. The need to use regional models in 10 of the 12 tree species, except for *P. strobiformis* and *Q. rugosa*, is also reported.

Conclusion: The use of a state model for *P. strobiformis* and *Q. rugosa* is recommended.

Keywords: UMAFOR, *Pinus*, *Quercus*, reduced equation system, full equation system.

Resumen

Introducción: La estimación del volumen de árboles individuales es un aspecto relevante en la dendrometría y en la realización de inventarios forestales.

Objetivo: Se evaluaron diferencias significativas en sistemas de ecuaciones aditivas para la estimación de volumen total de árboles individuales en nueve especies de *Pinus* (*P. cooperi*, *P. durangensis*, *P. arizonica*, *P. leiophylla*, *P. teocote*, *P. engelmannii*, *P. lumholtzii*, *P. strobiformis* y *P. herrerae*), y tres de *Quercus* (*Q. sideroxylla*, *Q. durifolia* y *Q. rugosa*), y entre unidades de manejo forestal regional (UMAFOR) cuando se trata de una misma especie.

Materiales y métodos: Para evaluar si el sistema de ecuaciones difiere entre especies de un mismo género y entre las UMAFOR para una misma especie, se utilizaron dos análisis estadísticos complementarios basados en el ajuste de un sistema reducido y un sistema completo de ecuaciones: la prueba *F* asociada al método de la suma adicional de cuadrados no lineales y el análisis de significancia de los parámetros.

Resultados y discusión: Para la mayoría de las especies estudiadas, los sistemas de ecuaciones son significativamente diferentes. Se reporta la necesidad de utilizar modelos regionales en 10 de las 12 especies, exceptuando a *P. strobiformis* y *Q. rugosa*.

Conclusión: Se recomienda el empleo de un modelo estatal para *P. strobiformis* y *Q. rugosa*.

Palabras clave: UMAFOR, *Pinus*, *Quercus*, sistema reducido de ecuaciones, sistema completo de ecuaciones.

Introduction

Durango is considered the first forest reserve in Mexico with an estimate of 422.1 million m³, representing 22.4 % of the total estimated at the national level (Corral-Rivas, Álvarez-González, Corral-Rivas & López-Sánchez, 2015). Of the total area of the state, 70.4 % (8.6 million ha) is covered by forest resources, of which 57 % corresponds to temperate forests, dominated by irregular and multispecies stands (Corral-Rivas, Álvarez-González, Crecente-Campo, & Corral-Rivas, 2014). According to González, González, and Márquez (2007), 37 species of *Quercus* and 21 species of *Pinus* have been recorded in the forests of Durango, pines representing 20 % of all species of this genus known in the world.

In Durango, the species that stand out because of their abundance, distribution and economic importance are the following: *Pinus cooperi* Blanco, *P. durangensis* Martínez, *P. arizonica* Engelm., *P. leiophylla* Schiede ex Schltld. & Cham., *P. teocote* Schltld. & Cham., *P. engelmannii* Carr., *P. lumholtzii* Rob. & Fern., *P. strobiformis* Engelm., *P. herrerae* Martínez, *P. maximinoi* Moore, *Quercus sideroxylla* Bonpl., *Q. durifolia* Seemen and *Q. rugosa* Neé (Corral-Rivas, Álvarez-González, Ruiz-González, & Gadow, 2004). These species are mixed with each other and with other less abundant timber species of the genera *Pinus*, *Quercus*, *Arbutus*, *Juniperus* and *Alnus*, forming mixed and irregular stands in the different UMAFOR of the state (Corral-Rivas et al., 2014).

The estimation of the volume of individual trees is an important aspect in the dendrometry and the development of forest inventories. It is difficult to determine the volume through measuring the volume of sections, so it's convenient to have mathematical equations that allow to estimate the volume of trees indirectly through simple measurements such as the diameter at breast height and the total height of standing trees (Diéguez et al., 2003). In this sense, several studies have been developed in Durango for the estimation of the volume of commercial tree species (Corral, Návar, & Fernández, 1999; Corral-Rivas, Barrio, Diéguez-Aranda, & Aguirre, 2007a; Corral-Rivas, Diéguez-Aranda, Castedo, & Corral-Rivas, 2007b; Quiñonez-Barraza, De los Santos-Posadas, Álvarez-González, & Velázquez-Martínez, 2014).

In Mexico, the Secretariat of Environment and Natural Resources (SEMARNAT) and the National Forestry Commission (CONAFOR) request forestry professionals, as part of a new forest policy, to plan and execute management activities on a territorial scale known as regional forest management unit (UMAFOR) (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2003). A UMAFOR integrates at least 30 % of the forest owners of a specific forest region and is delimited considering

Introducción

El estado de Durango es considerado como la primera reserva forestal de México con una estimación de 422.1 millones de m³, representando 22.4 % del total estimado a nivel nacional (Corral-Rivas, Álvarez-González, Corral-Rivas & López-Sánchez, 2015). De la superficie total del estado, 70.4 % (8.6 millones de ha) está cubierto por recursos forestales, de los cuales 57 % corresponde a bosques templados, donde dominan los rodales multiespecíficos e irregulares (Corral-Rivas, Álvarez-González, Crecente-Campo, & Corral-Rivas, 2014). De acuerdo con González, González, y Márquez (2007), en los bosques del estado de Durango se han registrado 37 especies de *Quercus* y 21 especies de *Pinus*, lo que representa 20 % de todas las especies de pino conocidas en el mundo.

En Durango, las especies que resaltan por su abundancia, distribución e importancia económica son las siguientes: *Pinus cooperi* Blanco, *P. durangensis* Martínez, *P. arizonica* Engelm., *P. leiophylla* Schiede ex Schltld. & Cham., *P. teocote* Schltld. & Cham., *P. engelmannii* Carr., *P. lumholtzii* Rob. & Fern., *P. strobiformis* Engelm., *P. herrerae* Martínez, *P. maximinoi* Moore, *Quercus sideroxylla* Bonpl., *Q. durifolia* Seemen y *Q. rugosa* Neé (Corral-Rivas, Álvarez-González, Ruiz-González, & Gadow, 2004). Estas especies se encuentran mezcladas entre sí y con otras especies maderables menos abundantes de los géneros *Pinus*, *Quercus*, *Arbutus*, *Juniperus* y *Alnus*, formando rodales mixtos e irregulares en las distintas UMAFOR del estado (Corral-Rivas et al., 2014).

La estimación del volumen de árboles individuales es un aspecto relevante en la dendrometría y en la realización de inventarios forestales. La dificultad en la determinación directa del volumen a través de la cubicación de secciones hace conveniente contar con ecuaciones matemáticas que permitan estimar el volumen de los árboles de manera indirecta a través de mediciones simples como el diámetro normal y la altura total del árbol en pie (Diéguez et al., 2003). En este sentido, en Durango se han desarrollado varios trabajos para la estimación del volumen de especies comerciales (Corral, Návar, & Fernández, 1999; Corral-Rivas, Barrio, Diéguez-Aranda, & Aguirre, 2007a; Corral-Rivas, Diéguez-Aranda, Castedo, & Corral-Rivas, 2007b; Quiñonez-Barraza, De los Santos-Posadas, Álvarez-González, & Velázquez-Martínez, 2014).

En México, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) solicitan a los profesionistas forestales, como parte de una nueva política forestal, planear y ejecutar las actividades de manejo a una escala territorial conocida como unidad de manejo forestal regional (UMAFOR) (Cámara de Diputados del H. Congreso de la

a regional similarity, therefore, considers communal interdependence and biological sense.

Durango is divided into 13 UMAFOR and for 11 of these; specific volume equations have been developed through the execution of projects financed by CONAFOR. However, the practical application of specific equations in estimating the total volume of individual trees, whether for growing stock or harvesting purposes, poses the following questions for forest managers: (i) is it necessary to use one species-specific equation to determine the volume of trees of the same genus? and (ii) is it necessary to change the species-specific equation among different UMAFOR? Regarding the above, this study aimed to evaluate differences in equation systems used for the estimation of the volume of 12 commercial species and among forest regions for the same species.

Materials and Methods

The study was carried out with data collected in the years 2010 to 2013 in 11 of the 13 UMAFOR (1001 to 1011) of Durango (Figure 1). Each UMAFOR is composed of ejidos and communities characterized by the presence of rugged terrain with irregular elevations and depressions ranging from 1,400 to 3,000 m. The predominant climate is temperate with summer rains; the average annual rainfall ranges from 700 to 1,440

Unión, 2003). Una UMAFOR integra al menos 30 % de los propietarios forestales de una determinada región forestal y es delimitada considerando una similitud regional, por tanto, considera interdependencia comunal y sentido biológico.

El estado de Durango está dividido en 13 UMAFOR, y para 11 de éstas se han desarrollado ecuaciones específicas de volumen a través de la ejecución de proyectos financiados por la CONAFOR. No obstante, la aplicación práctica de ecuaciones específicas en la estimación del volumen total de árboles individuales, ya sea con fines de cálculo de existencias o de cosecha, supone para los responsables del manejo forestal las interrogantes siguientes: (i) ¿es necesario usar una ecuación específica por especie para cubicar árboles de un mismo género? y (ii) ¿se requiere cambiar la ecuación específica por especie entre las distintas UMAFOR? Considerando lo anterior, este trabajo tuvo como objetivo evaluar diferencias en sistemas de ecuaciones utilizadas para la estimación del volumen en 12 especies comerciales y entre regiones forestales para una misma especie.

Materiales y métodos

El estudio se realizó con datos colectados en los años 2010 a 2013 en 11 de las 13 UMAFOR (1001 a 1011) del estado de Durango (Figura 1). Cada UMAFOR está

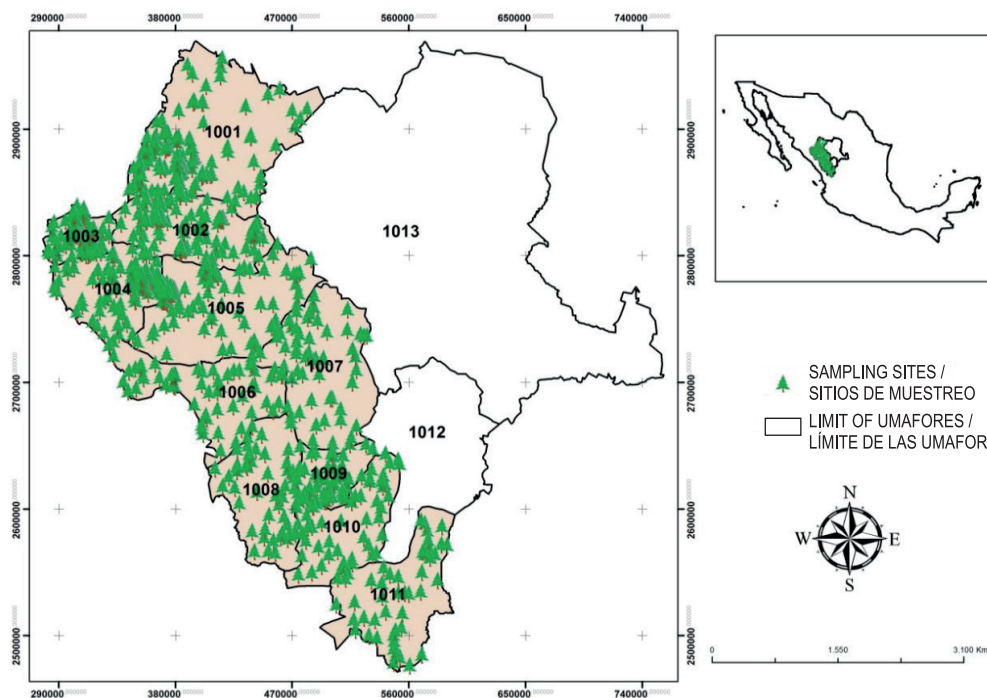


Figure 1. Location of study area. The points marked on the map represent sampling sites of the tree species of *Pinus* and *Quercus* studied in 11 units of regional forest management (UMAFOR) of Durango.

Figura 1. Localización del área de estudio. Los puntos marcados sobre el mapa representan sitios de muestreo de especies de *Pinus* y *Quercus* estudiadas en 11 unidades de manejo forestal regional (UMAFOR) del estado de Durango.

mm with an average temperature of 8.3 in the highest parts and 16 °C in the lower parts (Martínez-Antúnez et al., 2013).

The sample used in the study comprises 10,828 trees corresponding to 12 timber forest species. Trees were felled in stands with potential for forest management corresponding to an area of approximately 3.4 million hectares (López-Serrano, López Sánchez, Solís-Moreno, & Corral-Rivas, 2016). The sample had variable conditions of site quality and density, and a distribution close to a normal standard of trees in terms of diameter classes per species. The 12 species studied were coded as follows, to be consistent with the catalog of species that is mostly used in Durango: *Pinus cooperi* (1), *P. durangensis* (2), *P. arizonica* (3), *P. leiophylla* (4), *P. teocote* (5), *P. engelmannii* (6), *P. lumholtzii* (7), *P. strobiformis* (8), *P. herrerae* (15), *Quercus sideroxylla* (41), *Q. durifolia* (42) and *Q. rugosa* (66) (Table 1).

The following dendrometric variables were obtained from each tree: i) *D* = diameter at breast height over bark (1.30 m above ground, cm), ii) *H* = total height (m), and iii) *di* = top diameter over and inside bark along the stem with respect to the ground (cm). The sampling protocol

integrada por ejidos y comunidades caracterizados por la presencia de terrenos accidentados con elevaciones y depresiones irregulares que varían de 1,400 a 3,000 m. El clima predominante es templado con lluvias en verano; la precipitación media anual oscila de 700 a 1,440 mm, con temperatura promedio de 8.3 en las partes más altas y de 16 °C en las partes más bajas (Martínez-Antúnez et al., 2013).

La muestra utilizada en el estudio comprende 10,828 árboles correspondientes a 12 especies forestales maderables. Los árboles se analizaron a través de muestreo destructivo (derribo y troceo) en rodales con potencial de manejo forestal que corresponden a una superficie de aproximadamente 3.4 millones de hectáreas (López-Serrano, López Sánchez, Solís-Moreno, & Corral-Rivas, 2016). La muestra tuvo condiciones variables de calidad de estación y densidad, y una distribución cercana a una normal estándar de los árboles en términos de clases de diámetro por especie. Las 12 especies estudiadas se codificaron de la manera siguiente, para ser consistentes con el catálogo de especies que se utiliza mayormente en Durango: *Pinus cooperi* (1), *P. durangensis* (2), *P. arizonica* (3), *P. leiophylla* (4), *P. teocote* (5), *P. engelmannii* (6), *P. lumholtzii* (7), *P.*

Table 1. Distribution of the number of trees per species and per unit of regional forest management (UMAFOR), considered in the study in Durango.

Cuadro 1. Distribución del número de árboles por especie y por unidad de manejo forestal regional (UMAFOR), considerados en el estudio en el estado de Durango.

UMAFOR	Area (ha)/ Superficie (ha)	Species /Especie												Total
		1	2	3	4	5	6	7	8	15	41	42	66	
1001	423,990	194	152	153	154	70	166	14	20	-	140	-	-	1,063
1002	351,498	-	154	154	152	159	101	20	25	-	102	-	-	867
1003	126,054	27	175	67	105	-	52	12	27	164	151	-	-	780
1004	318,104	-	148	150	51	148	50	32	33	151	150	-	-	913
1005	424,753	-	168	203	46	136	-	-	27	-	129	-	-	709
1006	429,806	130	256	-	190	219	157	66	115	89	136	-	64	1,422
1007	253,619	190	163	-	162	204	114	28	19	-	134	-	-	1,014
1008	373,308	167	182	-	173	176	167	108	107	148	163	138	16	1,545
1009	162,075	103	189	-	156	126	122	-	-	3	119	55	-	873
1010	358,944	132	119	-	133	130	160	159	12	55	-	-	-	900
1011	262,488	156	152	-	39	35	155	37	1	46	60	-	61	742
Total	3,484,639	1,099	1,858	727	1,361	1,403	1,244	476	386	656	1,284	193	141	10,828

1 = *Pinus cooperi*, 2 = *P. durangensis*, 3 = *P. arizonica*, 4 = *P. leiophylla*, 5 = *P. teocote*, 6 = *P. engelmannii*, 7 = *P. lumholtzii*, 8 = *P. strobiformis*, 15 = *P. herrerae*, 41 = *Quercus sideroxylla*, 42 = *Q. durifolia* y 66 = *Q. rugosa*.

considered the measurement of two sections of 0.30 m above the tree stump, the next section corresponded to the diameter at breast height (1.30 m), continuing with sections of 2.54 m in length until reaching the top of the tree, as shown in Figure 2. In addition, all branches with diameter at the base (beginning of the branch) greater than or equal to 5 cm were sectioned at variable lengths, recording the diameters over and inside bark for the different sections (dr_i , cm). The volume of the trees was determined by sections; the volume of each section of stem and branch was estimated by the formula of Smalian and the volume of the top section was estimated by the equation of the cone. Over-bark total stem volume (above stump) was obtained by summing the over-bark log volumes, the volume of the top, and the volume of all the branches that exceeded 5 cm at the beginning. Table 2 shows the summary with the descriptive statistics of the sample trees of the species studied.

strobiformis (8), *P. herrerae* (15), *Quercus sideroxylla* (41), *Q. durifolia* (42) y *Q. rugosa* (66) (Cuadro 1).

En cada árbol se midieron las variables dendrométricas siguientes: i) D = diámetro normal con corteza (1.30 m sobre el nivel del suelo, cm), ii) H = altura total (m), y iii) d_i = diámetro con y sin corteza para diferentes secciones a lo largo del fuste con respecto al suelo (cm). El protocolo de muestreo consideró la medición de dos secciones de 0.30 m por encima del tocón, la sección siguiente correspondió con el diámetro normal (1.30 m), continuando con secciones de 2.54 m de longitud hasta llegar a la punta del árbol, como se ilustra en la Figura 2. Adicionalmente, todas las ramas con diámetro en la base (inicio de la rama) mayor o igual a 5 cm fueron seccionadas a longitudes variables, registrando los diámetros con y sin corteza para las diferentes secciones (dr_i , cm). Los árboles se cubicaron por secciones; el volumen de cada sección de fuste y de

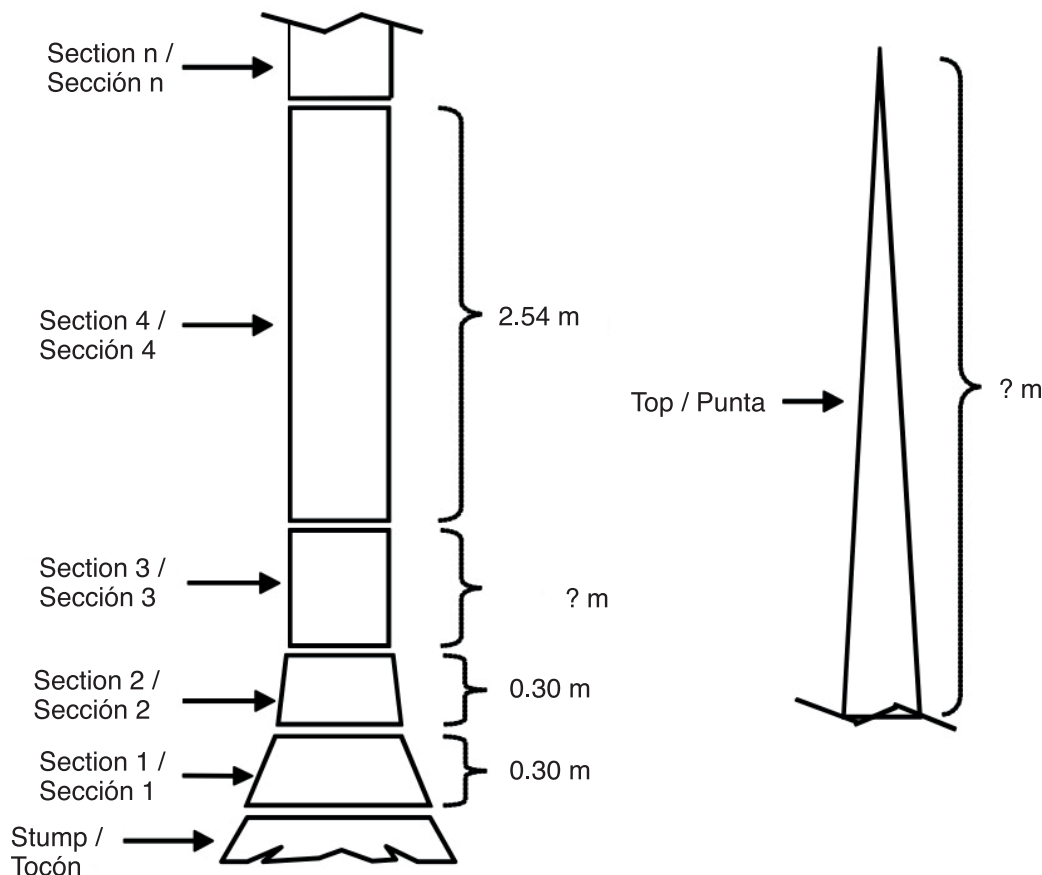


Figure 2. Illustration of sections of sampled trees for measuring the total volume overbark. The height where section 3 ends corresponds to the diameter at breast height (1.3 m).

Figura 2. Ilustración de las secciones de los árboles muestra para la medición del volumen total con corteza. La altura donde termina la sección 3 corresponde a la altura del diámetro normal (1.3 m).

Table 2. Summary of the variables diameter at breast height (D), total tree height (H) and total tree volume overbark (vta_{cc}) of the species studied in 11 regional forest management units (UMAFOR) in Durango.
Cuadro 2. Resumen de las variables diámetro normal (D), altura total del árbol (H) y volumen total del árbol con corteza (vta_{cc}) de las especies estudiadas en 11 unidades de manejo forestal regional (UMAFOR) del estado de Durango.

Variable	Descriptive Statistics / Estadísticos descriptivos	Species / Especie											
		1	2	3	4	5	6	7	8	15	41	42	66
D (cm)	Minimum / Mínimo	7.5	7.70	7.80	7.50	7.50	7.7	7.70	7.50	7.00	7.50	8.30	7.70
	Mean / Media	30.57	31.10	33.44	29.75	29.41	29.18	24.62	26.23	31.20	28.39	26.38	23.30
	Maximum / Máximo	67.50	91.24	88.14	71.60	82.81	68.00	58.00	68.00	73.25	68.00	70.10	45.50
H (m)	Minimum / Mínimo	4.19	3.84	3.97	3.64	3.97	3.57	4.18	5.34	6.38	3.10	3.77	4.67
	Mean / Media	16.64	17.76	19.61	15.96	15.98	15.60	13.25	15.68	19.09	13.73	11.19	12.15
	Maximum / Máximo	33.55	35.65	42.60	33.93	42.20	39.07	28.50	36.92	38.36	30.74	20.32	20.58
vta_{cc} (m ³)	Minimum / Mínimo	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01
	Mean / Media	1.01	1.07	1.39	0.89	0.86	0.87	0.56	0.65	1.12	0.67	0.51	0.37
	Maximum / Máximo	6.24	12.22	13.42	6.83	11.16	6.28	2.97	5.31	7.24	4.72	5.70	1.36

1 = *Pinus cooperi*, 2 = *P. durangensis*, 3 = *P. arizonica*, 4 = *P. leiophylla*, 5 = *P. teocote*, 6 = *P. engelmannii*, 7 = *P. lumholtzii*, 8 = *P. strobiformis*, 15 = *P. herrerae*, 41 = *Quercus sideroxylla*, 42 = *Q. durifolia* y 66 = *Q. rugosa*.

Statistical Analysis

A first comparative analysis of the data using different volume equations indicated that, for more than 98 % of the species studied, the Schumacher and Hall equation (1933) better described the relationship between the total over bark volume of the stem (vrt_{cc}) as dependent variable and the diameter at breast height and total height as independent variables. Therefore, this study used this equation as the base model to compare the volume estimates among tree species and in the same species among the UMAFOR. The system of additive equations to estimate stem, branches and total tree volume was composed of the following equations:

$$vrt_{cc} = \beta_0 \cdot D^{\beta_1} \cdot H^{\beta_2} + e_i$$

$$vram_{cc} = \beta_3 \cdot D^2 + e_i$$

$$vta_{cc} = \beta_0 \cdot D^{\beta_1} \cdot H^{\beta_2} + \beta_3 \cdot D^2 + e_i$$

where:

vrt_{cc} = Total stem volume of the tree over bark; i. e., the volume of the main stem (m³)

rama se estimó mediante la fórmula de Smalian y las puntas se cubieron mediante la ecuación del cono. El volumen total del árbol se estimó sumando el volumen total con corteza del fuste y el de todas las ramas que superaron los 5 cm al inicio de las mismas. El Cuadro 2 presenta el resumen con las estadísticas descriptivas de los árboles muestra de las especies estudiadas.

Análisis estadístico

Un primer análisis comparativo de los datos utilizando diferentes tarifas de volumen indicó que, para más del 98 % de las especies estudiadas, la ecuación de Schumacher y Hall (1933) se ajustó mejor a la relación entre el volumen rollo total del árbol con corteza (vrt_{cc}) como variable dependiente y el diámetro normal y la altura total como variables independientes. Por ello, en este trabajo se utilizó dicha ecuación como la tarifa base para comparar la estimación del volumen entre especies y en una misma especie entre las UMAFOR. El sistema de ecuaciones aditivas para estimar el volumen del fuste, de ramas y volumen total del árbol quedó integrado por las ecuaciones siguientes:

$$vrt_{cc} = \beta_0 \cdot D^{\beta_1} \cdot H^{\beta_2} + e_i$$

$vram_{cc}$ = Volume of branches over bark (m^3)
 vta_{cc} = Total tree volume over bark ($vta_{cc} + vram_{cc}$, m^3)
 D = Diameter at breast height of the tree (cm)
 H = Total height of the tree (m)
 β_i = Coefficients to be estimated by the regression
 e_i = Residual error (m^3).

To evaluate whether the additive volume equation systems differs among species of the same genus and in the same species among the UMAFOR, two complementary analyzes were used based on the fitting of a reduced and a full equation system (Bates & Watts, 1988). The reduced system corresponded to the same set of global parameters (β_0 , β_1 , β_2 and β_3) for all species belonging to the same genus without distinguishing among them or among the UMAFOR where the same species coexists. The full system corresponded to different sets of parameters for each species or for each UMAFOR, and was obtained by the expansion of the parameters and the inclusion of an associated parameter and a dichotomous variable that allows to differentiate among tree species and among the UMAFOR, according to the case. To perform this test, the minimum sample size required by species within a UMAFOR was 50 individuals; for this reason, in the case of *P. strobiformis*, the test was only conducted in UMAFOR 1006 and 1008.

In the case of the nine species of the genus *Pinus*, the parameters of the system of additive equations expanded, resulting in a new system of three equations with 36 parameters accompanied by a dichotomous variable to differentiate among the tree species. The parameters of the full model were expressed as:

$$\beta_0 = (\beta_{01} + \beta_{02} \cdot I_2 + \beta_{03} \cdot I_3 + \beta_{04} \cdot I_4 + \beta_{05} \cdot I_5 + \beta_{06} \cdot I_6 + \beta_{07} \cdot I_7 + \beta_{08} \cdot I_8 + \beta_{015} \cdot I_{15})$$

$$\beta_1 = (\beta_{11} + \beta_{12} \cdot I_2 + \beta_{13} \cdot I_3 + \beta_{14} \cdot I_4 + \beta_{15} \cdot I_5 + \beta_{16} \cdot I_6 + \beta_{17} \cdot I_7 + \beta_{18} \cdot I_8 + \beta_{115} \cdot I_{15})$$

$$\beta_2 = (\beta_{21} + \beta_{22} \cdot I_2 + \beta_{23} \cdot I_3 + \beta_{24} \cdot I_4 + \beta_{25} \cdot I_5 + \beta_{26} \cdot I_6 + \beta_{27} \cdot I_7 + \beta_{28} \cdot I_8 + \beta_{215} \cdot I_{15})$$

$$\beta_3 = (\beta_{31} + \beta_{32} \cdot I_2 + \beta_{33} \cdot I_3 + \beta_{34} \cdot I_4 + \beta_{35} \cdot I_5 + \beta_{36} \cdot I_6 + \beta_{37} \cdot I_7 + \beta_{38} \cdot I_8 + \beta_{315} \cdot I_{15})$$

β_{0i} , β_{1i} , β_{2i} and β_{3i} are the coefficients to be estimated; I_1 is the dichotomous variable defined as follows (considering *P. cooperi* as the base or reference species): $I_2 = 1$ for the species *P. durangensis* and 0 for the rest, and so on until reaching the species coded by the number 15 (*P. herrerae*). When the comparison was made among species of the genus *Quercus*, $I_2 = 1$ for *Q. durifolia* and 0 for the rest, and so on until reaching the species coded

$$vram_{cc} = \beta_3 \cdot D^2 + e_i$$

$$vta_{cc} = \beta_0 \cdot D^{\beta_1} \cdot H^{\beta_2} + \beta_3 \cdot D^2 + e_i$$

donde:

vta_{cc} = Volumen rollo total del árbol con corteza; es decir, el volumen del fuste principal (m^3)

$vram_{cc}$ = Volumen de las ramas con corteza (m^3)

vta_{cc} = Volumen total del árbol con corteza ($vta_{cc} + vram_{cc}$, m^3)

D = Diámetro normal del árbol (cm)

H = Altura total del árbol (m)

β_i = Coeficientes estimados mediante la regresión

e_i = Error residual (m^3).

Para evaluar si el sistema de ecuaciones aditivas difiere entre especies de un mismo género y en una misma especie entre las UMAFOR, se utilizaron dos análisis complementarios basados en el ajuste de un sistema de ecuaciones reducido y de un sistema completo de ecuaciones (Bates & Watts, 1988). El sistema reducido correspondió al mismo conjunto de parámetros globales (β_0 , β_1 , β_2 y β_3) para todas las especies que pertenecen al mismo género sin distinguir entre ellas ni entre las UMAFOR donde una misma especie coexiste. El sistema completo correspondió a diferentes conjuntos de parámetros para cada especie o para cada UMAFOR, y se obtuvo mediante la expansión de los parámetros y la inclusión de un parámetro asociado y una variable dicotómica que permite diferenciar entre especies y entre las UMAFOR, según sea el caso. Para realizar tal prueba, el tamaño mínimo de muestra requerido por especie dentro de una UMAFOR fue 50 individuos; por tal razón, en el caso de *P. strobiformis*, la prueba solo se hizo en las UMAFOR 1006 y 1008.

En el caso de las nueve especies del género *Pinus*, los parámetros del sistema de ecuaciones aditivas se expandieron, resultando un nuevo sistema de tres ecuaciones con 36 parámetros acompañados de una variable dicotómica para diferenciar entre especies. Los parámetros del modelo completo quedaron expresados como:

$$\beta_0 = (\beta_{01} + \beta_{02} \cdot I_2 + \beta_{03} \cdot I_3 + \beta_{04} \cdot I_4 + \beta_{05} \cdot I_5 + \beta_{06} \cdot I_6 + \beta_{07} \cdot I_7 + \beta_{08} \cdot I_8 + \beta_{015} \cdot I_{15})$$

$$\beta_1 = (\beta_{11} + \beta_{12} \cdot I_2 + \beta_{13} \cdot I_3 + \beta_{14} \cdot I_4 + \beta_{15} \cdot I_5 + \beta_{16} \cdot I_6 + \beta_{17} \cdot I_7 + \beta_{18} \cdot I_8 + \beta_{115} \cdot I_{15})$$

$$\beta_2 = (\beta_{21} + \beta_{22} \cdot I_2 + \beta_{23} \cdot I_3 + \beta_{24} \cdot I_4 + \beta_{25} \cdot I_5 + \beta_{26} \cdot I_6 + \beta_{27} \cdot I_7 + \beta_{28} \cdot I_8 + \beta_{215} \cdot I_{15})$$

$$\beta_3 = (\beta_{31} + \beta_{32} \cdot I_2 + \beta_{33} \cdot I_3 + \beta_{34} \cdot I_4 + \beta_{35} \cdot I_5 + \beta_{36} \cdot I_6 + \beta_{37} \cdot I_7 + \beta_{38} \cdot I_8 + \beta_{315} \cdot I_{15})$$

with the number 66 (*Q. rugosa*). In this case *Q. sideroxylla* was the reference species to expand the system. In the case of the UMAFOR, $I_2 = 1$ for the UMAFOR 1002 and 0 for the rest, and so on until reaching the UMAFOR 1011 (UMAFOR 1001 as reference). The two analyzes performed are described below:

Nonlinear extra sum of squares method

The first statistical analysis performed is known as the additional non-linear squares method (Bates & Watts, 1988) and the appropriate statistical test following a F distribution is defined as:

$$F = \frac{SSE_R - SSE_c}{df_R - df_c} / \frac{SSE_c}{df_c}$$

where:

SSE_R = Sum of squares of the reduced model

df_R = Degrees of freedom of the reduced model

SSE_c = Sum of squares of the full model

df_c = Degrees of freedom of the full model

The statistical decision rule in this analysis for a given level of significance (α) is the following: if $F > F_{critical}$ ($1 - \alpha; df_R - df_c, df_c$) or if the associated probability ($P > F_{critical}$) $< \alpha$, the null hypothesis (H_0 : no difference among species or among the UMAFOR) is rejected. This indicates that different systems of equations are required for the prediction of the volume of the different species of *Pinus* and *Quercus* or for the same species that grows in different UMAFOR. If, on the contrary, $F < F_{critical}$ ($1 - \alpha; df_R - df_c, df_c$) or if the associated probability ($P > F_{critical}$) $> \alpha$, the null hypothesis H_0 is accepted and the same system of equations is proposed for two or more species of the same genus or for the same species in two or more UMAFOR.

Test of significance of the parameters associated to the dichotomous variable

The second statistical analysis consisted of checking the significance of the parameters associated to the dichotomous variable, to differentiate among species and among UMAFOR in the full equation system. In both comparisons (among species and among UMAFOR) the null hypothesis established that the parameters are the same for all species or UMAFOR (i. e., $H_0: \beta_{0i} = \beta_{3i} = 0$) against the alternative hypothesis (H_1) that established that at least one of the system parameters is different. In this analysis, H_0 was rejected when one of the parameters associated to the dichotomous variable, to differentiate among species or among the UMAFOR, was significant ($P < 0.05$). In this case different systems of equations will be required to predict the volume of two or more tree species of the genera *Pinus* and *Quercus* or for the same species in different UMAFOR.

$\beta_{0i}, \beta_{1i}, \beta_{2i}$ y β_{3i} son los coeficientes a estimar; I_i es la variable dicotómica definida de la forma siguiente (considerando a *P. cooperi* como la especie base o de referencia): $I_2 = 1$ para la especie *P. durangensis* y 0 para el resto, y así sucesivamente hasta llegar a la especie codificada mediante el número 15 (*P. herrerae*). Cuando la comparación se hizo entre especies del género *Quercus*, $I_2 = 1$ para *Q. durifolia* y 0 para el resto, y así sucesivamente hasta llegar a la especie codificada con el número 66 (*Q. rugosa*). En este caso *Q. sideroxylla* fue la especie de referencia para expandir el sistema. En el caso de las UMAFOR, $I_2 = 1$ para la UMAFOR 1002 y 0 para el resto, y así sucesivamente hasta llegar a la UMAFOR 1011 (UMAFOR 1001 de referencia). Los dos análisis realizados se describen a continuación:

Método de la suma adicional de cuadrados no lineales

El primer análisis estadístico realizado se conoce como el método de la suma adicional de cuadrados no lineales (Bates & Watts, 1988) y la prueba estadística apropiada que sigue una distribución F se define como:

$$F = \frac{SSE_R - SSE_c}{df_R - df_c} / \frac{SSE_c}{df_c}$$

donde:

SSE_R = Suma de cuadrados del error del modelo reducido

df_R = Grados de libertad asociados al modelo reducido

SSE_c = Suma de cuadrados del error del modelo completo

df_c = Grados de libertad asociados con el modelo completo

La regla de decisión estadística en este análisis para un determinado nivel de significación (α) es la siguiente: si $F > F_{critical}$ ($1 - \alpha; df_R - df_c, df_c$) o si la probabilidad asociada ($P > F_{critical}$) $< \alpha$, se rechaza la hipótesis nula (H_0 : no diferencia entre especies o entre las UMAFOR). Lo anterior indica que se requieren diferentes sistemas de ecuaciones para la predicción del volumen de las distintas especies de *Pinus* y *Quercus* o para una misma especie que crece en diferentes UMAFOR. Si por el contrario $F < F_{critical}$ ($1 - \alpha; df_R - df_c, df_c$) o si la probabilidad asociada ($P > F_{critical}$) $> \alpha$, se acepta la hipótesis nula H_0 y se propone el mismo sistema de ecuaciones para dos o más especies de un mismo género o para una misma especie en dos o más UMAFOR.

Prueba de significancia de los parámetros asociados a la variable dicotómica

El segundo análisis estadístico consistió en comprobar la significancia de los parámetros asociados a la variable dicotómica, para diferenciar entre especies y entre las UMAFOR en el sistema completo. En ambas comparaciones (entre especies y entre las UMAFOR) se estableció la hipótesis nula de que los parámetros son iguales para todas las especies o las UMAFOR (i. e.

In any of the previous analyzes, significant differences among the systems of equations were detected, additional tests were performed to assess whether the differences were caused by as few of two species or in the case of the same species, as few of two UMAFORs as suggested by Barrio-Anta, Balboa, Castedo, Diéguez-Aranda, and Álvarez-González (2006); Calama, Cañadas, and Montero (2003); Corral-Rivas et al. (2007a); Huang, Price, and Titus (2000). Therefore, a full model with its corresponding reduced model was compared for all possible pairs of tree species or UMAFOR, from the analyzes described previously, and only when a non-significant F value was obtained (in this case, a $P > 0.1$ value for type II error protection); or when no associated parameter was significant ($P > 0.05$), the same system of equations was recommended to estimate the volume of the pair of tree species or the UMAFOR under study.

The parameters of the reduced model and full model were obtained simultaneously using the NSUR (Nonlinear Seemingly Unrelated Regression) methodology, using the MODEL procedure of the SAS/ETS® program (Statistical Analysis System [SAS Institute Inc., 2008]), securing the additivity of the volume equations.

Correcting for heteroskedasticity

To correct the heteroskedasticity problem in the volume equations and ensure that the parameter estimates were obtained under homoscedasticity conditions, the fitting was performed using weighted regression, applying the same weights to the inverse of the variance of each observation (Cunia, 1964; Parresol, 1999; Schilaege, 1982). This variance, *a priori* unknown, was estimated using a power function $\sigma_i^2 = \gamma \cdot X^k$. The values of γ and of the exponent k were optimized using the methodology proposed by Harvey (1976), which consists in using the errors of the adjusted model without weights as a dependent variable in the potential model of error variance. The weight considered was $1/D^2$ for the branches over bark volume equation ($vr_{am_{cc}}$) and $1/D^2 \cdot H$ for the stem over bark volume equation ($vr_{ta_{cc}}$).

Results and discussion

Comparison of additive equation systems to estimate volumes among species

The results of the additional sum of non-linear squares obtained in the fitting of the reduced and full systems are shown in Table 3. The value of the F statistics estimated in the comparison to evaluate whether the systems of additive equations differ among tree species of the genus *Pinus* was 6.45, and the probability of finding a critical value greater than 6.45 was lower than 0.0001; therefore, the null hypothesis that a

$H_0: \beta_{0i} = \beta_{3i} = 0$) contra la hipótesis alternativa (H_1) que establece que al menos uno de los parámetros del sistema es diferente. En este análisis se rechazó H_0 cuando uno de los parámetros asociados a la variable dicotómica, para diferenciar entre especies y entre las UMAFOR, resultó significativo ($P < 0.05$). En este caso se requerirán diferentes sistemas de ecuaciones para predecir el volumen de dos o más especies de los géneros *Pinus* y *Quercus* o para una misma especie en diferentes UMAFOR.

Cuando en alguno de los análisis previos se detectó la existencia de diferencias significativas entre los sistemas de ecuaciones, se realizaron pruebas adicionales para evaluar si las diferencias eran causadas únicamente por dos especies o en el caso de una misma especie, solo para dos UMAFOR, tal como lo sugieren Barrio-Anta, Balboa, Castedo, Diéguez-Aranda, y Álvarez-González (2006); Calama, Cañadas, y Montero (2003); Corral-Rivas et al. (2007a); Huang, Price, y Titus (2000). Por lo tanto, se comparó un modelo completo con su correspondiente modelo reducido para todos los posibles pares de especies o de UMAFOR, a partir de los análisis descritos con anterioridad, y solamente cuando se obtuvo un valor F no significativo (en este caso, un valor de $P > 0.1$ para protección del error tipo II); cuando ningún parámetro asociado resultó significativo ($P > 0.05$) se recomendó el mismo sistema de ecuaciones para la estimación del volumen del par de especies o de las UMAFOR en estudio.

Los parámetros del modelo reducido y del modelo completo se obtuvieron de forma simultánea utilizando la metodología NSUR (*Nonlinear Seemingly Unrelated Regression*), mediante el procedimiento MODEL del programa SAS/ETS® (Statistical Analysis System [SAS Institute Inc., 2008]), garantizando así la aditividad de las ecuaciones de volumen.

Corrección de heterocedasticidad

Para corregir el problema de heterocedasticidad en las ecuaciones de volumen y garantizar que las estimaciones de los parámetros se obtuvieran bajo condiciones de homocedasticidad, el ajuste se realizó utilizando regresión ponderada, aplicando los mismos pesos a la inversa de la varianza de cada observación (Cunia, 1964; Parresol, 1999; Schilaege, 1982). Dicha varianza, *a priori* desconocida, se estimó utilizando una función potencial $\sigma_i^2 = \gamma \cdot X^k$. Los valores de γ y del exponente k se optimizaron empleando la metodología propuesta por Harvey (1976) que consiste en emplear los errores del modelo ajustado sin pesos como variable dependiente en el modelo potencial de varianza del error. El peso considerado fue $1/D^2$ para la ecuación de volumen de las ramas con corteza ($vr_{am_{cc}}$) y $1/D^2 \cdot H$ para la ecuación de volumen rollo total del árbol con corteza ($vr_{ta_{cc}}$).

Table 3. F test to evaluate differences in the volume of the 12 species studied in 11 units of regional forest management (UMAFOR) in the state of Durango.

Cuadro 3. Prueba F para evaluar diferencias en el volumen de las 12 especies estudiadas en 11 unidades de manejo forestal regional (UMAFOR) del estado de Durango.

Comparison/ Combinación	N	SSE _C	df _C	SSE _R	df _R	F	P > F
All <i>Pinus</i> species/ Todas las especies <i>Pinus</i>	9,210	225	9,174	229.60	9206	6.45	<0.0001
1-2	2,957	72.72	2,948	77.49	2,952	48.34	<0.0001
1-3	1,826	48.16	1,818	63.13	1,822	141.24	<0.0001
1-4	2,460	51.86	2,452	55.85	2,456	47.22	<0.0001
1-5	2,502	55.99	2,494	63.21	2,498	80.45	<0.0001
1-6	2,343	49.81	2,335	51.77	2,339	22.98	<0.0001
1-7	1,575	36.93	1,567	39.49	1,571	27.24	<0.0001
1-8	1,485	33.80	1,477	48.96	1,481	165.62	<0.0001
1-15	1,755	51.49	1,747	57.66	1,751	52.29	<0.0001
2-3	2,585	74.87	2,576	75.40	2,580	4.58	<0.0001
2-4	2,219	56.42	2,905	56.71	2,909	3.08	<0.0001
2-5	3,261	70.83	3,252	71.26	3,256	58.34	<0.0001
2-6	3,102	64.62	3,093	64.99	3,097	4.42	<0.0001
2-7	2,334	52.11	2,325	52.67	2,329	6.20	<0.0001
2-8	2,244	48.54	2,235	56.25	2,239	88.78	<0.0001
2-15	2,514	66.02	2,505	66.28	2,509	2.50	0.04
3-4	2,088	54.27	2,080	54.87	2,084	5.68	<0.0001
3-5	2,130	58.63	2,122	60.43	2,126	16.26	<0.0001
3-6	1,971	48.89	1,808	49.15	1,812	2.40	0.04
3-7	1,203	39.71	1,195	40.52	1,199	6.11	<0.0001
3-8	1,113	36.29	1,105	45.56	1,109	70.58	<0.0001
3-15	1,383	53.73	1,375	55.18	1,379	9.28	<0.0001
4-5	2,764	50.03	2,756	50.66	2,760	8.64	<0.0001
4-6	2,605	43.77	2,597	44.10	2,601	5.00	<0.0001
4-7	1,837	31.15	1,829	31.76	1,833	9.03	<0.0001
4-8	1,747	27.67	1,739	34.08	1,743	100.83	<0.0001
4-15	2,017	43.54	1,924	43.91	1,928	4.20	<0.0001
5-6	2,457	47.95	2,639	49.44	2,643	20.49	<0.0001
5-7	1,844	34.06	1,799	34.29	1,803	2.90	0.02
5-8	1,754	32.01	1,781	37.33	1,785	73.93	<0.0001
5-15	2,024	32.13	2,051	32.38	2,055	4.09	<0.0001
6-7	1,565	29.27	1,712	30.25	1,716	14.30	<0.0001
6-8	1,475	25.93	1,622	34.09	1,626	127.59	<0.0001
6-15	1,745	43.32	1,892	44.36	1,896	11.38	<0.0001
7-8	862	13.24	854	14.62	858	22.27	<0.0001
7-15	1,132	15.80	1,124	16.28	1,128	8.54	<0.0001
8-15	1,042	27.33	1,034	32.56	1,038	49.55	<0.0001
All <i>Quercus</i> species/ Todas las especies <i>Quercus</i>	1,618	18.70	1,610	19.20	1,614	11.09	<0.0001
41-42	1,477	38.08	1,469	40.15	1,473	20.05	<0.0001
41-66	1,425	32.53	1,417	32.57	1,421	0.43	0.78
42-66	334	6.98	326	7.12	330	1.65	0.16

A value $P < 0.1$ indicates that the models are different. N = Number of trees, SSE_C = Sum of squares of the error of the full model, df_C = Degrees of freedom associated with the full model, SSE_R = Sum of squares of the error of the reduced model, df_R = Degrees of freedom associated with the reduced model. 1 = *Pinus cooperi*, 2 = *P. durangensis*, 3 = *P. arizonica*, 4 = *P. leiophylla*, 5 = *P. teocote*, 6 = *P. engelmannii*, 7 = *P. lumholtzii*, 8 = *P. strobiliformis*, 15 = *P. herrerae*, 41 = *Quercus sideroxylo*, 42 = *Q. durifolia* and 66 = *Q. rugosa*.

Un valor $P < 0.1$ indica que los modelos son diferentes. N = Número de individuos, SSE_C = Suma de cuadrados del error con el modelo completo, df_C = grados de libertad asociados con el modelo completo, SSE_R = Suma de cuadrados del error con el modelo reducido, df_R = Grados de libertad asociados con el modelo reducido. 1 = *Pinus cooperi*, 2 = *P. durangensis*, 3 = *P. arizonica*, 4 = *P. leiophylla*, 5 = *P. teocote*, 6 = *P. engelmannii*, 7 = *P. lumholtzii*, 8 = *P. strobiliformis*, 15 = *P. herrerae*, 41 = *Quercus sideroxylo*, 42 = *Q. durifolia* y 66 = *Q. rugosa*.

single system of equations suitable for all pine species together, was rejected.

In the comparison made to evaluate whether the system of additive equations differs among the three species of the genus *Quercus*, the F value was 11.09, and the probability of finding a critical value greater than 11.09 was lower than 0.0001; therefore, the null hypothesis of a unique model for the three oak species, was also rejected.

The results of the additional tests performed to assess whether differences were caused by as few as two or as many as the nine pine species are also shown in Table 3. It was found that the 36 paired comparisons produced significant F -values, suggesting that significantly different equations systems are required for the nine pine species ($P < 0.1$). On the other hand, the results of the paired evaluation of the three oak species indicate that *Q. sideroxyla* and *Q. durifolia* need different systems of volume equations; while *Q. sideroxyla* and *Q. rugosa*, and *Q. durifolia* and *Q. rugosa* did not differ significantly ($P > 0.1$).

The results of the second analysis showed that, during the fitting of the full model, most of the parameters associated with the dichotomous variable used to differentiate among species were significant ($P < 0.05$) (Table 4). Comparisons among species of the genus *Pinus* indicate that at least one of the parameters associated to the dichotomous variable, to differentiate among species and among UMAFOR in the full model (β_{01} , β_{11} , β_{21}) was significant ($P < 0.05$). In the case of *Quercus*, the results suggest significant differences among the models developed for the species *Q. sideroxyla* and *Q. rugosa* and between *Q. sideroxyla* and *Q. durifolia*, and consistently with the method of the additional sum of non-linear squares there were non significant differences among the systems of equations developed for *Q. sideroxyla* and *Q. rugosa*.

The results of the two statistical analyzes to evaluate differences in volume of the 12 species studied were consistent in 97.4 % of the cases studied, indicating the rejection of the null hypothesis of a single equation system. Only a discrepancy between the two statistical tests was observed, which consisted in that the additional sum of non-linear squares recommends the use of a reduced model to estimate the volume of *Q. durifolia* and *Q. rugosa*, while the parameter significance analysis recommends using different models.

In this study, we decided to reject the null hypothesis of a single model, if one of the two statistical tests performed suggests rejection. This was based on the fact that there is information at the tree species level for the development of the models, and according to the results of this study only the volume of *Q. sideroxyla* and *Q. rugosa* could be estimated with the same system of equations.

Resultados y discusión

Comparación de sistemas de ecuaciones aditivas para la estimación de volumen entre especies

Los resultados del método de la suma adicional de cuadrados no lineales obtenidos en el ajuste de los sistemas reducido y completo se muestran en el Cuadro 3. El valor del estadístico F estimado en la comparación para evaluar si el sistema de ecuaciones aditivas difiere entre las especies del género *Pinus* fue de 6.45, y la probabilidad de encontrar un valor crítico mayor que 6.45 fue menor que 0.0001; por lo tanto, se rechazó la hipótesis nula de que un modelo único es adecuado para todas las especies de pino juntas.

En la comparación realizada para evaluar si el sistema de ecuaciones aditivas difiere entre las tres especies del género *Quercus*, el valor F fue 11.09, y la probabilidad de encontrar un valor crítico mayor que 11.09 fue menor que 0.0001; por lo tanto, también se rechazó la hipótesis nula de un modelo único para las tres especies de encino.

Los resultados de las pruebas adicionales para evaluar si las diferencias son causadas solo por dos, o bien por las nueve especies de pino, se muestran también en el Cuadro 3. Se encontró que en ninguna de las 36 comparaciones pareadas se debe rechazar la hipótesis nula de un modelo único para el par analizado ($P < 0.1$). Por otro lado, los resultados de la evaluación pareada de las tres especies de encino indican que las especies *Q. sideroxyla* y *Q. durifolia* requieren diferentes sistemas de ecuaciones de volumen; mientras que las comparaciones *Q. sideroxyla* y *Q. rugosa*, y *Q. durifolia* y *Q. rugosa* no difirieron significativamente ($P > 0.1$).

Los resultados del segundo análisis mostraron que, en el ajuste del modelo completo, la mayoría de los parámetros asociados a la variable dicotómica utilizada para diferenciar entre las especies fueron significativos ($P < 0.05$) (Cuadro 4). Las comparaciones entre especies del género *Pinus* indican que al menos uno de los parámetros asociados a la variable dicotómica, para diferenciar entre especies y entre UMAFOR en el modelo completo (β_{01} , β_{11} , β_{21}) fue significativo ($P < 0.05$). En el caso de *Quercus*, los resultados sugieren diferencias significativas entre los modelos desarrollados para las especies *Q. sideroxyla* y *Q. rugosa* y entre *Q. sideroxyla* y *Q. durifolia*, y consistentemente con el método de la suma adicional de cuadrados no lineales no existen diferencias significativas entre los sistemas de ecuaciones desarrolladas para *Q. sideroxyla* y *Q. rugosa*.

Los resultados de los dos análisis estadísticos para evaluar diferencias en volumen de las 12 especies estudiadas fueron consistentes en 97.4 % de los casos estudiados, indicando el rechazo de la hipótesis

Table 4. Parameters associated with the dichotomous variable used to differentiate among species (β_{01} , β_{11} and β_{21}).
Cuadro 4. Parámetros asociados a la variable dicotómica utilizada para diferenciar entre especies (β_{01} , β_{11} y β_{21}).

Comparison/ Combinación	β_0	β_{01}	β_1	β_{11}	β_2	β_{21}	β_3	β_{31}
1-2	4.91E-05	1.08E-05	1.9855	0.0085	0.9771	-0.0870	6.21E-05	-1.75E-05
1-4	4.84E-05	9.25E-06	1.9875	0.0340	0.9791	-0.1112	6.09E-05	-1.64E-05
1-5	4.92E-05	2.02E-05	1.9809	-0.0410	0.9820	-0.0803	6.14E-05	-1.7E-05
1-6	4.87E-05	6.15E-06	1.9862	0.0142	0.9790	-0.0686	6.1E-05	-6.83E-07
1-7	4.89E-05	2.78E-05	1.9844	0.0351	0.9798	-0.2221	6.13E-05	2.58E-05
1-8	4.83E-05	1.78E-05	1.9903	-0.0226	0.9765	-0.1310	6.1E-05	-1.94E-05
1-15	4.88E-05	1.13E-05	1.9812	-0.0035	0.9835	-0.0852	6E-05	-1.39E-05
2-3	6.08E-05	2.3E-06	1.9878	-0.0032	0.8938	-0.0003	4.53E-05	-1.45E-05
2-4	6.04E-05	-2.4E-06	1.9911	0.0206	0.8916	-0.0128	4.49E-05	4.57E-07
2-5	6.07E-05	9.17E-06	1.9884	-0.0517	0.8932	0.0099	4.5E-05	1.44E-06
2-6	6.05E-05	-4.64E-06	1.9900	0.0006	0.8921	0.0240	4.48E-05	1.68E-05
2-7	6.09E-05	1.7E-05	1.9866	0.0059	0.8942	-0.1080	4.51E-05	4.31E-05
2-8	6.07E-05	6.05E-06	1.9893	-0.0481	0.8920	-0.0181	4.52E-05	-2.52E-06
2-15	6.02E-05	1.12E-06	1.9898	-0.0130	0.8939	-0.0002	4.47E-05	3.9E-06
3-4	6.32E-05	-5.39E-06	1.9854	0.0140	0.8921	0.0029	3.04E-05	1.48E-05
3-5	6.32E-05	5.86E-06	1.9846	-0.0426	0.8931	0.0081	3.06E-05	1.65E-05
3-6	6.32E-05	-6.98E-06	1.9851	0.0035	0.8923	0.0241	3.02E-05	3.15E-05
3-7	6.3E-05	1.21E-05	1.9829	0.0095	0.8961	-0.0936	3.06E-05	5.93E-05
3-8	6.27E-05	2.8E-06	1.9846	-0.0599	0.8952	0.0055	3.09E-05	1.22E-05
3-15	6.26E-05	-1.82E-06	1.9850	0.0020	0.8955	-0.0105	2.99E-05	1.94E-05
4-5	5.85E-05	1.17E-05	2.0132	-0.0778	0.8740	0.0297	4.5E-05	4.83E-07
4-6	5.84E-05	-3.11E-06	2.0206	-0.0270	0.8652	0.0512	4.47E-05	1.61E-05
4-7	5.87E-05	2.15E-05	2.0203	-0.0278	0.8636	-0.0892	4.49E-05	4.19E-05
4-8	5.82E-05	8.59E-06	2.0219	-0.0639	0.8646	-0.0107	4.5E-05	-2.92E-06
4-15	5.83E-05	2.7E-06	2.0079	-0.0353	0.8811	0.0194	4.42E-05	2.86E-06
5-6	7.06E-05	-1.47E-05	1.9311	0.0552	0.9070	0.0144	4.45E-05	1.66E-05
5-7	7.14E-05	9.47E-06	1.9222	0.0540	0.9144	-0.1217	4.5E-05	4.16E-05
5-8	7.06E-05	-3.71E-06	1.9329	0.0078	0.9047	-0.0305	4.6E-05	-3.92E-06
5-15	6.94E-05	-7.74E-06	1.9340	0.0369	0.9091	-0.0099	4.44E-05	3.12E-06
6-7	5.6E-05	2.63E-05	1.9822	-0.0039	0.9261	-0.1431	6.07E-05	2.29E-05
6-8	5.56E-05	1.17E-05	1.9903	-0.0373	0.9185	-0.0607	6.09E-05	-1.98E-05
6-15	5.55E-05	6.16E-06	1.9894	-0.0191	0.9198	-0.0198	6.02E-05	-1.42E-05
7-8	8.52E-05	-1.66E-05	1.9549	-0.0113	0.7988	0.0641	8.38E-05	-4.23E-05
7-15	7.73E-05	-1.53E-05	1.9952	-0.0318	0.7864	0.1203	8.71E-05	-4.11E-05
8-15	6.53E-05	-4.29E-06	1.9424	0.0306	0.8806	0.0195	4.14E-05	5.5E-06
41-42	5.02E-05	2.62E-05	1.9503	-0.1631	0.9562	0.0370	7.57E-05	0.00015
41-66	5.02E-05	2.62E-05	1.9503	-0.1631	0.9562	0.0370	7.57E-05	0.00015
42-66	8.11E-05	-2.14E-05	1.7838	0.1550	0.9698	-0.0705	0.000219	-0.000133

The parameters marked in bold were not significant ($P > 0.05$). Note that in the comparison between *Q. sideroxyla* and *Q. rugosa* equation systems, none of the additive parameters were significant. 1 = *Pinus cooperi*, 2 = *P. durangensis*, 3 = *P. arizonica*, 4 = *P. leiophylla*, 5 = *P. teocote*, 6 = *P. engelmannii*, 7 = *P. lumholtzii*, 8 = *P. strobiliformis*, 15 = *P. herrerae*, 41 = *Quercus sideroxyla*, 42 = *Q. durifolia* and 66 = *Q. rugosa*.

Los parámetros marcados en negritas fueron no significativos ($P > 0.05$). Nótese que en la comparación entre los sistemas de ecuaciones de *Q. sideroxyla* y *Q. rugosa*, ninguno de los parámetros aditivos resultó significativo. 1 = *Pinus cooperi*, 2 = *P. durangensis*, 3 = *P. arizonica*, 4 = *P. leiophylla*, 5 = *P. teocote*, 6 = *P. engelmannii*, 7 = *P. lumholtzii*, 8 = *P. strobiliformis*, 15 = *P. herrerae*, 41 = *Quercus sideroxyla*, 42 = *Q. durifolia* y 66 = *Q. rugosa*.

The results of the comparison among species of the same genus are consistent with those reported by Corral-Rivas et al. (2007a) and Corral-Rivas et al. (2007b) who also observed significant differences in models developed to estimate the diameter at breast height and volume from stump dimensions and compatible taper and volume functions in five species of *Pinus* in a forest region of Durango, respectively. Corral-Rivas et al. (2004) also reported significant differences in growth in dominant height in five of the species of the genus *Pinus* analyzed in this study. Moreover, Quiñonez-Barraza et al. (2014) found differences in the height at which the inflection points of profile equations occur in some of the species considered in this study.

The main causes of the statistical differences observed in the volume of the species studied are related to differences in the stem profile (Corral-Rivas et al., 2007b; Quiñonez-Barraza et al., 2014) and with specific requirements of site quality of the species analyzed (Corral-Rivas et al., 2004).

Comparison of additive equation systems to estimate volume among ecoregions

The *F* statistic value calculated in the comparison made to evaluate whether the systems of equations for the same species differ among the UMAFOR was lower than the critical value ($P < 0.1$) in all species analyzed, except for *P. strobiformis* and *Q. rugosa* (Table 5). Therefore, we reject the null hypothesis of the formulation of a single model for all UMAFOR in 10 of the 12 species studied. The results of additional tests performed to assess whether differences are caused by as few as two or as many as all the UMAFOR are not shown in this study because of the space they would occupy; however, indicate that 111 of the 285 paired comparisons did not reject the null hypothesis of a single model for the UMAFOR pair ($P > 0.1$) analyzed, while the rest (61 % of pairs) rejected the null hypothesis of a unique model for the pairs of UMAFOR analyzed.

The results of the significance analysis of the parameters are also not shown for reasons of space, but we observed that the parameters associated to the dichotomous variable used to differentiate among UMAFOR ($\beta_{01}, \beta_{11}, \beta_{21}$) were significant ($P < 0.05$) in most of the full model fits. According to this analysis, only 15 comparisons performed among UMAFOR (5 % of cases) did not reject the null hypothesis of the formulation of a single model.

In relation to the previous analysis, the absence of regional differences in the volume of *P. strobiformis* turns out to be interesting; this result can be related to a similarity of ecological conditions of the sites where this species develops, since it normally grows in wet shaded areas (Aguilera, 2001). The differences found in volume

nula de un modelo único. Únicamente se observó una discrepancia entre las dos pruebas estadísticas realizadas, la cual consistió en que la suma adicional de cuadrados no lineales recomienda el uso de un modelo reducido para estimar el volumen de *Q. durifolia* y *Q. rugosa*, mientras que el análisis de la significancia de los parámetros recomienda emplear modelos diferentes.

En este trabajo se decidió rechazar la hipótesis nula de un modelo único, si en alguna de las dos pruebas estadísticas realizadas se sugiere el rechazo. Lo anterior se fundamentó en el hecho de que se cuenta con información a nivel de especie para el desarrollo de los modelos, y de acuerdo con los resultados de este trabajo solamente el volumen de las especies *Q. sideroxyla* y *Q. rugosa* podría estimarse con un mismo sistema de ecuaciones.

Los resultados de la comparación entre especies de un mismo género son consistentes con los reportados por Corral-Rivas et al. (2007a) y Corral-Rivas et al. (2007b), quienes observaron también diferencias significativas en modelos desarrollados para estimar el diámetro normal y el volumen a partir de las dimensiones del tocón, y en funciones compatibles de ahusamiento y volumen en cinco especies del género *Pinus* en una región forestal de Durango, respectivamente. Corral-Rivas et al. (2004) también reportaron diferencias significativas en el crecimiento en altura dominante en cinco de las especies del género *Pinus* analizadas en este estudio. Por su parte, Quiñonez-Barraza et al. (2014) encontraron diferencias en la altura a la que ocurren los puntos de inflexión de ecuaciones de perfil en algunas de las especies consideradas en este trabajo.

Las principales causas de las diferencias estadísticas observadas en el volumen de las especies estudiadas se relacionan con diferencias en el perfil del fuste (Corral-Rivas et al., 2007b; Quiñonez-Barraza et al., 2014) y con requerimientos específicos de calidad de estación de las especies analizadas (Corral-Rivas et al., 2004).

Comparación de sistemas de ecuaciones aditivas para la estimación de volumen entre ecorregiones

El valor del estadístico *F* calculado en la comparación realizada para evaluar si los sistemas de ecuaciones para una misma especie difieren entre las UMAFOR fue menor que el valor crítico ($P < 0.1$) en todas las especies analizadas, con excepción de *P. strobiformis* y *Q. rugosa* (Cuadro 5). Por tanto, se rechaza la hipótesis nula de la formulación de un único modelo para todas las UMAFOR en 10 de las 12 especies estudiadas. Los resultados de las pruebas adicionales realizadas para evaluar si las diferencias son causadas únicamente por dos o por más de las UMAFOR no se muestran en este artículo debido al espacio que ocuparían; sin embargo, indican que en 111 de las 285 comparaciones pareadas no fue posible rechazar la hipótesis nula de un modelo

Table 5. Results of the nonlinear extra sum of squares used to evaluate regional differences in the volume of the 12 species studied in 11 regional forest management units (UMAFOR) in Durango.

Cuadro 5. Resultados de la suma adicional de cuadrados no lineales utilizada para evaluar diferencias regionales en el volumen de las 12 especies estudiadas en 11 unidades de manejo forestal regional (UMAFOR) del estado de Durango.

Species/ Especie	UMAFOR	N	SSE _c	df _c	SSE _r	df _r	F	P > F
1	7	1,072	25.04	1,040	28.51	1,068	5.10	<0.0001
2	11	1,704	39.10	1,661	41.14	1,700	2.20	<0.0001
3	5	727	29.63	719	31.38	723	10.56	<0.0001
4	9	1,170	16.33	1,162	20.23	1,166	69.31	<0.0001
5	9	1,368	20.79	1,360	26.68	1,364	96.23	<0.0001
6	10	1,244	16.60	1,236	21.02	1,240	82.37	<0.0001
7	3	333	2.00	325	2.54	329	22.00	<0.0001
8	2	222	0.83	214	0.86	218	1.99	0.10
15	6	653	19.15	645	22.31	649	26.66	<0.0001
41	10	1,284	28.40	1,276	31.59	1,280	35.84	<0.0001
42	2	193	1.65	185	6.09	189	124.60	<0.0001
66	2	125	0.91	117	0.96	120	2.10	0.10

*The null hypothesis of a single model ($P \geq 0.01$) is not rejected. N = number of trees, SSE_c = Sum of squares of the error of the full model, df_c = Degrees of freedom associated with the full model, SSE_r = Sum of squares of the error of the reduced model, df_r = Degrees of freedom associated with the reduced model. 1 = *Pinus cooperi*, 2 = *P. durangensis*, 3 = *P. arizonica*, 4 = *P. leiophylla*, 5 = *P. teocote*, 6 = *P. engelmannii*, 7 = *P. lumholtzii*, 8 = *P. strobiformis*, 15 = *P. herrerae*, 41 = *Quercus sideroxylla*, 42 = *Q. durifolia* and 66 = *Q. rugosa*.

*No se rechaza la hipótesis nula de un modelo único ($P \geq 0.01$). N = Número de individuos, SSE_c = Suma de cuadrados del error con el modelo completo, df_c = Grados de libertad asociados con el modelo completo, SSE_r = Suma de cuadrados del error con el modelo reducido, df_r = Grados de libertad asociados con el modelo reducido. 1 = *Pinus cooperi*, 2 = *P. durangensis*, 3 = *P. arizonica*, 4 = *P. leiophylla*, 5 = *P. teocote*, 6 = *P. engelmannii*, 7 = *P. lumholtzii*, 8 = *P. strobiformis*, 15 = *P. herrerae*, 41 = *Quercus sideroxylla*, 42 = *Q. durifolia* y 66 = *Q. rugosa*.

in a species that grows in more than one UMAFOR are attributed to differences in the residual density, caused mainly by the application of silvicultural treatments (Larson, 1963), to the type of soil and precipitation. Castedo, Barrio, Parresol, and Álvarez-González (2005) recommended a different equation for modeling the height-diameter relationship of *Pinus pinaster* Ait in some forest regions of northern Spain. Calama et al. (2003) also propose different equations of site index for *Pinus pinea* L. in forest regions of Spain. To date, no studies have been reported in Mexico to evaluate regional differences in some type of forest growth models, so there is a need to perform other studies confirming the results found, especially for the species *P. strobiformis*, because in this study there was an adequate sample size only for two UMAFOR (1006 and 1008).

Table 6 shows the estimates of the parameters derived from equation systems fit, the adjusted coefficient of determination (R^2_{aj}) and the root mean square error (REMC) for the different equations that integrate the systems of additive volume equations developed in this study. These systems of equations explained on average 97, 34 and 96 % of the variance observed in the stem volume, branch volume and total tree volume, respectively.

único para el par de UMAFOR analizado ($P > 0.1$), mientras que en el resto (61 % de los pares) se rechaza la hipótesis nula de un modelo único para los pares de UMAFOR analizados.

Los resultados del análisis de la significancia de los parámetros tampoco se muestran por motivos de espacio, pero se observó que los parámetros asociados a la variable dicotómica utilizada para diferenciar entre UMAFOR (β_{01} , β_{11} , β_{21}) fueron significativos ($P < 0.05$) en la mayoría de los ajustes del modelo completo. De acuerdo con este análisis, solo en 15 comparaciones realizadas entre UMAFOR (5 % de los casos) no fue posible rechazar la hipótesis nula de la formulación de un modelo único.

En relación con el análisis anterior, resulta interesante la inexistencia de diferencias regionales en el volumen de *P. strobiformis*; dicho resultado puede estar relacionado con una similitud de condiciones ecológicas de los sitios donde esta especie se desarrolla, ya que crece normalmente en áreas húmedas y con sombra suficiente (Aguilera, 2001). Las diferencias encontradas en volumen dentro de una especie que crece en más de una UMAFOR se atribuyen a diferencias en la densidad residual, causadas principalmente por la aplicación

Table 6. Parameter estimates of the volume equation systems developed in this study for 12 timber species in Durango.

Cuadro 6. Parámetros estimados en los sistemas de ecuaciones aditivas de volumen desarrollados para 12 especies maderables en el estado de Durango.

Species / Especie	Parameter estimates / Parámetros				vrta _{cc}		vramas _{cc}		vta _{cc}	
	β_0	β_1	β_2	β_3	REMC	R ² aj.	REMC	R ² aj.	REMC	R ² aj.
1	0.000058	1.934384	0.986875	0.000059	0.131	0.98	0.105	0.35	0.165	0.97
2	0.000061	1.970438	0.916467	0.000042	0.140	0.98	0.070	0.34	0.153	0.98
3	0.000063	1.973039	0.908113	0.000031	0.198	0.98	0.072	0.18	0.208	0.98
4	0.000062	1.989640	0.884421	0.000044	0.111	0.98	0.081	0.31	0.132	0.98
5	0.000071	1.903127	0.939725	0.000048	0.119	0.98	0.078	0.29	0.14	0.97
6	0.000057	1.984667	0.922042	0.000061	0.097	0.99	0.086	0.33	0.132	0.98
7	0.000088	1.893291	0.862257	0.000084	0.086	0.97	0.081	0.36	0.131	0.95
8	0.000070	1.913666	0.894689	0.000036	0.102	0.98	0.053	0.27	0.112	0.98
15	0.000061	1.900093	0.984575	0.000064	0.135	0.98	0.097	0.40	0.185	0.97
41	0.000050	1.974851	0.928771	0.000065	0.115	0.97	0.111	0.27	0.157	0.96
42	0.000030	1.964724	1.101723	0.000168	0.084	0.95	0.185	0.48	0.196	0.89
66	0.000053	1.981578	0.887948	0.000078	0.065	0.95	0.046	0.55	0.084	0.94

1 = *Pinus cooperi*, 2 = *P. durangensis*, 3 = *P. arizonica*, 4 = *P. leiophylla*, 5 = *P. teocote*, 6 = *P. engelmannii*, 7 = *P. lumholtzii*, 8 = *P. strobiformis*, 15 = *P. herrerae*, 41 = *Quercus sideroxyla*, 42 = *Q. durifolia* y 66 = *Q. rugosa*. vrta_{cc} = Stem volumen over bark (m³), vramas_{cc} = Volume of branches overbark (m³), vta_{cc} = Total tree volumen overbark (m³), REMC = Root mean square error (m³) and R²aj = Adjusted coefficient of determination.

1 = *Pinus cooperi*, 2 = *P. durangensis*, 3 = *P. arizonica*, 4 = *P. leiophylla*, 5 = *P. teocote*, 6 = *P. engelmannii*, 7 = *P. lumholtzii*, 8 = *P. strobiformis*, 15 = *P. herrerae*, 41 = *Quercus sideroxyla*, 42 = *Q. durifolia* y 66 = *Q. rugosa*. vrta_{cc} = Volumen rollo total del árbol con corteza (m³), vramas_{cc} = Volumen de ramas con corteza (m³), vta_{cc} = Volumen total del árbol con corteza (m³), REMC = Raíz del error medio cuadrático (m³) y R²aj = Coeficiente de determinación ajustado.

Conclusions

The results of the statistical tests corresponding to the additional non-linear squares method and the significance of the parameters indicate the need to use species-specific models for all analyzed tree species and regional models for 10 of the species studied. Additional tests to assess whether the existence of differences is caused by as few as two or as many as all nine species of the genus *Pinus* indicate that each species requires its own model, while comparisons among species of the genus *Quercus* indicate that *Q. sideroxyla* and *Q. rugosa* do not differ significantly. On the other hand, only 15 of 285 pairs (5 % of the cases) of the UMAFOR could not reject the hypothesis of a single model to evaluate regional differences in the volume of the species. According to the results, the species-specific and regional models developed in this study are recommended for the following species: *P. cooperi*, *P. durangensis*, *P. arizonica*, *P. leiophylla*, *P. teocote*, *P. engelmannii*, *P. lumholtzii* and *Q. sideroxyla*; and a state model for *P. strobiformis* and *Q. rugosa*, until more data are available to confirm this result.

de los tratamientos silvícolas (Larson, 1963), al tipo de suelo y a la precipitación. Castedo, Barrio, Parresol, y Álvarez-González (2005) recomendaron una ecuación diferente para modelar la relación altura-diámetro de *Pinus pinaster* Ait, en algunas regiones forestales del norte de España. Calama et al. (2003) proponen también diferentes ecuaciones de índice de sitio para *Pinus pinea* L. en regiones forestales de España. Hasta la fecha, en México no se han reportado estudios que evalúen diferencias regionales en algún tipo de modelo de crecimiento forestal, por lo que existe la necesidad de realizar otros trabajos que confirmen los resultados encontrados, especialmente para la especie *P. strobiformis*, debido a que en este estudio se contó con un tamaño de muestra adecuado solo para dos UMAFOR (1006 y 1008).

El Cuadro 6 presenta los estimadores de los parámetros derivados del ajuste, el coeficiente de determinación ajustado (R²_{aj}) y la raíz del error medio cuadrático (REMC) para las distintas ecuaciones que integran los sistemas de ecuaciones aditivas desarrolladas en este trabajo. Estos sistemas de ecuaciones explicaron en promedio 97, 34 y 96 % de la varianza observada

Acknowledgments

We thank the Program *Fomento a la Organización Social, Planeación y Desarrollo Regional Forestal (PROFOS)* of CONAFOR for funding the collection of the data used in this study.

End of English version

References / Referencias

- Aguilera, R. M. (2001). *Pinus ayacahuite* Ehren, *paquete tecnológico*. México: CONAFOR.
- Barrio-Anta, M., Balboa, M., Castedo, D. F., Diéguez-Aranda, U., & Álvarez-González, J. G. (2006). An ecoregional model for estimating volume, biomass and carbon pools in maritime pine stands in Galicia (northwestern Spain). *Forest Ecology and Management*, 223, 24–34. doi:10.1016/j.foreco.2005.10.073
- Bates, D. M., & Watts, D. G. (1988). *Nonlinear regression analysis and its applications*. New York, USA: Wiley.
- Calama, R., Cañadas, N., & Montero, G. (2003). Inter-regional variability in site index models for even-aged stands of stone pine (*Pinus pinea* L.) in Spain. *Annals of Forest Science*, 60, 259–269. doi: 10.1051/forest:2003017
- Castedo, F., Barrio, M., Parresol, B. R., & Álvarez-González, J. G. (2005). A stochastic height-diameter model for maritime pine ecoregions in Galicia (north-western Spain). *Annals of Forest Science*, 62, 455–465. doi: 10.1051/forest:2005042
- Corral-Rivas, J. J., Álvarez-González, J. G., Ruíz-González, A. D., & Gadow, K. V. (2004). Compatible height and site index models for five pine species in El Salto Durango (Mexico). *Forest Ecology and Management*, 201, 145–160. doi:10.1016/j.foreco.2004.05.060
- Corral-Rivas, J. J., Barrio, A. M., Diéguez-Aranda, U., & Aguirre, C. O. (2007a). Use of stump diameter to estimate diameter at breast height and tree volume for major pines species in El Salto, Durango (Mexico). *Forestry*, 80, 29–40. doi: 10.1093/forestry/cpl048
- Corral-Rivas, J. J., Diéguez-Aranda, U., Castedo, F., & Corral-Rivas, S. (2007b). A merchantable volume system for major pine species in El Salto, Durango (Mexico). *Forest Ecology and Management*, 238, 118–129. doi: 10.1016/j.foreco.2006.09.074
- Corral-Rivas, S., Álvarez-González, J. G., Crecente-Campo, F., & Corral-Rivas, J. J. (2014). Local and generalized height-diameter models with random parameters for mixed, uneven-aged forests in Northwestern Durango, Mexico. *Forest Ecosystems*, 1(6). doi: 10.1186/2197-5620-1-6
- Corral-Rivas, S., Álvarez-González, J. G., Corral-Rivas, J. J., & López-Sánchez, C. A. (2015). Characterization of diameter structures of natural forests of northwest of Durango, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 21(2), 221–236. doi: 10.5154/r.rchscfa.2014.10.046

en el volumen rollo total del árbol, volumen de ramas y volumen total árbol, respectivamente.

Conclusiones

Los resultados de las pruebas estadísticas correspondientes al método de la suma adicional de cuadrados no lineales y de la significancia de los parámetros indican la necesidad de emplear modelos específicos para cada una de las especies analizadas, y regionales en 10 de ellas. Las pruebas adicionales para evaluar si la existencia de diferencias es causada únicamente por dos o por las nueve especies del género *Pinus*, señalan que cada una requiere su propio modelo, mientras que las comparaciones entre las especies del género *Quercus* indican que *Q. sideroxylla* y *Q. rugosa* no difieren significativamente. Por otra parte, solo en 15 de 285 pares (5 % de los casos) de las UMAFOR no fue posible rechazar la hipótesis de un modelo único para evaluar diferencias regionales en el volumen de las especies. De acuerdo con los resultados se recomienda el empleo de los modelos específicos y regionales desarrollados en este trabajo para las especies siguientes: *P. cooperi*, *P. durangensis*, *P. arizonica*, *P. leiophylla*, *P. teocote*, *P. engelmannii*, *P. lumholtzii* y *Q. sideroxylla*; y de un modelo estatal para *P. strobiformis* y *Q. rugosa*, hasta que se cuente con más datos que permitan confirmar este resultado.

Agradecimientos

Al Programa de Fomento a la Organización Social, Planeación y Desarrollo Regional Forestal (PROFOS) de la CONAFOR por financiar la colecta de la información de campo utilizada en este trabajo.

Fin de la versión en español

- Corral, R. S., Nívar, J. J., & Fernández, S. F. (1999). Ajuste de funciones de ahusamiento a los perfiles fustales de cinco Pináceas de la región de El Salto, Durango. *Madera y Bosques*, 5, 53–65. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/617/61750205.pdf>
- Cunia, T. (1964). Weighted least squares methods and construction of volume tables. *Forest Science*, 10, 180–191.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2003). Ley de desarrollo forestal sustentable. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/259_100516.pdf
- Diéguez, A. U., Barrio, A. M., Castedo, D. F., Ruíz, G. A. D., Álvarez, T. M. F., Álvarez, G. J. G., & Rojo, A. (2003). *Dendrometría*. Madrid, España: Fundación Conde del Valle de Salazar-Ediciones Mundi-Prensa.

- González, M. S., González, M., & Márquez, M. A. (2007). *Vegetación y ecorregiones de Durango*. México: Plaza y Valdés Editores-Instituto Politécnico Nacional.
- Harvey, A. C. (1976). Estimating regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica*, 44, 461–465. doi: 10.2307/1913974
- Huang, S., Price, D., & Titus, S. J. (2000). Development of ecoregion-based height-diameter models for white spruce in boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 129, 125–141. doi: 10.1016/S0378-1127(99)00151-6
- Larson, P. R. (1963). *Stem form development of forest trees*. USA: Society of American Foresters.
- López-Serrano, P., López Sánchez, C. A., Solís-Moreno, R., & Corral-Rivas, J. J. (2016). Geospatial estimation of above ground forest biomass in the Sierra Madre Occidental in the State of Durango, Mexico. *Forests*, 7(70), 1–13. doi:10.3390/f7030070
- Martínez-Antúnez, P., Wehenkel, C., Hernández-Díaz, J. C., González-Elizondo, M., Corral-Rivas, J. J., & Pinedo-Álvarez, A. (2013). Effect of climate and physiography on the density of tree and shrub species in Northwest Mexico. *Polish Journal Ecology*, 61(2), 283–295. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/249963406_Effect_of_climate_and_physiography_on_the_density_of_tree_and_shrub_species_in_Northwest_Mexico
- Parresol, B. R. (1999). Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *Forest Science*, 45, 573–593. Retrieved from <http://www.sidalc.net/repdoc/A11144i/A11144i.pdf>
- Quiñonez-Barraza, G., De los Santos-Posadas, H. M., Álvarez-González, J. G., & Velázquez-Martínez, A. (2014). Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para las principales especies de *Pinus* en Durango, México. *Agrociencia*, 48, 553–567. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v48n5/v48n5a8.pdf>
- Schlaegel, B. E. (1982). *Acer negundo* biomass component regression analysis for the Mississippi Delta. *Forest Science*, 28, 355–358.
- Schumacher, F. X., & Hall, F. D. S. (1933). Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, 47(9), 719–734. Retrieved from <https://naldc.nal.usda.gov/download/IND43968352/PDF>
- Statistical Analysis System Institute Inc. (SAS). (2008). *SAS/ETS® 9.2. User's guide*. Cary, NC, USA: Author.