

Calidad de sitio para *Agave durangensis* Gentry en la Sierra de Registrillo, Durango

Héctor Manuel Loera-Gallegos¹

José Javier Corral-Rivas¹

Eusebio Montiel-Antuna²

Raúl Solís-Moreno²

Jorge Armando Chávez-Simental^{1§}

Guillermo González- Cervantes³

¹Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera-Universidad Juárez del Estado de Durango. Boulevard Guadiana #501, Ciudad Universitaria, Durango, Durango. CP. 34120. Tel. 01(618) 8251886. (hm.gallegos@ujed.mx; jcorral@ujed.mx). ²Facultad de Ciencias Forestales-Universidad Juárez del Estado de Durango. Río Papaloapan, Valle del Sur S/N, Durango, Durango. CP. 34120. Tel. 01(618) 1301148. (emontiel@ujed.mx; rsolis@ujed.mx). ³CENID-RASPA-INIFAP. Margen derecha Canal de Sacramento km 6.5, ejido Las Huertas, Gómez Palacio, Durango. CP. 35100. Tel. 01(871) 1590104. (gonzalez.guillermo@inifap.gob.mx).

§Autor para correspondencia: jorge.chavez@ujed.mx.

Resumen

El *Agave durangensis* Gentry, es un recurso natural que ha sido aprovechado de manera empírica por los pobladores de la zona semidesértica del estado de Durango. No se cuenta con elementos científicos y normativos que regulen u optimicen la cosecha de este producto; por lo tanto, contar con el presente, proporciona los instrumentos necesarios para el correcto aprovechamiento del agave. En la presente investigación se probó la factibilidad de cinco modelos matemáticos para determinar la calidad de sitio del *A. durangensis* en la zona semidesértica de la Sierra de Registrillo, municipio de Durango, México. La base de datos utilizada consistió en 204 pares de agaves dominantes en altura-edad, seleccionados de 180 sitios de muestreo en 1 000 m² cada uno, tomados en el área de estudio a través de un muestreo sistemático. El ajuste de los modelos matemáticos se realizó por métodos de regresión no lineal ponderada para corregir el problema de heterocedasticidad de varianza observada en la relación altura dominante-edad. Los resultados del ajuste de las ecuaciones indican que el modelo de Chapman-Richards fue el que mejor determina la calidad de sitio. A partir del análisis realizado, se concluye que el uso de modelos de índice de sitio es factible para clasificar la productividad de los sitios de *A. durangensis* en el área de estudio. El modelo desarrollado proporciona ecuaciones compatibles de índice de sitio y crecimiento en altura dominante.

Palabras clave: maguey cenizo, modelos de índice de sitio, regresión no lineal ponderada.

Recibido: Julio de 2018

Aceptado: agosto de 2018

Introducción

El aprovechamiento intensivo de maguey cenizo (*Agave durangensis* Gentry y *A. salmiana*) para la obtención de bebidas etílicas en la región de Durango data de más de 50 años. Anteriormente la utilización de esta planta se hacía de manera doméstica, ya que no existían vinatas que utilizaran cantidades considerables para su explotación comercial. Es a finales de la década de los setenta cuando se establecen algunas plantas productoras de mezcal en la región de la sierra de Registrillo, las cuales consumían y acaparaban las existencias de maguey cenizo, para la producción de bebidas como el mezcal (Díaz, 2002).

La Norma Oficial Mexicana 007 versión 1997 de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (NOM-007-SEMARNAT-1997), señala que esta especie debe ser aprovechada bajo técnicas que aseguren su desarrollo y sustentabilidad. Sin embargo, esto es poco frecuente, ya que los programas de manejo carecen de información técnica para medir cuantitativa y cualitativamente la potencialidad del mismo (Díaz, 2002). Por otra parte, Velasco y Márquez (2003) señalan que con el incremento de la demanda de agave mezcalero para satisfacer el mercado regional, nacional e internacional, el recurso se ha visto presionado.

En la actualidad, se ha convertido en una regla el implementar métodos basados en el potencial productivo que clasifiquen las áreas forestales que realicen estimaciones para el crecimiento futuro del recurso a aprovechar. 'El índice de sitio es la unidad de medición con la cual se determina la productividad de las áreas forestales, este se define como la altura máxima que alcanzan los árboles dominantes o codominantes a una edad base bajo las condiciones actuales que presenta el sitio' (Pritchett, 1991). Este parámetro de productividad puede ser aplicado y estimado en otras plantas no maderables, como los agaves, ya que también es posible clasificar estas plantas por su dominancia, propuestas por Kraft (1884).

El conocimiento de este factor contribuye en la toma de decisiones para la elaboración de un adecuado programa de manejo, al determinar una intensidad de corta que no ponga en riesgo el rendimiento sostenido y a la vez, evitar el deterioro de un área forestal bajo aprovechamiento (Corral-Rivas *et al.*, 2014). El objetivo del presente trabajo, fue evaluar la factibilidad de modelos matemáticos para determinar la calidad de sitio para *A. durangensis* en la región de La Sierra de Registrillo, municipio de Durango, México, mediante la utilización de la relación altura dominante-edad.

Materiales y métodos

Ubicación del área de estudio

Esta investigación se realizó en la sierra de Registrillo en el municipio de Durango, México, localizada dentro de las coordenadas geográficas 23° 55' y 23° 41' de latitud norte y 104° 25' y 104° 33' longitud oeste con respecto al meridiano de Greenwich; específicamente en predios de los ejidos San Francisco del Manzanal, Tomás Urbina, José María Pino Suárez, Nicolás Romero, Valle Florido, Antonio Gaxiola, Primero de Mayo y la Colonia Minerva. El acceso a los predios es por medio de la carretera Durango-Mezquital o la carretera Durango-México (Figura 1) a una distancia de 25 km de la ciudad de Durango.

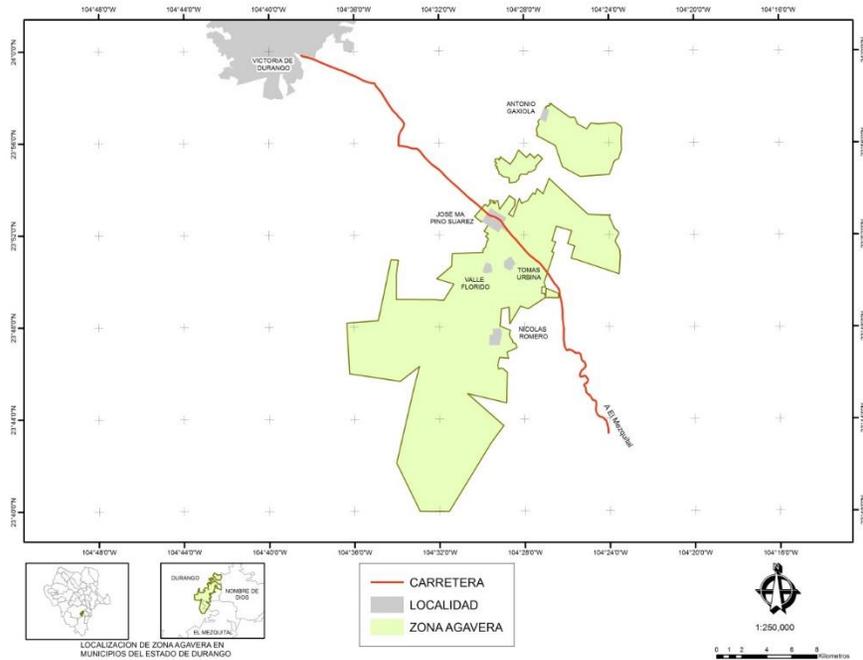


Figura 1. Localización del área de estudio.

Métodos de muestreo

Se utilizó un muestreo dirigido con sitios circulares de 1 000 m², lo anterior con la finalidad de abarcar todos los rangos de calidad de estación, edad, altitud, exposición y pendiente, considerando además las características biométricas de *A. durangensis* y su distribución espacial dentro de la superficie de estudio para la elaboración de las curvas de índice de sitio. Este tipo de muestreo es común en el desarrollo de trabajos relacionados con la estimación de curvas de calidad (Corral-Rivas *et al.*, 2014). Los agaves utilizados para la realización de este trabajo correspondieron a aquellos que por características fenotípicas (altura y vigor) tienen el aspecto de dominantes dentro de los diferentes sitios de muestreo y creciendo libres de supresión (Figura 2).



Figura 2. Método de muestreo dirigido en campo.

Estadística empleada

Los datos utilizados para el desarrollo de las curvas de índice de sitio, comprendieron 204 pares de altura dominante y edad. A estas observaciones se ajustaron los modelos no lineales: Weibull I, Chapman-Richards, Korf, Sloboda y McDill and Amateis, bajo la consideración de que la relación altura dominante-edad corresponde con la curva de crecimiento sigmoide, la cual no es de tipo lineal (Rodríguez y Leihner, 2006). Las expresiones matemáticas de los modelos probados se presentan en el Cuadro 1, en todas las ecuaciones el crecimiento en altura dominante de los agaves se expresó como una función de la edad.

Cuadro 1. Modelos matemáticos utilizados para determinar la de calidad de sitio de *A. durangensis*.

Núm.	Modelo	Fuente
1	$H = b_0 \left(1 - \exp^{-b_1 (t - b_2)^{b_3}}\right)$	Weibull I
2	$H = b_0 (1 - \exp(-b_1 t))^{b_2}$	Chapman-Richards
3	$H = b_0 \exp(-b_1 t^{-b_2})$	Korf
4	$H = b_0 \exp\left(-b_1 \exp\left(\frac{b_2}{(b_3 - 1) \cdot t^{(b_3 - 1)}}\right)\right)$	Sloboda
5	$H = \frac{b_0}{1 + b_2 / t^{b_1}}$	McDill e Amateis

H= altura dominante (cm); *t*= edad (años); exp= base de los logaritmos naturales; *b*₀, *b*₁, *b*₂, *b*₃= parámetros a ser estimados.

Los modelos propuestos para la estimación del índice de sitio de *A. durangensis* fueron seleccionadas de acuerdo con otras investigaciones realizadas en especies maderables, específicamente del género *Pinus* (Corral-Rivas *et al.*, 2004; Vargas, 2010) y debido a que particularmente han mostrado los resultados más satisfactorios. El ajuste de los modelos se realizó por mínimos cuadrados ordinarios empleando el procedimiento NLIN del programa estadístico SAS/STAT® (SAS Institute Inc., 2004). Para corregir el problema de heterocedasticidad de varianza observado en las relaciones de altura dominante-edad se usaron los métodos de regresión ponderada propuestos por Furnival (1961); Cailliez (1980).

Los criterios empleados para calibrar y determinar la sensibilidad de los modelos se basaron en un análisis numérico y gráfico de los residuos. El análisis numérico consistió en la comparación de cuatro estadísticos utilizados con frecuencia en la modelización forestal: el sesgo, la raíz del error medio cuadrático, el coeficiente de determinación ajustado y el criterio de información de Akaike en diferencias. La raíz del error medio cuadrático (REMC) analiza la precisión de las estimaciones, el coeficiente de determinación ajustado (R2adj) representa la varianza que es explicada por el modelo y el Criterio de Información de Akaike en diferencias (AICd) se emplea para seleccionar el mejor modelo y se basa en minimizar la distancia de Kullback-Liebler (Burnham y Anderson, 1998). Las expresiones matemáticas de dichos estadísticos se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Calibración y sensibilidad de los modelos empleados para determinar el índice de sitio para *A. durangensis*.

Name	Equation	Number
Sesgo	$\bar{E} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) / n$	1)
Raíz del error medio cuadrático	$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - p)}$	2)
Coefficiente de determinación ajustado	$R_{adj}^2 = 1 - (n - 1) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - p) \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$	3)
Criterio de información de Akaike en diferencias (AICd)	$AICd = n \cdot \ln \hat{\sigma}^2 + 2 \cdot l - \min(n \cdot \ln \hat{\sigma}^2 + 2 \cdot l)$	4)

y_i, \hat{y}_i, \bar{y} = valor observado, predicho y medio de la variable dependiente; n = número total de observaciones usadas para ajustar el modelo; l = número de parámetros del modelo calculados como $(p+1)$; $\hat{\sigma}^2$ = estimador de la varianza; p = número de parámetros del modelo.

Para el análisis gráfico se examinaron diferentes representaciones de los datos experimentales y los residuos después del ajuste de los modelos. Estos gráficos representan una herramienta muy importante en la selección de un modelo, ya que permiten detectar errores o comportamientos anormales (Rawlings, 1988).

Las curvas de calidad de sitio fueron generadas a través del método de sustitución de parámetros, este método hace que un parámetro o grupo de parámetros sean dependientes de la calidad de sitio. Las curvas derivadas son anamórficas, debido a la naturaleza de los datos experimentales (solo se contó con una medición de altura dominante y edad).

Resultados y discusión

La estimación de los parámetros, en todos los casos, se mostró significativa o diferente de cero. Los resultados indican que todos los modelos predicen de manera similar la altura dominante de *A. durangensis*. Sin embargo, los modelos 1 y 2 (Weibull y Chapman-Richards), presentaron mejores ajustes, ya que los valores del criterio de información de Akaike fueron los más bajos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Estadísticos estimados de los modelos seleccionados.

Modelo	B_0	β_1	β_2	β_3	Sesgo	RMSE	R^2	AICd
1	190.4488	0.0192	0.1863	1.5384	0.099424	30.16418	0.635957	0.949
2	191.3502	0.126277	2.209669		0.188395	30.16671	0.634076	0
3	193.6255	22.66431	1.516611		0.215478	30.84025	0.617553	9.009
4	190.6384	4.324558	0.207562	0.132335	0.154737	30.21396	0.634755	1.621
5	191.1635	2.199848	164.5538		0.154034	30.36188	0.629325	2.631

Asimismo, estos dos modelos tuvieron coeficientes de determinación ligeramente más altos y sus errores fueron bajos. Los valores del sesgo (0.099424 y 0.188395 cm para el modelo 1 y 2, respectivamente) indican solo una subestimación menor. Basándose en el principio de seleccionar el modelo más sencillo, se recomienda el modelo 2 o de Chapman-Richards para la determinar el índice de sitio de la especie *A. durangensis* en la zona estudiada. La expresión a utilizar queda determinada por la siguiente ecuación:

$$H = 191.3502(1 - \exp(-0.126277t))^{2.209669}$$

Donde: H = altura dominante (cm); t = edad (años).

El análisis gráfico de los residuales para este modelo, mostró una adecuada distribución, al corregir adecuadamente el problema de heterocedasticidad de varianza presente en la relación altura dominante-edad de los datos analizados (Figuras 3 y 4). La Figura 3, es el resultado de los residuos obtenidos del ajuste del modelo sin regresión ponderada, donde se muestra claramente un problema de desigualdad de varianza. La corrección de este problema se observa en la Figura 4, la cual se derivó a partir de los residuos estudentizados obtenidos del ajuste ponderado.

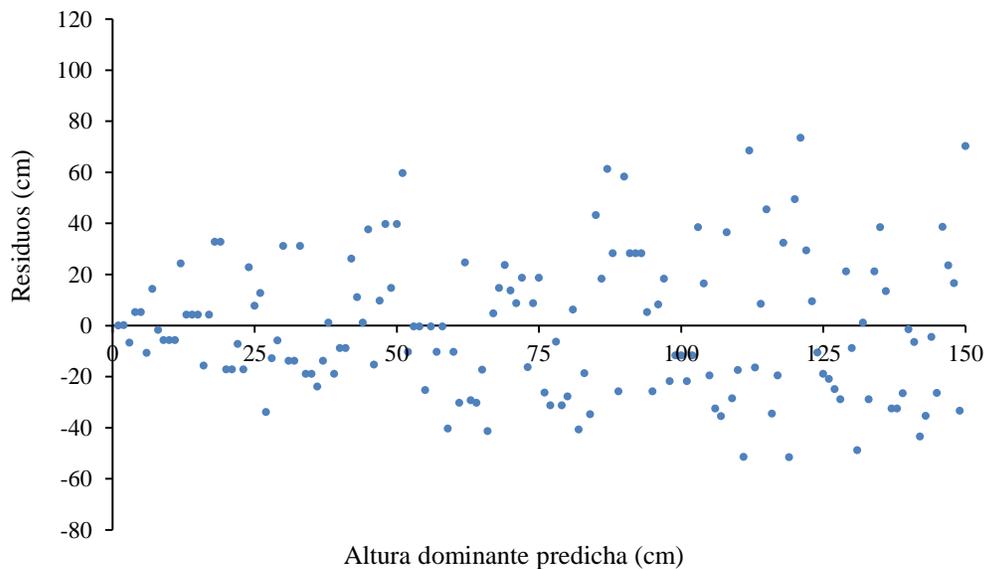


Figura 3. Residuos contra la altura dominante predicha sin corregir la heterocedasticidad de varianza para *A. durangensis*.

El valor de k obtenido a partir de los residuales generados por esta ecuación fue de 1.17. Dicho valor se incluyó después dentro del factor de ponderación $w_i = 1/d_{sti}^k$ para obtener los residuos homocedásticos de la Figura 4.

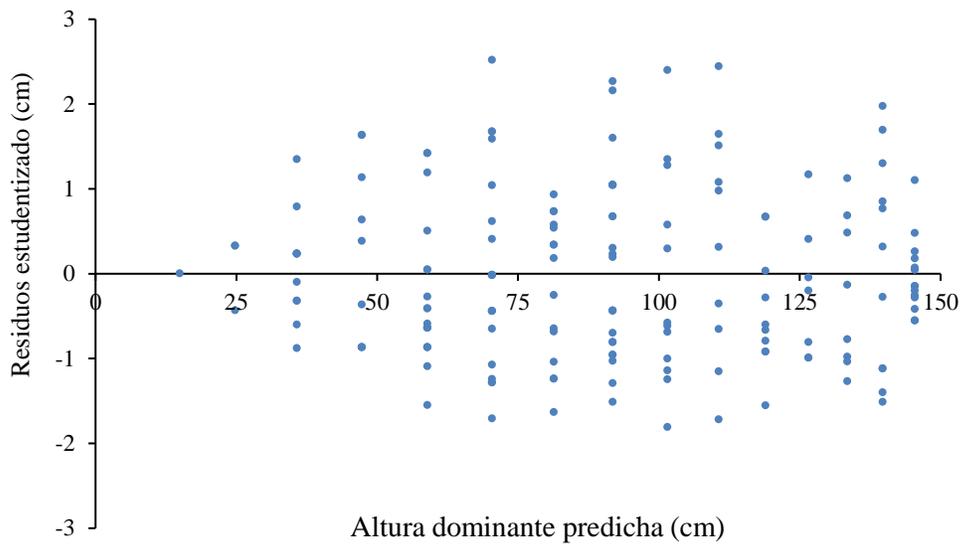


Figura 4. Residuos estudentizados contra la altura dominante predicha con la heterocedasticidad corregida para *A. durangensis*.

Finalmente, las calidades de índice de sitio se determinaron en relación con una edad base de 10 años, quedando de 45, 70, 95 120 y 145 cm para las calidades de sitio (CS) 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente (Figura 5). La CS 3 corresponde con la curva guía superpuesta a los pares de datos altura dominante- edad. Se decidió utilizar una edad base de 10 años, debido a que se estima que este valor corresponde con el turno fisiológico de la especie. En la representación gráfica de las curvas anamórficas se puede observar cómo éstas se ajustan muy bien a la nube de datos de altura dominante y edad para *A. durangensis* (Figura 6).

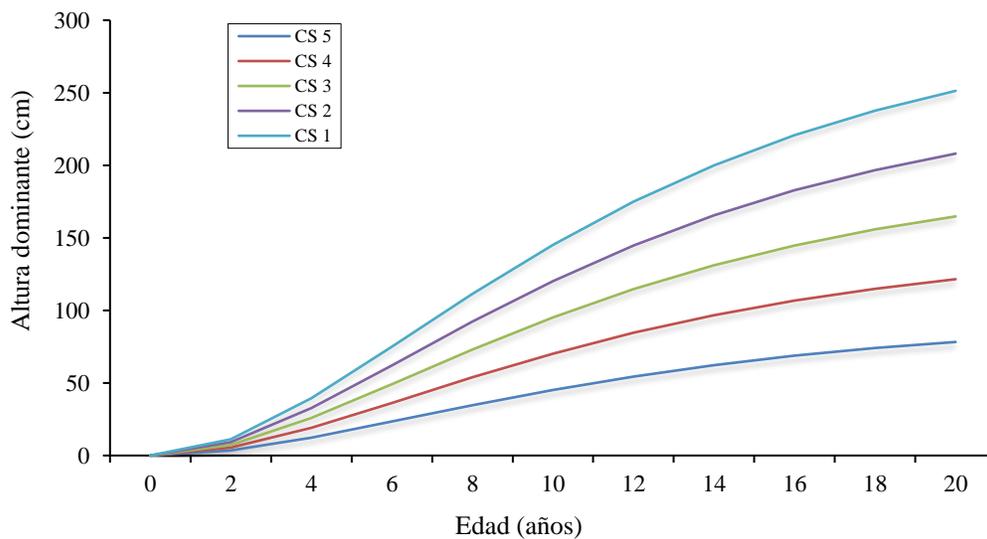


Figura 5. Curvas de índice de sitio obtenidas después de resolver el modelo por el parámetro β_0 .

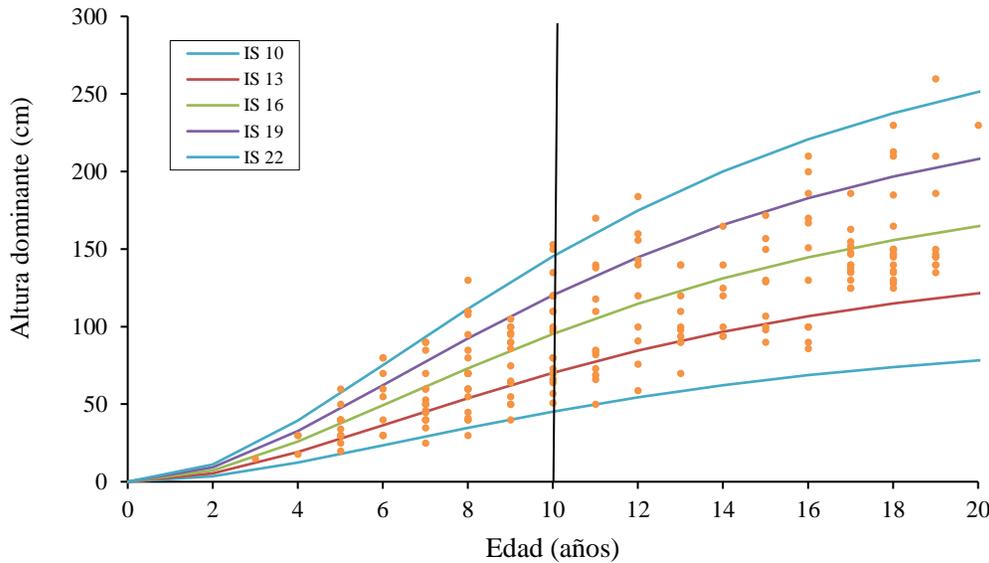


Figura 6. Curvas anamórficas de índice de sitio para *A. durangensis* obtenidas con el modelo de Chapman-Richards a una edad base de 10 años.

Asimismo, el modelo de Chapman-Richards mostró una buena flexibilidad para la estimación del índice de sitio de *A. durangensis* explicando más de 62% de varianza observada en la altura dominante. Este resultado indica que el modelo de Chapman-Richards muestra también una buena flexibilidad para la modelización del índice de sitio de especies no maderables como el maguey, al igual que en especies maderables (Corral-Rivas *et al.*, 2004). Hasta la fecha de redacción de este trabajo, las herramientas matemáticas desarrolladas para el manejo de maguey en la región de estudio eran muy pocas. Destacan los trabajos de Díaz *et al.* (2007); Ortiz (2007), quienes proponen algunos modelos matemáticos para elaborar tablas de producción de *A. durangensis*; sin embargo, tienen la desventaja de no considerar a la calidad de sitio como una variable de entrada y por tanto asumen los mismos niveles de productividad para todos los rodales.

Loera *et al.* (2012) realizaron un estudio sobre los factores ecológicos de una comunidad de agave en la misma región, y encontraron una relación significativa entre la edad y la altura de los agaves, resultado que es consistente con el presente en el uso de la variable edad como una variable de importancia predictiva en la modelización del crecimiento de esta especie; por otra parte, Aguirre *et al.* (2001) reportan relaciones entre las dimensiones de agave mezcalero en San Luis Potosí, México y las condiciones del sitio. La utilización de las curvas de calidad de estación desarrolladas en este trabajo permitirá a los manejadores forestales tomar decisiones técnicas que no comprometan la persistencia *A. durangensis*, de tal manera que en la calidad de sitio 5 (pobre) la posibilidad de cosecha deberá ser menor que en aquellas áreas que gozan de una calidad de sitio 1 (buena).

Conclusiones

La relación altura dominante- edad de la especie *A. durangensis* resultó ser un parámetro válido para determinar la calidad de sitio en el área de estudio. De los modelos analizados, el modelo de Champman-Richards resultó ser el más adecuado para construir el sistema de curvas anamórficas para *A. durangensis* en la zona estudiada, proporcionando estimaciones adecuadas del índice de sitio y del crecimiento en altura dominante para dicha especie.

Los resultados de este trabajo representan una herramienta de gran ayuda para los manejadores forestales en el ámbito de los recursos forestales no maderables, ya que es casi nula la investigación en este sentido. Al contar ahora con una medida de la calidad de sitio se puede hacer la división dasocrática del potencial productivo de cada uno de los rodales y subrodales; a través, de su incorporación a los programas de manejo de la zona.

Literatura citada

- Aguirre, J. R.; Charcas, H. y Flores, J. L. 2001. El maguey potosino. Consejo Potosino de Ciencias y tecnología, Gobierno del Estado de San Luis Potosí; Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. 47-56 pp.
- Cailliez, F. 1980. Estimación del volumen forestal y proyección del rendimiento con referencia a los trópicos. Vol 1. Estimación del volumen. FAO. Roma, Italia. 92. p.
- Corral, R. J. J.; Álvarez, J. G.; Ruíz, A. D. and Gadow, K. V. 2004. Compatible height and site index models for five pine species in El Salto, Durango (México). *Forest Ecol. Management*. 201(2-3):145-160.
- Díaz, M. 2002. Permiso de aprovechamiento de agave cenizo, para el ejido San Francisco del Manzanal, municipio de Durango. UJED. Escuela de Ciencias Forestales. Durango, Durango. 92 pp.
- Díaz, M., Bretado, J. y Montiel, E. 2007. Elaboración de tablas de producción para el agave en el municipio de Durango, Durango. *In: memorias del VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales*. Sociedad Mexicana de Recursos Forestales. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera-UMSNH. Morelia, Michoacán, México. 1-7 pp.
- Furnival, G. M. 1961. An index for comparing equations used on constructing volume tables. *Forestry Science*. 7(4):337-341.
- Kraft, G. 1884. Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen and Lichtungshieben. Klindworth's Verlag, Hannover. 147 pp.
- Loera, H.; Rodríguez, E.; Montiel, E.; Díaz, M.; Orona, I.; Ojeda, G.; López, J. C. y Iliana, S. I. 2012. Factores ecológicos de una comunidad de *Agave durangensis* en la Sierra de Registrillo, Durango. México. UJED. *Agrofaz*. 12(1):81-88.
- Norma Oficial Mexicana. (NOM-007-SEMARNAT- 1997). Diario Oficial de la Federación. México. 23 de octubre de 1995. 8 p.
- Ortiz, R. 2007. Evaluación de los modelos matemáticos para elaborar tablas de producción, para *Agave durangensis* Gentry en el municipio de Durango, Durango. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Forestales, UJED Durango, México. 46 p.
- Pritchett, W. L. 1991. Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento. (Ed.). Limusa. México, DF. 634 p.

- Rawlings, J., Pantula, S. and Dickey, D. (1988). Applied regression analysis: a reseach tool. 2nd ed. Raleigh, NC. USA: Springer.
- Rodríguez W. and Leihner, D. 2006. Análisis del crecimiento vegetal. Volumen 7 de la Serie: fisiología de la producción de los cultivos tropicales. Primera edición. Editorial Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 37 p.
- Statistical Analysis System (SAS). 2004. User's guide. SAS/ETS[®] 9.1. SAS Institute Inc. Cary, NC. USA. s/p.
- Velasco, G. O. H y Márquez, L. M. A. 2003. Desarrollo sustentable del maguey mezcalero en Durango. IPN. CIIDIR Durango, Durango. 174 p.
- Vargas. B.; Álvarez, J.; Corral, R. J. y Aguirre, O. 2010. Construcción de curvas dinámicas de índice de sitio para *Pinus cooperi* Blanco. Fitotec. Mex. 33(4):343-351.