

Modelos Predictivos para la Producción de Productos Forestales No Maderables **AGAVES MEZCALEROS**



Efraín Velasco Bautista Marisela Cristina Zamora-Martínez
Horacio Espinosa Paz Carolina Sampayo Bautista Francisco Moreno Sánchez

**INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES
FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS**

Dr. Pedro Brajcich Gallegos

Director General

Dr. Salvador Fernández Rivera

Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación

M.C. Arturo Cruz Vázquez

Encargado del Despacho de la Coordinación de Planeación y Desarrollo

Lic. Marcial Alfredo García Morteo

Coordinador de Administración y Sistemas

**CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA
EN CONSERVACIÓN Y MEJORAMIENTO DE
ECOSISTEMAS FORESTALES**

Dr. Fabián Islas Gutiérrez

Director

Ing. Ramón Noguez Hernández

Jefe de Operación

Lic. Carlos Gabriel Damián Díaz

Jefe del Departamento Administrativo

**MODELOS PREDICTIVOS PARA LA PRODUCCIÓN DE
PRODUCTOS FORESTALES NO MADERABLES:
AGAVES MEZCALEROS**

CRÉDITOS EDITORIALES

Edición técnica

Ing. Francisco Camacho Morfín
Dr. Ramiro Pérez Miranda

Cuidado de la Edición

Biól. Marisela C. Zamora-Martínez

Diseño

Graphx, S.A. de C.V.

Fotografía

M.C. Efraín Velasco Bautista
M.C. Horacio Espinosa Paz
Biól. Carolina Sampayo Bautista

Mapas

M.C. Francisco Moreno Sánchez

La cita correcta es:

Velasco B, E., M. C. Zamora-Martínez, H. Espinosa P., C. Sampayo B. y F. Moreno S. 2009. Modelos Predictivos para la Producción de Productos Forestales No Maderables: Agaves Mezcaleros. Manual Técnico Núm. 3. CENID-COMEF. INIFAP, México, D. F. México, 60 p.

No está permitida la reproducción total o parcial de esta publicación, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia, por registro u otros métodos sin el permiso previo y por escrito a la Institución.

Derechos Reservados © 2009

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Av. Progreso No. 5 Barrio de Santa Catarina, Del. Coyocán

C.P. 04010 México, D.F.

Tel. (01 55) 36268700 ext. 301

Primera edición 2009

1000 ejemplares

Impreso en Graphx, S.A. de C.V. Tacuba 40-205, Col. Centro, México, D.F. 06010

La edición se terminó de imprimir en marzo de 2010

ISBN 978-607-425-290-3

MODELOS PREDICTIVOS PARA LA PRODUCCION DE PRODUCTOS FORESTALES NO MADERABLES: AGAVES MEZCALEROS

M. C. Efraín Velasco Bautista

Investigador Titular. Red Nacional de Investigación e Innovación de Modelaje. CENID-COMEF

Biól. Marisela C. Zamora Martínez

Investigadora Titular. Red Nacional de Investigación e Innovación de Manejo Forestal Sustentable. CENID-COMEF

M. C. Horacio Espinosa Paz

Investigador Titular. Red Nacional de Investigación e Innovación de Recursos Genéticos.
CIR-PAS. CAMPO EXPERIMENTAL VALLES CENTRALES

Biól. Carolina Sampayo Bautista

Investigadora Asociada. Red Nacional de Investigación e Innovación de Manejo Forestal Sustentable.
CIR-PAS. CAMPO EXPERIMENTAL VALLES CENTRALES

M. C. Francisco Moreno Sánchez

Investigador Titular. Red Nacional de Investigación e Innovación de Modelaje. CENID-COMEF

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales

CONTENIDO

RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	9
Normatividad	11
Biometría	11
OBJETIVOS	13
MODELO PREDICTIVO	13
Definición del área de trabajo	13
Descripción de los agaves mezcaleros.....	14
<i>Agave karwinskii</i>	14
<i>Agave potatorum</i>	15
Descripción de los predios	17
Diseño de muestreo y tamaño de muestra	18
Obtención de la altura total, diámetro de la roseta y peso fresco ...	22
Base de datos	26
Generación del modelo predictivo de <i>Agave potatorum</i>	27
Validación del modelo de <i>Agave potatorum</i>	40
Generación del modelo predictivo de <i>Agave karwinskii</i>	44
Validación del modelo de <i>Agave karwinskii</i>	48
Ventajas y desventajas del modelo generado.....	50
RECOMENDACIONES	50
REFERENCIAS	51
APÉNDICE 1	53
Tabla de producción <i>Agave potatorum</i>	55
APÉNDICE 2	57
Tabla de producción <i>Agave karwinskii</i>	59

RESUMEN

La familia Agavaceae incluye a la mayoría de las especies de maguey que son utilizadas para la producción de bebidas alcohólicas, como el mezcal. En Oaxaca, los agaves denominados “cirial” (*Agave karwinskii* Zucc.) y “tobalá” (*Agave potatorum* Zucc.) son los principales taxa silvestres recolectados para cubrir la demanda de mezcal; sin embargo, no existen estudios cuantitativos para estimar de manera confiable, las existencias reales de este recurso forestal no maderable. De acuerdo a la normatividad forestal vigente, dicha información es requerida en los avisos de aprovechamiento.

Por lo anterior, investigadores del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) conscientes de tal problemática, realizaron el proyecto de investigación: “Modelos predictivos de producción para productos forestales no maderables de México” el cual incluyó entre otros recursos, a los agaves mezcaleros. El presente documento constituye uno de sus principales productos, mismo que pretende ser un instrumento de apoyo para los profesionistas y técnicos forestales; ya que muestra el método para la generación de modelos que permitan calcular el peso fresco de las piñas de agave cirial y tobalá, a partir de variables fáciles de medir como: la altura de la planta y el diámetro de la roseta. Los principios técnico-estadísticos considerados se ejemplifican con datos tomados en dos ejidos forestales, ubicados en el estado de Oaxaca. Con base en las ecuaciones obtenidas se elaboraron tablas de producción, mismas que pretenden ser una herramienta práctica para estimar las existencias reales del peso fresco de piñas susceptibles de aprovecharse en poblaciones silvestres de los agaves “tobalá” y “cirial”.

INTRODUCCIÓN

La familia Agavaceae se distribuye en Canadá, Estados Unidos de América, México, Centroamérica y las Islas del Caribe. El género *Agave* es endémico del continente americano con aproximadamente 200 especies, de las cuales 75% se desarrollan en el territorio nacional e incluyen a 129 taxa endémicos, por lo que se considera a México como su centro de origen y diversidad.

Los agaves tienen gran valor histórico, cultural y económico; ya que son fuente de diversos productos, por ejemplo: alimentos (gusanos de maguey, insectos, etcétera.), bebidas fermentadas y destiladas (aguamiel, pulque, mezcal, tequila, bacanora y comiteco, entre otros), medicinas, combustible, plantas de ornato, fibras para cuerdas o calzado (ixtle), abono, materiales para construcción de viviendas, ceremoniales, implementos agrícolas, químicos, etcétera (García, 2007; De la Peña, 2008).

En la familia Agavaceae se ubican la mayoría de las especies que se utilizan para la producción de bebidas alcohólicas destiladas como el mezcal y el tequila. En este sentido los taxa de mayor importancia son: *Agave angustifolia* var. *rubescens* (Salm-Dyck) Gentry., *A. cernua* Berger., *A. convallis* Trel., *A. guadalajarana* Trel., *A. inaequidens* K. Koch., *A. karwinskii* Zucc., *A. marmorata* Roetzl., *A. maximiliana* Baker., *Agave potatorum* Zucc., *A. rhodocantha*, *A. schidigera* Lem., *A. seemanniana* Jacobi., *A. shrevei* Gentry., *A. wocomahi* Gentry. En Oaxaca los agaves silvestres empleados en la elaboración de mezcal corresponden a las especies *A. karwinskii* (cirial) y *A. potatorum* (tobalá).

La recolección del agave para la elaboración de bebidas destiladas de uso tradicional y comercial debe cumplir, al momento de la extracción, con las siguientes características: presentar una coloración verde-amarillo en la base de las “pencas” y parda en la parte inferior de la planta; además de, tener hojas secas en dicha zona. Desde el punto de vista bioquímico, el estado de madurez lo define una concentración alta de carbohidratos.

En general, el aprovechamiento de los agaves incluye las actividades que se enumeran a continuación (SEMARNAT-INIFAP, 2007a; SEMARNAT-INIFAP, 2007b) (Figuras 1a y 1b):

1. Extracción de la planta.
2. Corte de las “pencas” (hojas).
3. Extracción de la “piña”.
4. Rasurado o limpieza total de la “piña”.



Figura 1a. Recolecta de la “piña” de *Agave potatorum* Zucc. (tobalá).



Figura 1b. Recolecta de la “piña” de *Agave karwinskii* Zucc. (cirial).

Normatividad

La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS) establece que para el aprovechamiento de los recursos forestales no maderables únicamente se requerirá de un aviso por escrito dirigido a la autoridad competente (Artículo 97). A su vez, el Reglamento de la LGDFS, en su artículo 53, determina la presentación de un estudio técnico.

La regulación del aprovechamiento responde a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-007-SEMARNAT-1997 (en revisión).

El factor importante en la normatividad vigente para la extracción de los recursos forestales no maderables (RFNM), en particular para los agaves mezcaleros, se refiere a notificar la cantidad del recurso por extraer en el área forestal de interés, es decir, al peso fresco total de las “piñas”. En este sentido, la estimación de las existencias reales es un parámetro de interés para el seguimiento y control del aprovechamiento. No obstante, a la fecha se carece de un método estandarizado que le permita al productor conocer el potencial de recolecta y al técnico forestal evaluar el proceso, de manera práctica y confiable.

Biometría

Las estimaciones se realizan mediante estrategias de muestreo de uso convencional, cuyas unidades son parcelas de área fija; mientras que, los ejemplares de agaves constituyen las unidades de estudio. La estimación del total por unidad de muestreo se obtiene considerando los valores de las unidades de estudio, que implica la destrucción de la planta. Por tal motivo, es necesario generar modelos que permitan predecir el peso fresco de las “piñas” a partir de parámetros de fácil medición, por ejemplo, el diámetro de la “roseta” y altura del maguey.

La evaluación de los recursos forestales maderables se efectúa mediante ecuaciones de predicción del volumen a nivel de las unidades de estudio (árboles), a partir de variables cuya medición sea relativamente fácil. Recientemente, este principio también se ha considerado en la cuantificación de biomasa y carbono arbóreos en ecosistemas forestales (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Díaz-Franco *et al.*, 2007). En el caso de los recursos forestales no maderables, es posible utilizar modelos de regresión con el mismo propósito.

En general, para lograr un manejo forestal sustentable de los RFNM es necesario conocer el ámbito geográfico en donde se distribuye el recurso, su situación actual; además de su capacidad de producción.

Al respecto, los modelos predictivos considerados en el presente documento se definen como ecuaciones que estiman el peso fresco de las “piñas” de *Agave potatorum* y *Agave karwinskii*, en función del diámetro de la “roseta” y de la altura del maguey. Las ventajas de estas herramientas en el campo de la biometría forestal, se anotan a continuación:

- Calculan el valor de la variable dependiente con base en la medición sencilla de otras, en consecuencia, el tiempo requerido para realizar el trabajo de inventario disminuye significativamente.
- La estimación se hace “a priori”, es decir, se puede conocer el valor del peso fresco de la piña antes del aprovechamiento de la especie objeto de estudio.
- Los modelos de predicción son de fácil aplicación, únicamente se necesita conocer las variables independientes. De hecho es factible programar las ecuaciones en una hoja de cálculo, o bien, recurrir directamente a las tablas de predicción, cuya consulta es inmediata.
- Dado que se trata de un método de cuantificación no destructivo, su impacto ecológico es prácticamente nulo.
- La variable por estimar está correlacionada con otras características del recurso sujeto al aprovechamiento, por lo tanto, el valor determinado con un modelo predictivo que considera variables auxiliares resulta más preciso que una simple media aritmética.

Si bien es cierto, que las fórmulas de predicción son de uso común en la evaluación de recursos forestales maderables, para los no maderables sólo existen intentos aislados sobre la generación de este tipo de técnicas dasonómicas.

En el caso particular de los agaves mezcaleros su aplicación es prácticamente nula. Al respecto, Espinoza *et al.* (2005) efectuaron un análisis de correlación entre el peso (kg) y el perímetro (cm) de “piñas” de *Agave potatorum* y *A. angustifolia* Haw., los valores de *r* que citan son: 0.85 y 0.91, respectivamente. Sin embargo, la variable independiente que utilizaron requiere para su medición la extracción de la planta; por lo tanto el modelo es de tipo destructivo.

Díaz *et al.* (2007) desarrollaron un modelo de predicción para el peso de las “piñas” de *Agave* spp, con un coeficiente de determinación cercano a 0.9:

$$\hat{y} = 4.03 + 33.18 h^2 - 0.67 E$$

Donde: \hat{y} = peso (kg) estimado de la “piña”

h = altura (cm) de la planta
E = edad de la planta.

Una primera aproximación se realizó con las especies *Agave xylonacantha* Salm-Dyck, *Agave marmorata* Roezl y *Agave stricta* Salm-Dyck en las que se generaron modelos predictivos de su peso húmedo cuya variable independiente fue el volumen de la planta, considerado este como el hemisferio superior de un esferoide (González *et al.*, 1980). Las expresiones matemáticas resultantes se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Modelos predictivos del peso húmedo para tres especies de *Agave*.

Especie	Ecuación
<i>Agave xylonacantha</i>	$\hat{y} = 46.6 + 0.0093x$
<i>Agave marmorata</i>	$\hat{y} = 67.3 + 0.02x$
<i>Agave stricta</i>	$\hat{y} = 137.5 + 0.5x$

\hat{y} = peso húmedo estimado (g) de la planta; x = volumen de la planta (cm³)

OBJETIVOS

- Mostrar el método para la generación de modelos predictivos del peso fresco de piñas de *Agave potatorum* y *Agave karwinskii*, en función del diámetro de la roseta y de la altura del maguey.
- Proporcionar tablas para estimar el peso fresco de la "piña" para *Agave potatorum* y *Agave karwinskii*.

MODELO PREDICTIVO

Definición del área de estudio

Etapa muy importante, ya que el uso del modelo sólo es válido en el área geográfica y ecológica donde se toman los datos de campo. Su aplicación fuera del ámbito recomendado tiene por consecuencia la sub o sobreestimación del peso fresco de las "piñas".

Por lo anterior, la elaboración del mapa base del área de trabajo es el primer punto a considerar para la generación del modelo predictivo. Para tal efecto, se utilizan herramientas modernas como las fotografías aéreas digitales y las imágenes satelitales, de no tener acceso a cualquiera de ellas, es posible usar la cartografía de Uso de Suelo y Vegetación SERIE III del INEGI (INEGI, 2005).

Las fotografías aéreas digitales permiten identificar zonas de distribución de agave en escalas relativamente finas. En este caso el usuario realiza la zonificación mediante interpretación directa y en función de ella elabora el mapa base.

Cuando se emplean las imágenes de satélite, el punto inicial consiste en generar la cartografía de uso de suelo y vegetación, para lo cual se aplican técnicas de percepción remota conocidas como clasificación de imágenes: supervisada y no supervisada. En la primera, se considera el conocimiento previo del área de estudio y trabajo de campo (verificaciones); mientras que, en la segunda a partir de software especializado (p.ej. ERDAS Imagine ®), se obtienen agrupaciones de acuerdo a similitudes entre píxeles. En ambas técnicas el principio fundamental son las propiedades ópticas de la vegetación, que permiten al software separarla en tipos. El grado de detalle y la exactitud de la clasificación depende de la clase de sensor y de la resolución del mismo.

Si la única información disponible es la del INEGI, la generación del mapa base inicia con la elección de la categoría “bosque de encino con vegetación secundaria”, para el caso de agave tobalá, o “selva baja caducifolia con vegetación secundaria”, para el agave cirial. No obstante que, el detalle de la información es poco fino (1:250,000), tiene la ventaja de que los tipos de vegetación están definidos para todo el país. El manejo de la información vectorial de INEGI se puede hacer con un Sistema de Información Geográfica, como ArcView ®.

En cualquier caso, los recorridos de campo en coordinación con los técnicos forestales y con los dueños o poseedores del recurso garantizarán una definición precisa del área de estudio.

Descripción de las especies de agaves mezcaleros

Agave karwinskii Zucc.

Sinonímias: *A. corderoyi*, Hort; *A. bakeri*, Ross; *Agave laxa* Salm-Dyck; *Agave viridissima* Baker.

Nombre común: “agave cirial”.

Presenta un tronco que puede llegar a medir 4 m de altura. Hojas verdes o glaucas, cóncavas, de 2 a 4 cm de ancho, 35 a 70 cm de largo, con espinas café oscuro, 3 a 6 mm de ancho y 25 a 50 mm de largo, fuertes, curvadas hacia arriba y aserradas. Inflorescencia amplia; flores de 5 a 7 cm, ovario de 2.5 cm, tubo de 2 cm (Verduzco, 2008; Standley, 1926; Parodi, 1959) (Figura 2) (Cuadro 2).

Hábitat. Matorrales secos o pastizales; intervalo altitudinal de 1,500 a 1,900 m; tolera las sequías y heladas moderadas (Espinoza *et al.*, 2005; García, 2007; Standley, 1926; Parodi, 1959) (Figura 2).

Distribución. Oaxaca, Puebla y Veracruz.



Figura 2. Hábitat de *Agave karwinskii* Zucc.

Agave potatorum Zucc.

Sinonímias: *A. Scolymus*, Karw; *A. coccínea* Roelz ex Jacobi; *A. flaccida* Haworth.

Nombre común: “agave tobalá”.

Presenta hojas oblanceoladas, agudas, de 8 a 10 cm de ancho, 30 a 40 cm de largo, con una espina café obscuro, recta, finamente dentada, prominencias carnosas, color gris o verde. Inflorescencia paniculada, grande, con ramas cortas y rectas. Reproducción sexual (Verduzco, 2008; Standley, 1926; Parodi, 1959) (Figura 3) (Cuadro 2).

Hábitat. Bosques de pino-encino y en lugares semiáridos; intervalo altitudinal de 1,200 a 2,250 m (Espinoza *et al.*, 2005; García, 2007; Standley, 1926; Parodi, 1959). (Figura 3).

Distribución. Puebla, Veracruz y Oaxaca.



Figura 3. Hábitat donde se desarrolla *Agave potatorum* Zucc.

Cuadro 2. Características de *Agave potatorum* Zucc. y *Agave karwinskii* Zucc.

Especie	Hábito	Planta				Hoja			Tiempo de maduración (año)
		Altura (m)	Ancho (m)	Forma	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Espinas laterales	Longitud de espina terminal (cm)	
<i>Agave karwinskii</i> (cirial)	Rosetófila arborescente	2.6	1.4	Linear	62	5.2	Presente	2.9	
<i>Agave potatorum</i> (tobalá)	Rosetófila acaule	0.6	0.8	Ovada	34	13.1	Presente	3.9	6-7

Fuente: SEMARNAT-INIFAP (2007b).

Descripción de los predios

Los datos de campo usados para ejemplificar la generación de los modelos predictivos se obtuvieron en la comunidad de San Baltasar Guelavila, municipio San Dionicio Ocoatepec para el caso del agave tobalá y para agave cirial en Santa María Zoquitlán, municipio Santa María Zoquitlán, ambos ubicados en el estado de Oaxaca (Figura 4).



Figura 4. Ubicación geográfica de los predios San Baltasar Guelavila y Santa María Zoquitlán, Oax.

Las características topográficas y ecológicas de los predios donde se obtuvo la información de campo se indican en el Cuadro 3. Debe tenerse presente que éstas son las condiciones bajo las cuales deberán aplicarse los modelos referidos en este documento.

Diseño de muestreo y tamaño de muestra

En virtud de que la normatividad forestal para la recolecta de los agaves mezcaleros establece el requerimiento del peso fresco de las “piñas” de agave por unidad de superficie, es evidente que la unidad de muestreo debe ser una parcela de área fija. Dado que el peso fresco total de las “piñas” factible de aprovecharse en la unidad de muestreo, resulta de la suma de los valores correspondientes a los agaves presentes (ejemplares listos para extraerse), el objetivo final es obtener el peso fresco de la “piña” por planta de agave.

Cuadro 3. Descripción topográfica y ecológica de los predios muestreados para la generación de los modelos predictivos de agaves mezcaleros.

Agave mezcalero	Comunidad	Tipo de vegetación	Altitud (msnm)	Clima	Precipitación media anual (mm)	Temperatura media anual (°C)	Suelo
Tobalá	San Baltasar Guelavila	Bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva.	1,800 a 2,200	(A)C(w _o) Semicálido, templado, subhúmedo, lluvias de verano, lluvia invernal del 5 al 10.2% anual	400-800	17-18	I/2 Litosol textura media
Cirial	Santa María Zoquitlán	Selva baja caducifolia con vegetación secundaria y agricultura.	1,400 a 1,450	BS,hw Semiárido, templado, lluvias en verano, lluvia invernal del 5 al 10.2% anual	400-800	16-18	I/2 Litosol textura media

En estas condiciones, las unidades de muestreo son parcelas de área fija y las unidades de estudio los individuos de agave de talla comercial.

Agave potatorum. Para la generación del modelo correspondiente al agave tobalá se recomienda aplicar un muestreo con cuadrantes de punto central, en donde se

mide el individuo aprovechable presente, más cercano al centro, en cada uno de ellos. Los cuadrantes se identifican con los números del uno al cuatro, en el sentido de las manecillas del reloj (Figura 5).

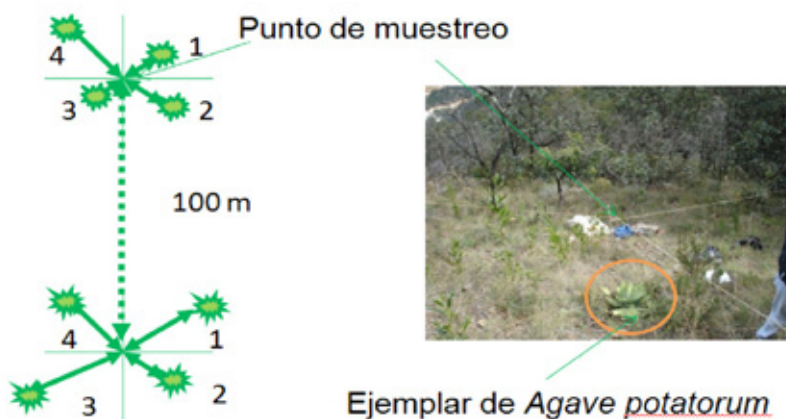


Figura 5. Evaluación de *Agave potatorum* Zucc. mediante muestreo de punto central.

El número de unidades de muestreo como aquellas referidas en las líneas anteriores debe ser por lo menos de 60. Tamaño de muestra que garantiza el cumplimiento del supuesto de normalidad de los errores del modelo de regresión (Montgomery *et. al.*, 2004). De hecho, si en cada punto de muestreo se consideran cuatro plantas (una por cuadrante) se lograrían 240 observaciones para la estimación de los parámetros del modelo y su validación.

A partir de la premisa de que las plantas de agave tobalá se distribuyen espacialmente al azar, en algún grado, el muestreo aleatorio es equivalente al sistemático (Scheaffer *et al.*, 1987). Al respecto, se sugiere establecer las unidades de muestreo bajo un patrón de este tipo, a equidistancias de por lo menos 100 m (Figura 6). La localización de los puntos de muestreo en campo se facilita mediante el uso de GPS de mediana precisión.

Agave karwinskii. Las plantas crecen formando pequeños grupos (figuras 7a, 7b), por lo que el muestreo en conglomerados resulta ser el más apropiado (Rodríguez, 1998). En tales condiciones cada manchón constituye el conglomerado y la unidad de estudio es el individuo con madurez comercial (Figura 8). Los conglomerados son de tamaño variable; por lo tanto el número que integre la muestra dependerá de la cantidad de plantas comerciales existentes en cada uno de ellos. No obstante, también se requerirán alrededor de 240 observaciones, a fin de garantizar tanto la normalidad de los residuales (Montgomery, *et. al.* 2004), como los datos suficientes para la validación del modelo.

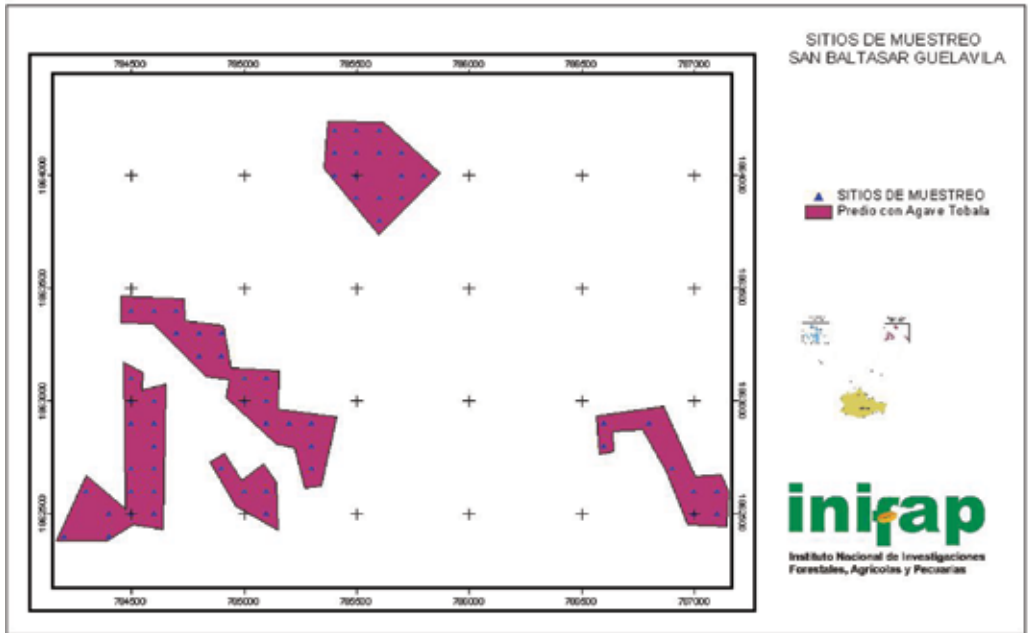


Figura 6. Distribución sistemática de las unidades de muestreo para la evaluación de *Agave potatorum* Zucc. (tobalá).



Figura 7a. Ejemplar de *Agave karwinskii* Zucc.



Figura 7b. Distribución espacial de *Agave karwinskii* Zucc.

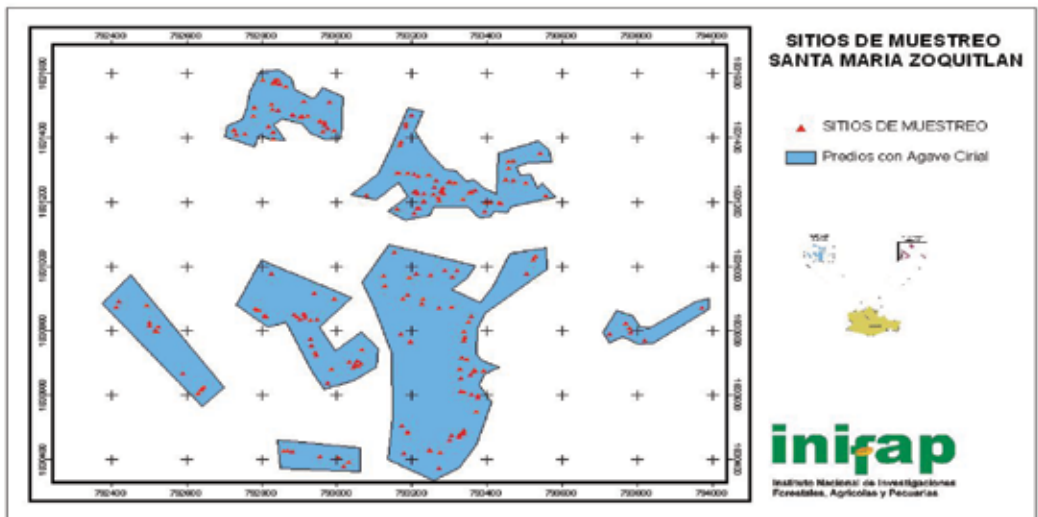


Figura 8. Distribución de las unidades de muestreo para la evaluación de *Agave karwinskii*.

Obtención de la altura total, diámetro de la roseta y peso fresco de la piña

Agave potatorum. La altura total de la planta (cm); así como el diámetro menor y mayor de la “roseta” (cm) son variables que están correlacionadas con el peso total en verde de la piña (kg) ($0.5 < r < 0.7$), por lo que su medición se hace directamente en el campo; para las primeras se utiliza un flexómetro graduado al centímetro (Figuras 9a y 9b); mientras que el peso se registra con una balanza de carátula de reloj (Figura 10).



Figura 9. Medición del diámetro y altura de *Agave potatorum* Zucc.



Figura 10. Obtención del peso de la “piña” de *Agave potatorum* Zucc.

Un factor adicional que influye en la predicción del peso fresco de la “piña” es la floración de la planta. Al respecto, los recolectores identifican dos tipos de magueyes: el “capón” que corresponde a individuos a los que se les ha eliminado el escapo floral y con ello se garantiza una mayor concentración de azúcares en la “piña”; el segundo se denomina “pabilo” y es un ejemplar maduro, que se caracteriza por el acortamiento y adelgazamiento de sus hojas (cogollo delgado) y en el que aún no emerge el escapo floral (Figuras 11a y 11b).



Figura 11. Maguey “capón” (a) y maguey “pabilo” (b).

Agave karwinskii. La altura total de la planta (cm) y el diámetro de la “roseta” (cm) son variables que están correlacionadas con el peso total en verde de la “piña” (kg) ($0.65 < r < 0.75$), por lo que su medición se hace directamente en el campo; para las primeras se utiliza un flexómetro graduado al centímetro (Figuras 12a y 12b); mientras que el peso se registra con una balanza de carátula de reloj (Figura 13).



Figura 12. Medición del diámetro y altura de *Agave karwinskii* Zucc.

De manera similar al maguey tobalá, en el caso del cirial también es importante registrar el tipo de planta, en relación a la formación del escapo floral: “capón” o “pabilo” (Figuras 14a y 14b).



Figura 13. Obtención del peso de la piña de *Agave karwinskii* Zucc.

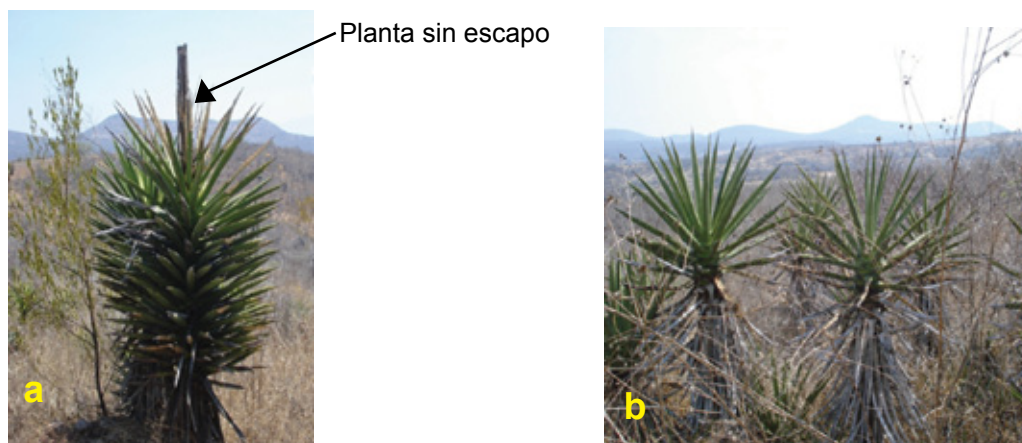


Figura 14. Maguey cirial “capón” (a) y “pabilo” (b).

En ambos casos, el registro del diámetro de la roseta y de la altura de la planta, se debe a que además de ser dos variables con poder explicativo relativamente bueno, se trata de dos variables que se obtienen con cierta facilidad mediante el uso de instrumentos de medición de bajo costo.

En el cuadro 4 se presenta un resumen de los principales estadísticos de las variables evaluadas en campo para los dos agaves mezcaleros.

Cuadro 4. Estadísticos básicos de *Agave potatorum* y *Agave karwinskii*.

Especie	Variable	Número de observaciones	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
<i>Agave potatorum</i>	Altura total (cm)	236	55.74	12.21	29.0	97.0
	Diámetro promedio de roseta* (cm)	236	99.56	21.08	50.5	160.5
	Peso de la piña (kg)	236	10.62	5.35	3.0	32.5
<i>Agave karwinskii</i>	Altura total (cm)	237	163.77	41.99	80.0	315.0
	Diámetro de roseta (cm)	237	88.26	20.58	36.0	153.0
	Peso de la piña (kg)	237	11.62	7.62	2.0	46.0

*Incluye el promedio del diámetro menor y el diámetro mayor de la roseta.

Base de datos

Agave potatorum. La información de campo se captura en una tabla, para lo cual se sugiere utilizar un programa de cómputo, por ejemplo Excel, en la cual el diámetro menor (cm) y el diámetro mayor de la “roseta” (cm), la altura total de la planta (cm), el tipo de maguey (con escape o sin escape) y el peso total de la “piña” (kg) constituyen los campos (columnas); mientras que, los registros (filas) están definidos por los ejemplares de maguey tobalá presentes en cada una de las unidades de muestreo (Cuadro 5). Otras variables de clasificación, como la comunidad o el predio, pueden ser incluidas en la base de datos.

Cuadro 5. Formato para la integración de la base de datos de *Agave potatorum*.

Unidad de estudio	Número de planta	Diámetro menor de la “roseta” (cm)	Diámetro mayor de la “roseta” (cm)	Altura total de la planta (cm)	Tipo de maguey (con escapo o sin escapo)	Peso de la “piña” (kg)
1						
2						
3						
⋮						
n						

Agave karwinskii. De manera similar al caso anterior, la información de campo correspondiente a maguey cirial también se captura en un cuadro, por ejemplo en Excel, con la diferencia de que ahora se toma en cuenta un sólo diámetro de la roseta (Cuadro 6).

Cuadro 6. Formato para la integración de la base de datos de *Agave karwinskii*.

Conglomerado	Número de planta	Diámetro de la “roseta” (cm)	Altura total de la planta (cm)	Tipo de maguey (con escapo o sin escapo)	Peso de la “piña” (kg)
1					
2					
3					
⋮					
n					

Generación del modelo predictivo de *Agave potatorum*

Una vez reunida la información por unidad de estudio (planta), es posible generar el modelo de regresión múltiple, cuya variable dependiente es el peso fresco de la “piña” y las independientes son las indicadas en el Cuadro 7.

En general, el modelo de regresión múltiple es de la siguiente forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \quad (1)$$

Donde, la y es la variable de interés (peso fresco de la “piña” de agave) y las x 's corresponden a las independientes indicadas en el Cuadro 7. El término ε

representa a las variables aleatorias normales e independientes con media 0 y varianza desconocida, pero constante. Estos son los supuestos del modelo, cuyo cumplimiento deberá verificarse.

Cuadro 7. Variables consideradas para la generación del modelo de regresión.

Tipo de variable	Clave	Descripción
Dependiente (y)	Pesopina	Peso fresco de la “piña” (kg)
Independiente (x ₁)	Diamprom*	Diámetro promedio de la roseta (cm)
Independiente (x ₂)	Alttotal	Altura total de la planta (cm)
Independiente (x ₃)	Indicado	Es una variable indicadora que se define de la siguiente forma: sí madurez = capón, entonces Indicado = 1, sí madurez = pabilo, entonces Indicado = 0.

*Considera el promedio del diámetro menor y el diámetro mayor de la roseta.

En todo momento debe tenerse en cuenta que el nivel de estimación es la “piña”, es decir, dado el diámetro de la “roseta”, la altura de la planta y el tipo de maguey, en relación con la presencia de escape; el modelo estimará el peso fresco de la “piña” correspondiente a esa planta, en particular.

Un modelo de uso común, por sus propiedades estadísticas, en el campo de la biometría forestal es de Schumacher, cuya expresión algebraica es la siguiente:

$$y = \beta_0 x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} \varepsilon \quad (2)$$

Donde:

y = peso fresco de la “piña” de agave
x₁ = diámetro promedio de la roseta
x₂ = altura total de la planta

Sin embargo, con el fin de incluir la variable indicadora y la interacción de ésta con las variables cuantitativas, se recomienda emplear, en principio, el modelo que a continuación se describe (Montgomery, *et. al.* 2004):

$$y = \beta_0 x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} e^{\beta_3 x_3 + \beta_4 (\ln(x_1)) x_3 + \beta_5 (\ln(x_2)) x_3} \varepsilon \quad (3a)$$

Donde:

y = peso fresco de la “piña” de agave
 x_1 = diámetro promedio de la roseta
 x_2 = altura total de la planta
 x_3 = variable indicadora

$(\ln(x_1))x_3$ = Define la interacción diámetro promedio de la “roseta” (transformado mediante logaritmo natural) y la variable indicadora
 $(\ln(x_2))x_3$ = interacción altura total de la planta (transformado mediante logaritmo natural) y la variable indicadora.

Mediante algebra sencilla y con el empleo de las propiedades de los logaritmos se obtiene una expresión equivalente al modelo (3a), cuya forma es similar al modelo (2):

$$y = \beta_0 x_1^{\beta_1 + \beta_4 x_3} x_2^{\beta_2 + \beta_5 x_3} e^{\beta_3 x_3} \varepsilon \quad (3b)$$

El modelo (3a) se puede linealizar con la función logaritmo natural; de tal manera que, es posible estimar los parámetros a partir de la teoría de la regresión lineal (Martínez y Martínez, 2002). Es decir:

$$\begin{aligned} \ln(y) &= \ln(\beta_0 x_1^{\beta_1 + \beta_4 x_3} x_2^{\beta_2 + \beta_5 x_3} e^{\beta_3 x_3} \varepsilon) \\ \ln(y) &= \ln(\beta_0) + \beta_1 \ln(x_1) + \beta_2 \ln(x_2) + \beta_3 x_3 + \\ &(\beta_4 (\ln(x_1))) x_3 + (\beta_5 (\ln(x_2))) x_3 + \ln \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

Finalmente se tiene:

$$y^* = \beta_0^* + (\beta_1^* x_1^*) + (\beta_2^* x_2^*) + \beta_3 x_3 + (\beta_4^* x_1^*) x_3 + (\beta_5^* x_2^*) x_3 + \varepsilon^* \quad (5)$$

Donde:

$$y^* = \ln y, \beta_0^* = \ln(\beta_0), x_1^* = \ln(x_1), x_2^* = \ln(x_2), \varepsilon^* = \ln(\varepsilon)$$

Es importante señalar que después de aplicar mínimos cuadrados ordinarios al modelo (4) ó (5), se logra un modelo “logaritmizado”, por lo que se debe utilizar la función **exp (e)** para generar un modelo con las unidades originales, similar a la expresión (3).

$$\begin{aligned} e^{\hat{\ln}(y)} &= e^{(\hat{\ln}\beta_0 + \hat{\beta}_1 \ln(x_1) + \hat{\beta}_2 \ln(x_2) + \hat{\beta}_3 x_3 + (\hat{\beta}_4 (\ln(x_1))) x_3 + (\hat{\beta}_5 (\ln(x_2))) x_3} + \ln \varepsilon \\ e^{\hat{\ln}(y)} &= e^{(\hat{\ln}\beta_0 + \ln(x_1)^{\hat{\beta}_4} + \ln(x_2)^{\hat{\beta}_5} + \hat{\beta}_3 x_3 + (\hat{\beta}_4 (\ln(x_1))) x_3 + (\hat{\beta}_5 (\ln(x_2))) x_3} + \ln \varepsilon \end{aligned}$$

$$\hat{y} = e^{\ln \hat{\beta}_0} e^{\ln(x_1)^{\hat{\beta}_1}} e^{\ln(x_2)^{\hat{\beta}_2}} e^{(\hat{\beta}_3 x_3 + (\hat{\beta}_4 (\ln(x_1))) x_3 + (\hat{\beta}_5 (\ln(x_2))) x_3)} + \ln \varepsilon$$

$$\hat{y} = \exp(\ln(\hat{\beta}_0)) x_1^{\hat{\beta}_1} x_2^{\hat{\beta}_2} e^{(\hat{\beta}_3 x_3 + (\hat{\beta}_4 (\ln(x_1))) x_3 + (\hat{\beta}_5 (\ln(x_2))) x_3)} + \ln \varepsilon$$

Por lo tanto, es necesario transformar las variables indicadas en el Cuadro 7 mediante logaritmo natural (Cuadro 8).

Cuadro 8. Variables transformadas para la generación del modelo de regresión.

Tipo de variable	Clave	Descripción
Dependiente (y^*)	LOGPesopina	Peso de la “piña” (kg) transformada mediante logaritmo natural.
Independiente (x_1')	LOGDiamprom	Diámetro promedio de la “roseta” (cm) transformada mediante logaritmo natural.
Independiente (x_2')	LOGAlttotal	Altura total de la planta (cm) transformada mediante logaritmo natural.
Independiente (x_3)	Indicado	Variable indicadora del tipo de maguey. Sí tipo = capón, entonces Indicado=1, sí tipo = pabilo, entonces Indicado=0.

En cualquier paquete estadístico que contenga el módulo de regresión es factible estimar los parámetros del modelo (4) ó (5); sin embargo, dada su popularidad en el campo de la estadística aplicada y la facilidad con que se realizan los análisis estadísticos, se recomienda el uso de Statistical Analysis System (SAS). Varios trabajos se han publicado sobre el uso de dicho paquete computacional, por lo que para los detalles de su sintaxis se sugiere consultar a Der y Everitt (2002) o Herrera y Barrera (2001).

Si bien es cierto que el modelo (4) resulta interesante desde el punto de vista de la biometría forestal, en la práctica es posible que todas o solamente algunas de esas variables sean significativas, por lo que en una primera fase deben seleccionarse aquellas variables independientes que contribuyan significativamente a la predicción del peso de la “piña”. Este procedimiento se ejemplifica enseguida con datos procedentes de la comunidad de San Baltasar Guelavila, municipio San Dionicio Ocotepc, Oaxaca.

En la Figura 15 se muestra la base de datos de las variables registradas en San Baltasar Guelavila. Con **Data tobala** se le indica al sistema que genere un archivo que se llame **tobala**. Con **input** se le indica al sistema el nombre de las variables de la base de datos, así **Predioo** se refiere a que los datos que se tomaron en campo (**Guelavil** es el nombre codificado). **Puntomue** identifica a la unidad de muestreo; **Coordexm** y **Coordeym** se refieren, respectivamente, a la coordenada X y Y de los puntos de muestreo. **Plantacua** corresponde a los ejemplares de agave tobalá que fueron evaluados en cada punto de muestreo; **Distanci** es la distancia del centro de muestreo a la planta evaluada. **Diamros1** el diámetro mayor de la “roseta” (cm), **Diamros2** el diámetro menor de la “roseta” (cm), **Alttotal** la altura total de la planta de agave (cm) y **Madurez** es una variable que refiere el tipo de maguey (1 = capón y 2 = pabilo). **Peripina** es el perímetro de la “piña” (cm), **Pesopina** el peso de la “piña” (kg) y **Ejemplar** define una variable que identifica a cada planta medida. Aun cuando la base de datos contiene muchas variables, de acuerdo al modelo (4), únicamente, son de interés Peripina, Diamros1, Diamros1, Alttotal y Pesopina.

```

1=data tobala;
2 input Predioo $ Puntomue Coordexm Coordeym Plantacua Distanci Diamros1 Diamros2 Alttotal Madurez Peripina Pesopina Ejemplar;
3 Diamprom=(Diamros1+Diamros2)/2;
4 if Madurez=1 then Indicado=1; else Indicado=0;
5 cards;
6 Guelavil 204 784900 1863200 1 23.0 87 86 51 1 84 9.5 1
7 Guelavil 204 784900 1863200 2 5.6 86 84 48 2 78 6.5 2
8 Guelavil 204 784900 1863200 3 5.7 84 82 46 1 93 12.0 3
9 Guelavil 204 784900 1863200 4 16.3 92 87 50.8 1 86 10.0 4
10 Guelavil 205 784900 1863300 1 46.5 113 110 62 2 100 13.0 5
11 Guelavil 205 784900 1863300 2 39.2 110 106 70 2 100 13.5 6
12 Guelavil 205 784900 1863300 3 9.3 116 115 56 1 102 15.0 7
13 Guelavil 205 784900 1863300 4 32.8 85 80 43 1 78 7.0 8
14 Guelavil 183 784800 1863300 1 36.7 106 104 64 1 97 14.5 9
15 Guelavil 183 784800 1863300 2 63.0 109 108 60 1 89 10.5 10
16 Guelavil 183 784800 1863300 3 27.9 85 84 62 1 82 8.5 11
17 Guelavil 183 784800 1863300 4 52.5 91 86 60 1 94 10.8 12
18 Guelavil 182 784800 1863200 1 37.7 96 81 52 1 77 7.0 13
19 Guelavil 182 784800 1863200 2 60.0 91 85 53 2 97 12.0 14
20 Guelavil 182 784800 1863200 3 4.3 53 48 50 2 66 5.0 15
21 Guelavil 182 784800 1863200 4 42.7 99 95 62 2 91 9.0 16
22 Guelavil 161 784700 1863300 1 39.3 97 89 51 1 94 11.0 17
23 Guelavil 161 784700 1863300 2 51.0 109 95 51 2 99 13.0 18
24 Guelavil 161 784700 1863300 3 23.0 109 96 62 1 102 14.0 19
25 Guelavil 161 784700 1863300 4 59.0 126 118 84 1 109 23.0 20
26 Guelavil 140 784600 1863400 1 24.3 120 115 65 1 102 15.0 21
27 Guelavil 140 784600 1863400 2 14.0 95 102 65 2 106 16.5 22
28 Guelavil 140 784600 1863400 3 7.7 79 70 50 2 81 6.0 23
29 Guelavil 140 784600 1863400 4 27.0 143 132 70 1 104 16.3 24
30 Guelavil 162 784700 1863400 1 34.4 100 82 71 1 78 10.0 25

```

Figura 15. Base datos de las variables consideradas para el modelo predictivo del agave tobalá.

En el programa de la Figura 15 se genera la variable **Diamprom** como el promedio de **Diamros1** y **Diamros2**. Así mismo, se origina una variable indicadora denominada **Indicado**, la cual toma el valor de 1 si **Madurez** = 1, es decir, sí tipo de maguey = capón y el valor de 0 sí **Madurez** = 2, cuando el tipo de maguey = pabilo.

Hasta ahora, se ha logrado integrar toda la información para la selección estadística de las variables que contribuyen de manera significativa a predecir el peso de la “piña”. Tarea que se ejecuta mediante el comando **backward** mostrado en el programa SAS que se ilustra en la Figura 16.

```

320 data tobias4; set tobias;
321 if Puntosue=204 and Plantacua=1 then Pesopina=. ;
322 if Puntosue=204 and Plantacua=2 then Pesopina=. ;
323 if Puntosue=205 and Plantacua=1 then Pesopina=. ;
324 if Puntosue=118 and Plantacua=3 then Pesopina=. ;
325 if Puntosue=246 and Plantacua=2 then Pesopina=. ;
326 if Puntosue=267 and Plantacua=3 then Pesopina=. ;
327 if Puntosue=245 and Plantacua=1 then Pesopina=. ;
328 if Puntosue=245 and Plantacua=3 then Pesopina=. ;
329 if Puntosue=289 and Plantacua=1 then Pesopina=. ;
330 if Puntosue=288 and Plantacua=3 then Pesopina=. ;
331 if Puntosue=287 and Plantacua=4 then Pesopina=. ;
332 if Puntosue=507 and Plantacua=4 then Pesopina=. ;
333 if Puntosue=510 and Plantacua=1 then Pesopina=. ;
334 if Puntosue=111 and Plantacua=4 then Pesopina=. ;
335 if Puntosue=515 and Plantacua=2 then Pesopina=. ;
336 if Puntosue=114 and Plantacua=3 then Pesopina=. ;
337 if Puntosue=344 and Plantacua=1 then Pesopina=. ;
338 if Puntosue=323 and Plantacua=1 then Pesopina=. ;
339 if Puntosue=368 and Plantacua=3 then Pesopina=. ;
340 if Puntosue=343 and Plantacua=4 then Pesopina=. ;
341 if Puntosue=365 and Plantacua=3 then Pesopina=. ;
342 if Puntosue=520 and Plantacua=4 then Pesopina=. ;
343 if Puntosue=526 and Plantacua=4 then Pesopina=. ;
344 LOGPesopina=LOG(Pesopina);
345 LOGDiamprom=LOG(Diamprom);
346 LOGAltttotal=LOG(Altttotal);
347 LOGDiampromIndicado=LOGDiamprom*Indicado;
348 LOGAltttotalIndicado=LOGAltttotal*Indicado;
349 proc reg;
350 MODEL LOGPesopina= LOGDiamprom LOGAltttotal Indicado LOGDiampromIndicado LOGAltttotalIndicado /selection=backward;
351 run;

```

Figura 16. Instrucciones para seleccionar las variables significativas.

En el Cuadro 9 se explica de manera detallada la estructura de este programa.

De las líneas 321 a 343 que aparecen en la Figura 16 se le indica al sistema que el peso fresco de la “piña” correspondiente a esas observaciones lo designe con un punto; de esta manera quedan excluidas del análisis de regresión. Ese conjunto de observaciones es una muestra aleatoria seleccionada de la base de datos con fines de validación del modelo. Aunque, tales datos no participen en la generación del modelo, el sistema calcula sus valores predichos puntuales y sus respectivos intervalos de confianza (Martínez y Martínez, 2002).

Al ejecutar el programa mostrado en la Figura 16 puede ocurrir que todas o solamente algunas de las variables independientes del modelo resulten significativas.

Cuadro 9. Programa SAS para seleccionar las variables significativas.

Comando	Significado
Data tobala4;	Se indica al sistema que genere un conjunto de datos cuyo nombre es “tobala4”.
set tobala;	El conjunto de datos “tobala4” tendrá las variables de interés contenidas en el conjunto de datos denominado “tobala”, mismas que se indican enseguida: Diamprom: Diámetro promedio de la “roseta” (cm). Altttotal: Altura total de la planta de agave (cm). Pesopina: Peso de la “piña” (kg).
LOGPesopina=LOG(Pesopina);	Se crea la variable “LOGPesopina” que es igual al logaritmo natural de “Pesopina”.
LOGDiamprom=LOG(Diamprom);	Se crea la variable “LOGDiamprom” que es igual al logaritmo natural de “Diamprom”.
LOGAltttotal=LOG(Altttotal);	Se crea la variable “LOGAltttotal” que es igual al logaritmo natural de “Altttotal”.
LOGDiampromIndicado=LOGDiamprom*Indicado;	Se crea la variable “LOGDiampromIndicado” que es igual al logaritmo natural de “Diamprom” multiplicada por la variable indicadora.
LOGAltttotalIndicado=LOGAltttotal*Indicado;	Se crea la variable “LOGAltttotalIndicado” que es igual al logaritmo natural de “Altttotal” multiplicada por la variable indicadora.
proc reg; MODEL LOGPesopina= LOGDiamprom LOGAltttotal Indicado LOGDiampromIndicado LOGAltttotalIndicado / selection =backward; run;	Se obtiene el Análisis de Varianza y la R ² . Se estiman los parámetros del modelo (4). Se considera “LOGPesopina” como la variable dependiente y “LOGDiamprom”, “LOGAltttotal”, “Indicado”, “LOGDiampromIndicado” y “LOGAltttotalIndicado” como las variables independientes. Con el comando backward se seleccionan las variables que contribuyen significativamente al modelo.

Para el ejemplo de San Baltasar Guelavila, la variable “LOGAlttotalIndicado” resultó no significativa, lo cual se concluye al observar que el valor correspondiente a la prueba de F es mayor de 0.05 (Figura 17).

```

                    procedimiento REG
                    Modelo: MODEL1
                    Variable dependiente: LOGPesopina

                    Backward Elimination: Paso 1

```

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type III SS	F-Valor	Pr > F
Término independien	-4.04638	0.69683	3.11302	33.72	<.0001
LOGDiampron	1.06607	0.16344	3.92797	42.55	<.0001
LOGAlttotal	0.33235	0.12244	0.68018	7.37	0.0072
Indicado	-2.05866	0.89570	0.48769	5.28	0.0225
LOGDiampronIndicado	0.49633	0.19542	0.59551	6.45	0.0118

Límites en el número de la condición: 459.8, 3664

All variables left in the model are significant at the 0.1000 level.

```

                    Resumen de Backward Elimination

```

Step	Variable Removed	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F-Valor	Pr > F
1	LOGAlttotalIndicado	4	0.0026	0.5768	5.3040	1.30	0.2548

Figura 17. Resultados del programa SAS de la Figura 16

La variable “LOGAlttotalIndicado”, no fué significativa; ya que el valor de probabilidad de la prueba de F es de 0.2548.

Con las variables que resultaron significativas, se ejecuta de nuevo el análisis de regresión, pero ahora se agregan otros comandos para evaluar los supuestos del modelo de regresión y para generar los intervalos de confianza de la predicción. En la Figura 18 se presenta el correspondiente programa SAS.

En la Figura 18, las instrucciones de la línea 361 a 391 se explicaron en el Cuadro 9, por lo que en el Cuadro 10 se muestran a partir del **proc reg**.

```

361 data tobala5; set tobala;
362 if Puntomue=204 and Plantacua=1 then Pesopina='.';
363 if Puntomue=204 and Plantacua=2 then Pesopina='.';
364 if Puntomue=205 and Plantacua=1 then Pesopina='.';
365 if Puntomue=118 and Plantacua=3 then Pesopina='.';
366 if Puntomue=246 and Plantacua=2 then Pesopina='.';
367 if Puntomue=267 and Plantacua=3 then Pesopina='.';
368 if Puntomue=245 and Plantacua=1 then Pesopina='.';
369 if Puntomue=245 and Plantacua=3 then Pesopina='.';
370 if Puntomue=289 and Plantacua=1 then Pesopina='.';
371 if Puntomue=288 and Plantacua=3 then Pesopina='.';
372 if Puntomue=287 and Plantacua=4 then Pesopina='.';
373 if Puntomue=507 and Plantacua=4 then Pesopina='.';
374 if Puntomue=510 and Plantacua=1 then Pesopina='.';
375 if Puntomue=111 and Plantacua=4 then Pesopina='.';
376 if Puntomue=515 and Plantacua=2 then Pesopina='.';
377 if Puntomue=114 and Plantacua=3 then Pesopina='.';
378 if Puntomue=344 and Plantacua=1 then Pesopina='.';
379 if Puntomue=323 and Plantacua=1 then Pesopina='.';
380 if Puntomue=368 and Plantacua=3 then Pesopina='.';
381 if Puntomue=343 and Plantacua=4 then Pesopina='.';
382 if Puntomue=365 and Plantacua=3 then Pesopina='.';
383 if Puntomue=520 and Plantacua=4 then Pesopina='.';
384 if Puntomue=526 and Plantacua=4 then Pesopina='.';
385 LOGPesopina=LOG(Pesopina);
386 LOGDiamprom=LOG(Diamprom);
387 LOGAlttotal=LOG(Alttotal);
388 LOGDiampromIndicado=LOGDiamprom*Indicado;
389 LOGAlttotalIndicado=LOGAlttotal*Indicado;
390 DiampromAlttotal=Diamprom*Alttotal;
391 LOGDiampromAlttotalIndicado=LOG(DiampromAlttotal)*Indicado;
392 proc reg;
393 MODEL LOGPesopina= LOGDiamprom LOGAlttotal Indicado LOGDiampromIndicado /cli p r ds;
394 output out=i p=predicho r=residual LCL=LIP UCL=LSP;
395 plot r.*p.;
396 run;
397 proc univariate normal;var residual;
398 run;
399 PROC CAPABILITY NORMALTEST; VAR residual; HISTOGRAM residual/NORMAL; RUN;
400 PROC CAPABILITY DATA=i; VAR RESIDUAL; PPLOT RESIDUAL/NORHAL(COLOR=GREEN); RUN;
401

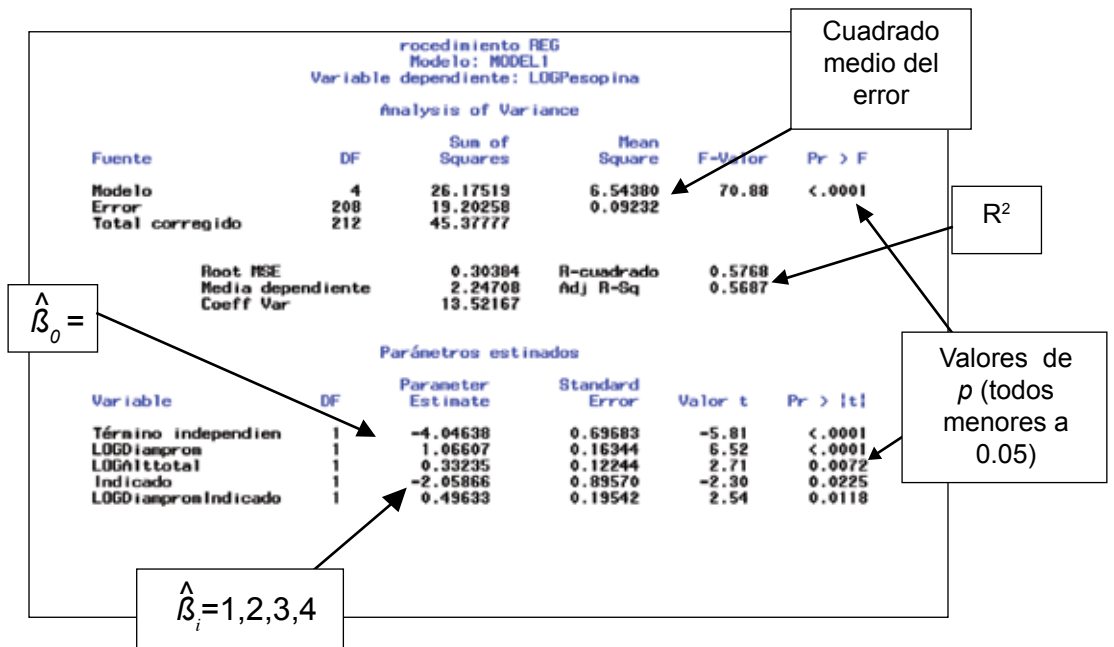
```

Figura 18. Programa SAS para estimar los parámetros del modelo (4).

Cuadro 10. Detalles del programa SAS para estimar los parámetros del modelo (4).

Comando	Significado
<pre>proc reg; MODEL LOGPesopina= LOGDiamprom LOGAlttotal Indicado LOGDiampromIndicado LOGAlttotalIndicado cli p r dw; output out=i p=predicho r=residual LCL=LIP UCL=LSP; plot r.*p.; run;</pre>	<p>Se obtiene el Análisis de Varianza y la R^2. Se estiman los parámetros del modelo (4). Se considera "LOGPesopina" como la variable dependiente y "LOGDiamprom", "LOGAlttotal", "Indicado", "LOGDiampromIndicado" y "LOGAlttotalIndicado" como las variables independientes.</p> <p>Con <code>cli</code> se obtienen los límites inferiores y superiores de la predicción individual, con <code>p</code> los valores predichos, con <code>r</code> los residuales y con <code>dw</code> se obtiene el estadístico de Durbin-Watson.</p> <p>Se genera un archivo que se llama "i" y renombran las variables "p" (predichos), "r" (residuales), LCL (límite inferior de la predicción individual) y UCL (límite superior de la predicción individual).</p> <p>Mediante la instrucción <code>plot r.*p.</code> se genera una gráfica bidimensional con las variables "residual" (eje de las Y) y "predicho" (eje de las X).</p> <p><code>run</code> permite que el programa se ejecute.</p>
<pre>proc univariate normal;var residual; run;</pre>	<p>Se hace la prueba de normalidad de los residuales.</p>
<pre>PROC CAPABILITY NORMALTEST; VAR residual; HISTOGRAM residual/NORMAL; RUN;</pre>	<p>Se hace un histograma de los residuales y una gráfica de la distribución normal.</p>
<pre>PROC CAPABILITY DATA=h; VAR RESIDUAL; PPLOT RESIDUAL/ NORMAL(COLOR=GREEN); RUN;</pre>	<p>Se crea una gráfica que compara la función de distribución acumulativa empírica de los residuales con la función de distribución acumulativa teórica de la normal.</p>

Resultado 1. Análisis de varianza, R^2 y coeficientes de regresión estimados.



Como se observa, el valor de p correspondiente a la prueba de F es menor a 0.05; por lo tanto, se concluye que existe una relación lineal entre el logaritmo del peso de la “piña” y cualquiera de las variables predictivas (regresoras) transformadas incluidas en el modelo (Montgomery *et al.*, 2004). Además, en virtud de que todos los valores de las pruebas de t son menores a 0.05, implica que cada una de las variables independientes contribuye en forma significativa al modelo.

La $R^2 = 0.57$ indica que casi 60% de la variabilidad de “LOGPesopina” se explica por el modelo de regresión.

Los coeficientes estimados de regresión son:

$$\hat{\beta}_0 = -4.04638, \hat{\beta}_1 = 1.06607, \hat{\beta}_2 = 0.33235, \hat{\beta}_3 = -2.05866 \text{ y } \hat{\beta}_4 = 0.49633.$$

En estas condiciones, el modelo de regresión para estimar el peso de la “piña” a partir del diámetro promedio de la “roseta” y de la altura de la planta, queda de la siguiente manera:

$$\hat{y} = 0.01749 x_1^{1.06607} x_2^{0.33235} e^{-2.05866x_3} e^{0.49633 \ln x_1 x_3} \quad (5a)$$

$$\hat{y} = 0.01749 x_1^{1.06607} x_2^{0.33235} e^{-2.05866x_3 + 0.49633 \ln x_1 x_3} \quad (5b)$$

Donde:

\hat{y} = Peso estimado la "piña" (kg)

x_1 = Diámetro promedio de la roseta (cm)

x_2 = Altura total de la planta (cm)

$\ln(x_1)$ = Logaritmo natural del diámetro promedio de la roseta (cm)

x_3 = Tipo de maguey

$$0.01749 = \text{EXP}(-4.04638)$$

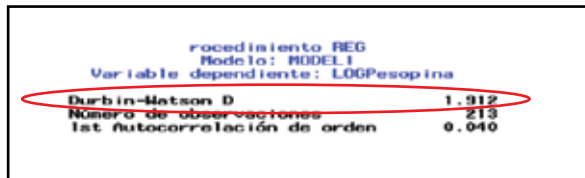
Al considerar las plantas cuyo tipo corresponde al capón, es decir, $x_3 = 1$, el modelo (5) se reduce a la siguiente expresión:

$$\hat{y} = 0.01749 x_1^{1.06607} x_2^{0.33235} e^{-2.05866 + 0.49633 \ln x_1} \quad (6a)$$

Así mismo, para las plantas tipo pabito, el modelo resultante es:

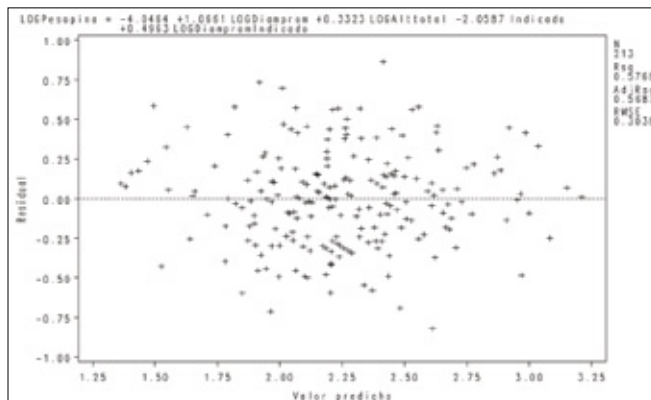
$$\hat{y} = 0.01749 x_1^{1.06607} x_2^{0.33235} \quad (6b)$$

Resultado 2. Estadístico de Durbin-Watson.



Puesto que el estadístico DW = 1.912, se establece que no existe autocorrelación en los errores. De acuerdo con Pérez (2003) es deseable tener valores relativamente cercanos a 2.

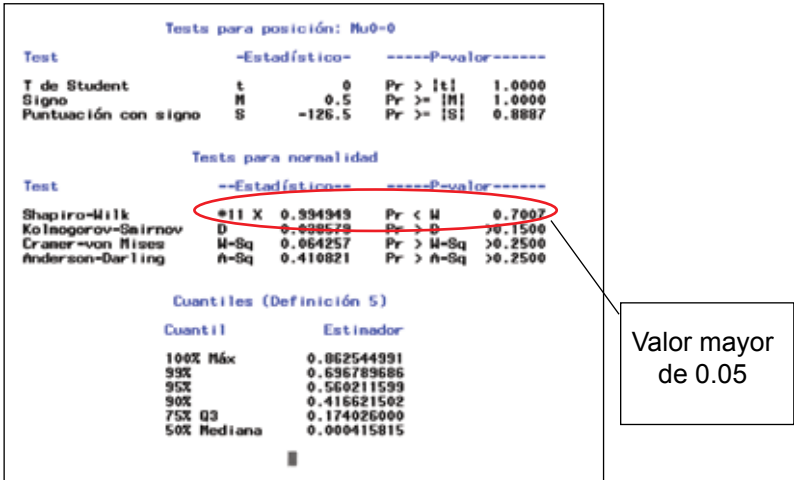
Resultado 3. Gráfica de dispersión de residuales.



En la gráfica se aprecia que la dispersión de los residuales no presenta ningún tipo

de embudo o de arco, por lo que puede decirse que el supuesto de la varianza constante, se cumple.

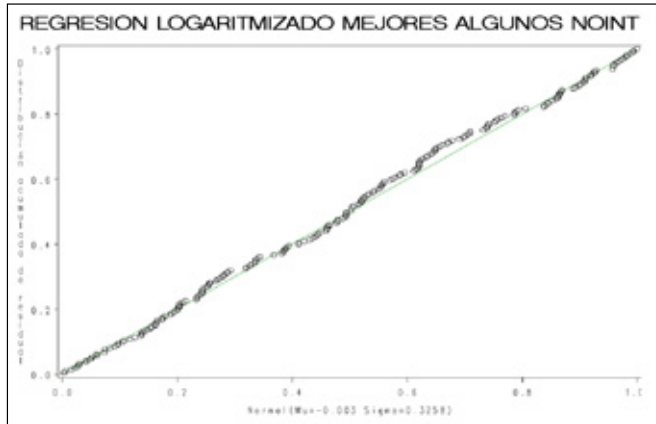
Resultado 4. Estadístico de Shapiro-Wilk



El supuesto de normalidad de los errores se cumple, puesto que el valor de $p = 0.7007$ correspondiente a la prueba de Shapiro-Wilk es mayor de 0.05.

Resultado 5. Gráficas de normalidad





En las dos gráficas se observa de nuevo que el supuesto de normalidad en los errores se cumple. En la primera, los residuales se ajustan a una campana de Gauss y en la segunda, en general, se ajustan a una línea recta que pasa por el origen y que tiene pendiente = 1.

Validación del modelo predictivo para *Agave potatorum*.

La siguiente etapa, una vez generado el modelo predictivo, es la obtención de los valores predichos (en unidades originales); así como de los límites inferiores y superiores de la predicción (intervalos de confianza al 95%) para aquellas observaciones que fueron excluidas del análisis de regresión. En la Figura 19 se presenta el programa SAS para realizar dichos cálculos.

```

404 data tobaco10; set t1;
405 if Plantas=204 and F1actores=0;
406 Plantas=204 and F1actores=0;
407 Plantas=205 and F1actores=1;
408 Plantas=118 and F1actores=3;
409 Plantas=246 and F1actores=2;
410 Plantas=267 and F1actores=3;
411 Plantas=245 and F1actores=1;
412 Plantas=245 and F1actores=3;
413 Plantas=220 and F1actores=1;
414 Plantas=208 and F1actores=3;
415 Plantas=207 and F1actores=4;
416 Plantas=503 and F1actores=4;
417 Plantas=510 and F1actores=1;
418 Plantas=111 and F1actores=4;
419 Plantas=515 and F1actores=2;
420 Plantas=114 and F1actores=3;
421 Plantas=344 and F1actores=1;
422 Plantas=323 and F1actores=1;
423 Plantas=360 and F1actores=3;
424 Plantas=343 and F1actores=4;
425 Plantas=505 and F1actores=3;
426 Plantas=520 and F1actores=4;
427 Plantas=526 and F1actores=4;
428 P=plantas*(EXP(-4.64535))*(Diapom**0.04487)*(Alf10001**0.33235)*(EXP(-0.05066*Indicador1))*(EXP(0.49033*LOG10propr*Indicador1));
429 P=plantas*EXP(predicho);
430 P=plantas*EXP(LSP)/%limite inferior*/2;
431 P=plantas*EXP(LSP)/%limite superior*/2;
432 P=plantas*EXP(LSP);
433 PROC PRINT; RUN;
434

```

Figura 19. Programa SAS para obtener los valores predichos, los límites inferiores y superiores de la predicción, en unidades originales.

En el Cuadro 11 se presenta la explicación detallada de la programación.

De la línea 405 a la 427 se le indica al sistema que incluya las observaciones que fueron excluidas del análisis de regresión (Figura 16 y 18). De hecho, estos registros tienen valores estimados, pero no observados, luego entonces, para comparar los valores reales y los estimados conviene invocar el conjunto de datos “tobala” y renombrar la variable “Pesopina”. La siguiente ventana (Figura 20) permite realizar esta operación de manera automática. La nueva variable generada se llama “**Pesopinao**”.

Cuadro 11. Detalles del programa SAS de la Figura 19.

Comando	Significado
data tobala6;	Se indica al sistema que genere un conjunto de datos que se llame “tobala6”.
set i;	El conjunto de datos “tobala6”, contendrá las mismas variables de interés contenidas en el conjunto de datos “i”, es decir: predicho: Valor predicho del peso de la “piña”. LIP: Límite inferior de la predicción individual. LSP: Límite superior de la predicción individual. Estas tres variables están transformadas mediante logaritmo natural.
PesopinaPUN=(EXP(- 4.04638))*(Diamprom** 1.0660 7)*(Alttotal** 0.33235)*(EXP(- 2.05866 *Indicado))*(EXP(0.4 9633 *LOGDiamprom*Indica do));	Se crea manualmente la variable “PesopinaPUN” que corresponde el peso de la “piña”. Esta manera de obtener el peso de la “piña” permite visualizar el uso de los parámetros del modelo (5)
PesopinaESP=EXP(predicho); PesopinaESL=EXP(LIP); PesopinaESS=EXP(LSP); Planta=Ejemplar;	Se crea de manera directa la variable “PesopinaESP” que corresponde el peso de la “piña”. Se crea la variable “PesopinaESL” que es igual al EXP de “LIP”. Se crea la variable “PesopinaESS” que es igual al EXP de “LSP”. Estas cuatro variables contienen la información en las unidades originales, es decir, en kg. Se genera la variable “Planta” que es igual a la variable “Ejemplar” considerada inicialmente

En La Figura 21 se muestra el programa SAS para la validación del modelo como tal. Se crea el archivo “**tobala8**”, mismo que está integrado por los archivos “**tobala6**” y “**tobala7**”. El comando **MERGE** permite unir estos dos últimos archivos de manera horizontal. El texto a la derecha del signo igual de las variables creadas en las figuras 19 y 20, describe el significado de la variable. La variable **DIFERENCI** se refiere a la diferencia de los valores estimados y los predichos (kg). Con el comando “**PROC GPLOT**” se obtiene una gráfica, en la que los valores de “Pesopinao”, “PesopinaESL”, “PesopinaESP” y “PesopinaESS” son las series; por lo tanto, se localizan en el eje de las Y’s; mientras que, la variable “Planta” se ubica en el eje de las X’s. La instrucción **OVERLAY legend** permite que todas las series se visualicen en la misma gráfica. Finalmente, con **PROC MEANS MEAN T PRT; VAR DIFERENCI; RUN;** se obtiene una prueba de t apareada para la variable DIFERENCI.

```

436 data tobala7; set tobala;
437 if Puntomue=204 and Plantacua=1 or
438 Puntomue=204 and Plantacua=2 or
439 Puntomue=205 and Plantacua=1 or
440 Puntomue=118 and Plantacua=3 or
441 Puntomue=246 and Plantacua=2 or
442 Puntomue=267 and Plantacua=3 or
443 Puntomue=245 and Plantacua=1 or
444 Puntomue=245 and Plantacua=3 or
445 Puntomue=289 and Plantacua=1 or
446 Puntomue=288 and Plantacua=3 or
447 Puntomue=287 and Plantacua=4 or
448 Puntomue=507 and Plantacua=4 or
449 Puntomue=510 and Plantacua=1 or
450 Puntomue=111 and Plantacua=4 or
451 Puntomue=515 and Plantacua=2 or
452 Puntomue=114 and Plantacua=3 or
453 Puntomue=344 and Plantacua=1 or
454 Puntomue=323 and Plantacua=1 or
455 Puntomue=368 and Plantacua=3 or
456 Puntomue=343 and Plantacua=4 or
457 Puntomue=365 and Plantacua=3 or
458 Puntomue=520 and Plantacua=4 or
459 Puntomue=526 and Plantacua=4;
460 Pesopinao=Pesopina*1;
461 proc print; run;

```

Figura 20. Programa SAS para renombrar la variable “Pesopina”.

```

465= DATA tobela8; MERGE tobela6 tobela7;
466
467
468
469 LABEL Pesopinao=' PESO PIÑA OBSERVADO'
470 PesopinaESL=' LIMITE INFERIOR DEL PREDICHO'
471 PesopinaESP=' PESO PIÑA PREDICHO'
472 PesopinaESS=' LIMITE SUPERIOR DEL PREDICHO';
473 DIFERENCI='PesopinaESP-Pesopinao;
474= PROC PRINT; RUN;
475= PROC PLOT; SYMBOL I=SPLINE V=CIRCLE H=1.0 ; PLOT Pesopinao*Planta PesopinaESL*Planta PesopinaESP*Planta PesopinaESS*Planta/ OVERLAY legend; RUN;
476= PROC PLOT; PLOT PesopinaESP*Pesopinao'.'; RUN;
477
478= PROC MEANS MEAN T PRT; VAR DIFERENCI; RUN;
479
480
...

```

Figura 21. Programa SAS para graficar el valor observado del peso de la “piña” el predicho, los límites inferiores y superiores contra la variable planta.

En la Figura 22, se observa que el modelo (5) predice bastante bien aquellas observaciones excluidas del análisis de regresión, de hecho los intervalos de confianza (línea roja y azul) atrapan a los valores observados (línea negra). Además, el valor de p , correspondiente a la prueba de t apareada es mayor de 0.05 (Figura 23), por lo que no existen diferencias significativas entre los valores observados y los predichos para la variable peso de la “piña”. Por lo tanto, el modelo (5) se considera apropiado, a pesar de tener un coeficiente de determinación alrededor de 0.60.

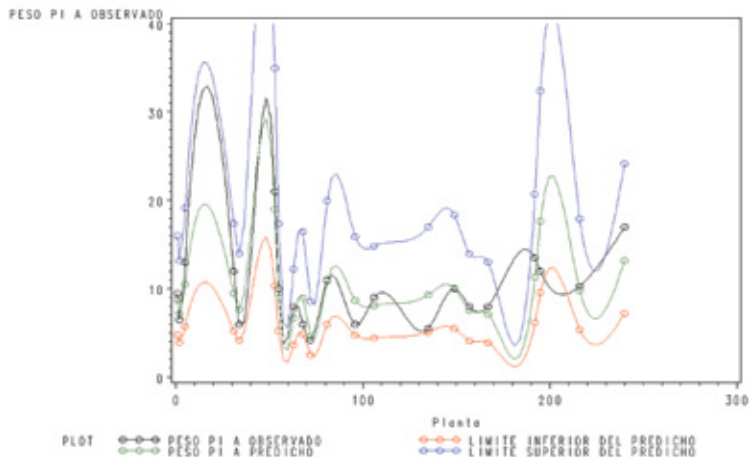


Figura 22. Intervalos de confianza al 95% para la variable peso de la “piña” con datos de *Agave potatorum*.

Procedimiento MEANS

Variable de análisis : DIFERENCI

Media	Valor t	Pr > t
-0.0057402	-0.01	0.9910

Figura 23. Valor de p de la prueba de t apareada para *Agave potatorum*.

Tablas de producción *Agave potatorum*

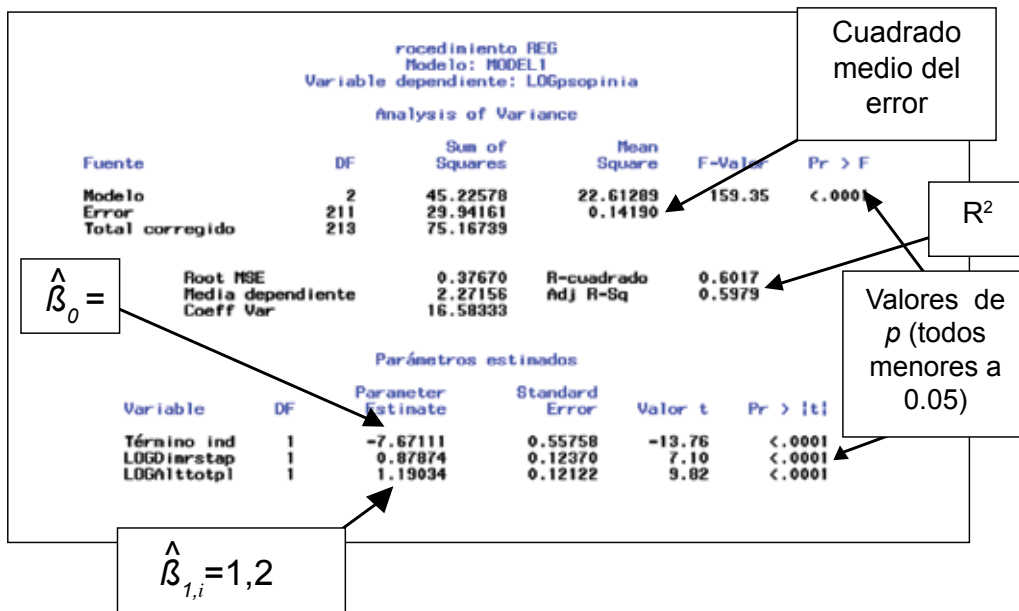
Al sustituir valores de diámetros promedio de la “roseta” (cm) y alturas totales de las plantas (cm) en la ecuación (6a) y (6b) se obtiene una tabla de producción de agave tobalá para las plantas cuyo tipo corresponde al capón (Apéndice 1) y para plantas en pabilo (Apéndice 1), respectivamente. En ambos casos, la intersección de una fila y una columna determina el peso estimado de la “piña”. Así, por ejemplo, si el diámetro promedio de la “roseta” se clasifica en una categoría de 100 cm con una de altura de 60 cm, el peso estimado de la “piña” será de 11.60 kg para las plantas tipo capón (Apéndice 1) y de 9.24 kg para las plantas tipo pabilo (Apéndice 1).

Generación del modelo predictivo para *Agave karwinskii*

Al considerar la estructura del modelo (4) ó (5) y al aplicar el mismo procedimiento estadístico señalado en las Figuras 16 y 18, se obtuvieron los siguientes resultados:

Resultado 1. Análisis de varianza, R^2 y coeficientes de regresión estimados.

Se observa que el valor de p correspondiente a la prueba de F , es menor a 0.05; por lo tanto se concluye que existe una relación lineal entre el logaritmo del peso de la “piña” y cualquiera de la variables predictivas (regresoras) transformadas incluidas en el modelo (Montgomery *et al.*, 2004). En virtud de que todos los valores de las pruebas de t son menores a 0.05, cada una de las variables independientes contribuye en forma significativa al modelo.



La $R^2 = 0.60$ indica que 60% de la variabilidad del “logaritmo del peso de la “piña” se explica por el modelo de regresión generado.

Los coeficientes estimados de regresión son:

$$\hat{\beta}_0 = -7.67111, \hat{\beta}_1 = 0.87874 \text{ y } \hat{\beta}_2 = 1.19034$$

El modelo de regresión para estimar el peso de la “piña” del agave cirial a partir del diámetro de la “roseta” y de la altura de la planta, queda de la siguiente manera:

$$\hat{y} = 0.00047x_1^{0.87874} x_2^{1.19034} \quad (7)$$

Donde:

y = Peso estimado la “piña” (kg)

x_1 = Diámetro de la roseta (cm)

x_2 = Altura total de la planta (cm)

0.00047 = EXP(-7.67111)

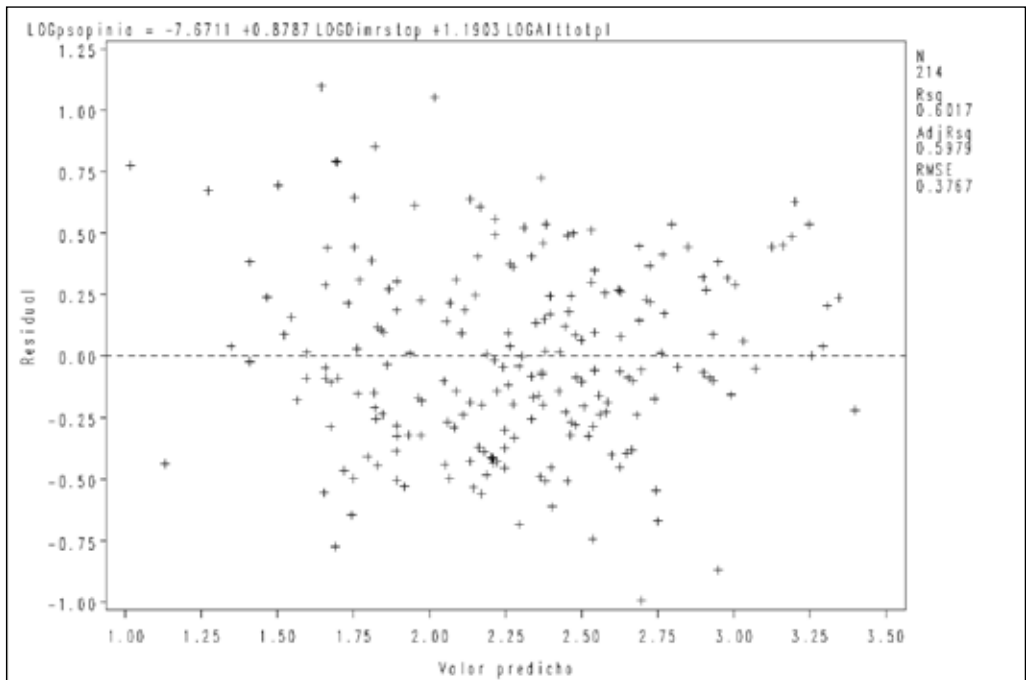
A partir de la expresión (7), es claro que para este caso la variable “el tipo de maguey” no resultó significativa, por lo que el modelo obtenido es, relativamente, sencillo.

Resultado 2. Estadístico de Durbin-Watson.

Procedimiento REG	
Modelo: MODEL1	
Variable dependiente: LOGpsopinia	
Durbin-Watson D	1.573
Número de observaciones	214
1st autocorrelación de orden	0.206

Puesto que el estadístico DW = 1.573, no existe autocorrelación en los errores. De acuerdo con Pérez (2003), es deseable tener valores relativamente cercanos a 2.

Resultado 3. Gráfica de dispersión de residuales.



En la gráfica se aprecia que la dispersión de los residuales no presenta ningún tipo de embudo o de arco, por lo que el supuesto de la varianza constante se cumple.

Resultado 4. Estadístico de Shapiro-Wilk

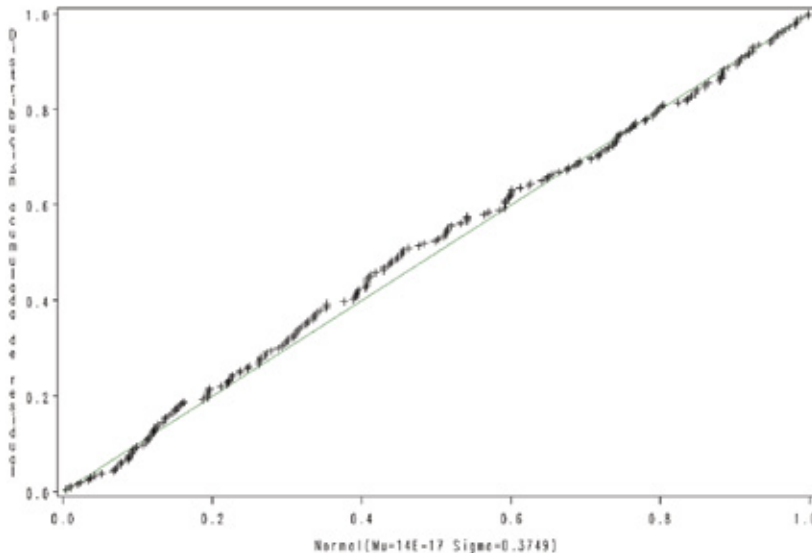
Tests para normalidad				
Test		--Estadístico--		----P-valor-----
Shapiro-Wilk	*11 X	0.993975	Pr < W	0.5437
Kolmogorov-Smirnov	D	0.049371	Pr > D	>0.1500
Cramer-von Mises	W-Sq	0.069566	Pr > W-Sq	>0.2500
Anderson-Darling	A-Sq	0.417508	Pr > A-Sq	>0.2500

Cuantiles (Definición 5)	
Cuantil	Estimador
100% Máx	1.0965404
99%	0.8525816
95%	0.6388182
90%	0.4927735
75% Q3	0.2564520
50% Mediana	-0.0426229
25% Q1	-0.2678564
10%	-0.4556363
5%	-0.5469531
1%	-0.7742401
0% Mín	-0.9918552

Valor mayor de 0.05

El supuesto de normalidad de los errores se cumple, puesto que valor de $p=0.5437$ correspondiente a la prueba de Shapiro-Wilk es mayor de 0.05.

Resultado 5. Gráficas de normalidad



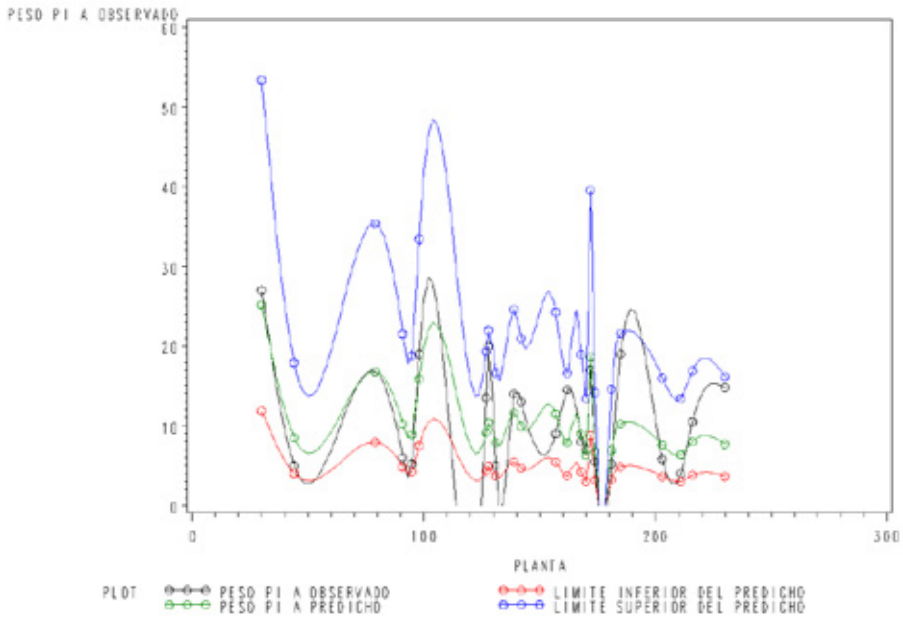


Figura 24. Intervalos de confianza al 95% para la variable peso de la “piña” con datos de *Agave karwinskii*.

Procedimiento MEANS

Variable de análisis : DIFERENCI

Media	Valor t	Pr > t
-1.0239109	-1.20	0.2430

Figura 25. Valor de p de la prueba de t apareada para *Agave karwinskii*.

Por lo tanto, el modelo generado (7) se considera apropiado, a pesar de tener un coeficiente de determinación alrededor del 0.60.

Tabla de producción *Agave karwinskii*

Al sustituir valores de diámetros de la “roseta” (cm) y alturas totales de las plantas (cm) en la ecuación (7) se obtiene una tabla de producción para el agave cirial (Apéndice

2). En dicha tabla la intersección de una fila y una columna determina el peso estimado de la “piña”. Así, por ejemplo, si el diámetro de la “roseta” se clasifica en una categoría de 100 cm y en una de altura de 200 cm, el peso estimado de la “piña” será de 14.62 kg.

Ventajas y desventajas de los modelos generados

Con base en los resultados obtenidos se considera que el peso de la “piña” de agave tobalá y de agave cirial se puede predecir, adecuadamente, a partir del diámetro de la “roseta” y de la altura de la planta. Se trata de tres modelos novedosos, cuya aplicación resulta muy sencilla, una vez que se registran en campo los parámetros requeridos por el modelo.

Cabe señalar que los modelos obtenidos tienen como inconveniente que su aplicación espacial se restringe a poblaciones de maguey con características ecológicas similares a las de San Baltasar Guelavilla y Santa María Zoquitlán, Oaxaca, localidades donde se obtuvo la información de campo que sirvió de base para la elaboración de dichas ecuaciones alométricas. No obstante, a partir de la descripción que se hace en el documento, respecto a la generación del modelo, es posible seguir el método y originar uno equivalente para otros predios productores de agaves mezcaleros.

Además los resultados que aquí se documentan son una primera aproximación en el uso de herramientas estadísticas de tipo alométrico para el cálculo de las existencias potenciales de aprovechamiento en las poblaciones silvestres de las especies de *Agave* recolectadas para la producción de bebidas alcohólicas, de uso tradicional y comercial.

RECOMENDACIONES

Aun cuando las tablas de producción son de consulta fácil, para obtener mayor exactitud en las estimaciones, es preferible usar directamente las ecuaciones (6a) y (6b) para el caso de *Agave potatorum* y la ecuación (7) para *Agave karwinskii*.

REFERENCIAS

- De la Peña S., P. 2008. Hacia el rescate del agave comiteco. El faro • (Junio de 2008). No. 87. pp 7-9.
- Der, G. and B. S. Everitt. 2002. A Handbook of Statistical Analyses using SAS. Second Edition. CHAPMAN & HALL/CRC. Boca Raton, FL. USA. 351 p.
- Díaz V., M. A., J. L. Bretado V., E. Montiel A. 2007. Elaboración de tablas de producción para el agave en el municipio de Durango Dgo. *In: Memorias del VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Sociedad Mexicana de Recursos Forestales. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera- UMSNH. Morelia, Mich. México pp. 1-7.*
- Espinoza P., H., E. Mosqueda B., P. López L. y C. Arredondo V. 2005. El Agave Mezcalero de Oaxaca: Avances de investigación. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CIR-PAS. Libro Técnico No. 3. Oaxaca, Oax. México. 180 p.
- García M., A. J. 2004. Agaváceas. *In: García M., A. J., J. Ordóñez M. y M. Briones S. (Eds.). Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología. UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza. WWF. México, D. F. México. pp. 159-169.*
- García M., A. J. 2007. Los agaves de México. *Ciencias 87: 14-23.*
- González M., F. A. Castillo, G. R. Durán, C. Martínez del R. y J. M. Quintanilla. 1980. Estimaciones de biomasa a partir de la altura y la cobertura de plantas xerófitas. *In: Arid land resources inventories: Developing cost –efficient methods. United States Department of agriculture. North Central Forest Experiment Station. United States Forest Service. St. Paul, MN. USA. pp. 416-420.*
- Herrera H., J. G. y A. Barrera S. 2001. Manual de procedimientos. Análisis estadístico de experimentos pecuarios (utilizando el programa SAS). Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de Méx. México. 119 p.
- Illsley G., C., G. Rivera, A. Tlacotempa, P. Morales, J. García, T. Gómez, J. M. Martínez, J. Marcial, F. Castro, M. Calzada, S. Mancilla, P. García, L. Casarrubias, F. Hernández y J. Flores. 2004. Manual de manejo campesino de magueyes mezcaleros silvestres. CONABIO. Grupo de Estudios Ambientales, AC. SSS Sanzekan Tinemi. Rainforest Alliance. Asociación de Magueyeros y Mezcaleros del Chilapan. GEA, A.C. México, D. F. México. 29 p.
- Martínez G., A. y M.A. Martínez D. 2002. Introducción a los métodos econométricos. Grupo Editorial Sagitario. Texcoco, Edo. de Méx. México. 279 p.
- Montgomery, D. C., E. A. Peck y G. G. Vining. 2004. Introducción al análisis de regresión lineal. Trad. por V. González P. Compañía Editorial Continental. Primera reimpresión. México, D. F. México. 588 p.
- Parodi R., L. 1959. Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería. Vol. 1. Ed. ACME. Buenos Aires. Argentina. 246 p.

- Pérez L., C. 2003. Estadística. Problemas resueltos y aplicaciones. Pearson Prentice Hall. España. 485 p.
- Rodríguez F., C., 1998. Aplicación de diseños de muestreo en inventarios forestales. SAGDR/INIFAP. México, D. F. México. 156 p.
- Scheaffer, R. L., W. Mendenhall y L. Ott. 1987. Elementos de muestreo. Trad. por Rendón S., G. y J. R. Gómez A. Grupo Editorial Iberoamérica. México, D. F. México. 321 p
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2005. Ley general de desarrollo forestal sustentable y su reglamento. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. México. 267 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Investigaciones forestales, Agrícolas y Pecuarias. (SEMARNAT-INIFAP). 2007a. Manual que establece los Criterios Técnicos para el Aprovechamiento Sustentable de Recursos Forestales no Maderables de Clima Árido y Semiárido. Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental. Dirección General del Sector Primario y Recursos Naturales Renovables. 107 p. <http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Pages/publicaciones.aspx>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Investigaciones forestales, Agrícolas y Pecuarias. (SEMARNAT-INIFAP). 2007b. Manual que establece los Criterios Técnicos para el Aprovechamiento Sustentable de Recursos Forestales no Maderables de Clima Templado. 2007. Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental. Dirección General del Sector Primario y Recursos Naturales Renovables. 99 p. <http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Pages/publicaciones.aspx>
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 2001. The Value of Forest Ecosystems. Montreal, SCBD, Technical Series No. 4. 67p. <http://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-04.pdf>
- Standley, P. C. 1926. Trees and shrubs of Mexico. Contributions from the United States National Herbarium. By Paul C. Standley. Smithsonian Institution United States National Museum. Vol. 23. Washington DC. USA. pp. 107, 117, 123 y 136.

APÉNDICE 1

Tabla de producción de *Agave potatorum* obtenida a partir del modelo (6a). Plantas de agave tobalá en estado de madurez capón.

	Altura de planta (cm)															
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
Diametro de la roseta (cm)	3.62	3.81	3.98	4.14	4.29	4.43	4.56	4.68	4.80	4.91	5.01	5.12	5.21	5.31	5.40	
55	4.15	4.36	4.56	4.75	4.91	5.07	5.22	5.36	5.50	5.62	5.75	5.86	5.97	6.08	6.19	
60	4.70	4.95	5.17	5.38	5.57	5.75	5.92	6.08	6.23	6.37	6.51	6.64	6.77	6.89	7.01	
65	5.28	5.55	5.81	6.04	6.25	6.45	6.64	6.82	6.99	7.15	7.31	7.46	7.60	7.74	7.87	
70	5.88	6.19	6.47	6.72	6.96	7.19	7.40	7.60	7.79	7.97	8.14	8.31	8.47	8.62	8.77	
75	6.50	6.84	7.15	7.44	7.70	7.95	8.18	8.40	8.61	8.81	9.01	9.19	9.36	9.53	9.70	
80	7.15	7.52	7.86	8.18	8.47	8.74	9.00	9.24	9.47	9.69	9.90	10.10	10.30	10.48	10.66	
85	7.81	8.22	8.60	8.94	9.26	9.56	9.84	10.10	10.35	10.59	10.82	11.04	11.26	11.46	11.66	
90	8.50	8.95	9.36	9.73	10.08	10.40	10.70	10.99	11.27	11.53	11.78	12.02	12.25	12.47	12.69	
95	9.21	9.70	10.14	10.54	10.92	11.27	11.60	11.91	12.21	12.49	12.76	13.02	13.27	13.51	13.74	
100	9.94	10.46	10.94	11.38	11.78	12.16	12.52	12.85	13.17	13.48	13.77	14.05	14.32	14.58	14.83	
105	10.69	11.25	11.76	12.23	12.67	13.08	13.46	13.82	14.17	14.50	14.81	15.11	15.40	15.68	15.95	
110	11.46	12.06	12.61	13.11	13.58	14.02	14.43	14.82	15.19	15.54	15.88	16.20	16.51	16.81	17.10	
115	12.25	12.89	13.48	14.01	14.51	14.98	15.42	15.84	16.23	16.61	16.97	17.31	17.64	17.96	18.27	
120	13.05	13.74	14.36	14.94	15.47	15.97	16.44	16.88	17.30	17.70	18.09	18.45	18.81	19.15	19.48	
125	13.88	14.61	15.27	15.88	16.45	16.98	17.47	17.95	18.39	18.82	19.23	19.62	20.00	20.36	20.71	
130	14.72	15.50	16.20	16.85	17.45	18.01	18.54	19.04	19.51	19.96	20.40	20.81	21.21	21.59	21.97	
135	15.58	16.40	17.15	17.83	18.47	19.06	19.62	20.15	20.65	21.13	21.59	22.03	22.45	22.86	23.25	
140	16.46	17.33	18.11	18.84	19.51	20.13	20.73	21.28	21.81	22.32	22.80	23.27	23.72	24.15	24.56	
145	17.36	18.27	19.10	19.86	20.57	21.23	21.85	22.44	23.00	23.54	24.05	24.53	25.01	25.46	25.90	
150	18.27	19.23	20.10	20.90	21.65	22.35	23.00	23.62	24.21	24.77	25.31	25.82	26.32	26.80	27.26	
155	19.20	20.21	21.12	21.97	22.75	23.48	24.17	24.82	25.44	26.03	26.60	27.14	27.66	28.16	28.64	
160																

Tabla de producción de *Agave potatorum* obtenida a partir del modelo (6b). Plantas de agave tobalá en estado de madurez pabito.

	Altura de planta (cm)														
	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95		
50	3.69	3.86	4.01	4.15	4.29	4.41	4.53	4.65	4.75	4.86	4.96	5.05	5.14		
55	4.09	4.27	4.44	4.60	4.75	4.89	5.02	5.14	5.26	5.38	5.49	5.59	5.69		
60	4.48	4.69	4.87	5.05	5.21	5.36	5.51	5.64	5.77	5.90	6.02	6.13	6.25		
65	4.88	5.10	5.31	5.50	5.67	5.84	6.00	6.15	6.29	6.42	6.56	6.68	6.80		
70	5.28	5.52	5.74	5.95	6.14	6.32	6.49	6.65	6.81	6.95	7.09	7.23	7.36		
75	5.69	5.94	6.18	6.40	6.61	6.80	6.98	7.16	7.32	7.48	7.64	7.78	7.92		
80	6.09	6.37	6.62	6.86	7.08	7.29	7.48	7.67	7.85	8.02	8.18	8.34	8.49		
85	6.50	6.79	7.06	7.32	7.55	7.77	7.98	8.18	8.37	8.55	8.73	8.89	9.05		
90	6.91	7.22	7.51	7.77	8.03	8.26	8.48	8.69	8.90	9.09	9.27	9.45	9.62		
95	7.32	7.65	7.95	8.24	8.50	8.75	8.99	9.21	9.42	9.63	9.82	10.01	10.19		
100	7.73	8.08	8.40	8.70	8.98	9.24	9.49	9.73	9.95	10.17	10.38	10.58	10.77		
105	8.14	8.51	8.85	9.16	9.46	9.74	10.00	10.25	10.49	10.71	10.93	11.14	11.34		
110	8.55	8.94	9.30	9.63	9.94	10.23	10.51	10.77	11.02	11.26	11.49	11.71	11.92		
115	8.97	9.38	9.75	10.10	10.42	10.73	11.02	11.29	11.55	11.80	12.04	12.27	12.50		
120	9.38	9.81	10.20	10.57	10.91	11.23	11.53	11.82	12.09	12.35	12.60	12.84	13.08		
125	9.80	10.25	10.66	11.04	11.39	11.72	12.04	12.34	12.63	12.90	13.16	13.42	13.66		
130	10.22	10.68	11.11	11.51	11.88	12.23	12.55	12.87	13.17	13.45	13.73	13.99	14.24		
135	10.64	11.12	11.57	11.98	12.36	12.73	13.07	13.40	13.71	14.00	14.29	14.56	14.83		
140	11.06	11.56	12.02	12.45	12.85	13.23	13.59	13.93	14.25	14.56	14.85	15.14	15.41		
145	11.48	12.00	12.48	12.93	13.34	13.73	14.10	14.46	14.79	15.11	15.42	15.72	16.00		
150	11.90	12.44	12.94	13.40	13.83	14.24	14.62	14.99	15.34	15.67	15.99	16.29	16.59		
155	12.33	12.89	13.40	13.88	14.33	14.75	15.14	15.52	15.88	16.23	16.56	16.87	17.18		

A P É N D I C E 2

Tabla de producción de *Agave karwinskii* obtenida a partir del modelo (7).

	Altura de la planta (cm)																							
	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310
35	1.95	2.25	2.55	3.16	3.48	3.80	4.13	4.46	4.79	5.13	5.47	5.81	6.16	6.51	6.86	7.22	7.58	7.94	8.31	8.67	9.04	9.42	9.79	10.17
40	2.20	2.53	2.86	3.21	3.56	3.91	4.27	4.64	5.01	5.39	5.77	6.15	6.54	6.93	7.32	7.72	8.12	8.52	8.93	9.34	9.75	10.17	10.59	11.01
45	2.44	2.80	3.18	3.58	3.95	4.34	4.74	5.15	5.56	5.97	6.39	6.82	7.25	7.68	8.12	8.56	9.01	9.45	9.91	10.36	10.82	11.28	11.74	12.21
50	2.67	3.07	3.48	3.90	4.33	4.76	5.20	5.65	6.10	6.55	7.01	7.48	7.95	8.43	8.91	9.39	9.88	10.37	10.87	11.37	11.87	12.37	12.88	13.40
55	2.90	3.34	3.79	4.24	4.71	5.18	5.65	6.14	6.63	7.13	7.63	8.15	8.65	9.16	9.68	10.21	10.74	11.28	11.82	12.36	12.90	13.46	14.01	14.57
60	3.14	3.61	4.09	4.58	5.08	5.59	6.10	6.63	7.16	7.69	8.23	8.78	9.33	9.89	10.45	11.02	11.60	12.17	12.75	13.34	13.93	14.52	15.12	15.72
65	3.36	3.87	4.39	4.91	5.45	6.00	6.55	7.11	7.68	8.25	8.83	9.42	10.01	10.61	11.22	11.83	12.44	13.06	13.68	14.31	14.95	15.58	16.22	16.87
70	3.59	4.13	4.68	5.25	5.82	6.40	6.99	7.59	8.19	8.81	9.43	10.05	10.69	11.33	11.97	12.62	13.28	13.94	14.60	15.28	15.95	16.63	17.32	18.01
75	3.82	4.39	4.98	5.57	6.18	6.80	7.43	8.06	8.71	9.36	10.02	10.68	11.35	12.03	12.72	13.41	14.11	14.81	15.52	16.23	16.95	17.67	18.40	19.13
80	4.04	4.65	5.27	5.90	6.54	7.20	7.86	8.53	9.21	9.90	10.60	11.31	12.02	12.74	13.46	14.19	14.93	15.67	16.42	17.18	17.94	18.70	19.47	20.25
85	4.26	4.90	5.55	6.22	6.90	7.59	8.29	9.00	9.72	10.45	11.18	11.92	12.67	13.43	14.20	14.97	15.75	16.53	17.32	18.12	18.92	19.73	20.54	21.36
90	4.48	5.15	5.84	6.54	7.26	7.98	8.72	9.46	10.22	10.98	11.76	12.54	13.33	14.12	14.93	15.74	16.56	17.38	18.21	19.05	19.89	20.74	21.60	22.46
95	4.70	5.40	6.12	6.86	7.61	8.37	9.14	9.92	10.72	11.52	12.33	13.15	13.98	14.81	15.66	16.51	17.36	18.23	19.10	19.98	20.86	21.75	22.65	23.55
100	4.91	5.65	6.41	7.18	7.96	8.76	9.56	10.38	11.21	12.05	12.90	13.75	14.62	15.49	16.38	17.27	18.16	19.07	19.98	20.90	21.82	22.75	23.69	24.63
105	5.13	5.90	6.69	7.49	8.31	9.14	9.98	10.84	11.70	12.58	13.46	14.36	15.26	16.17	17.09	18.02	18.96	19.90	20.86	21.81	22.78	23.75	24.73	25.71
110	5.34	6.15	6.97	7.80	8.65	9.52	10.40	11.26	12.18	13.10	14.02	14.96	15.90	16.85	17.81	18.78	19.75	20.73	21.73	22.72	23.73	24.74	25.76	26.79
115	5.55	6.39	7.24	8.11	9.00	9.90	10.81	11.74	12.68	13.62	14.58	15.55	16.53	17.52	18.52	19.52	20.54	21.56	22.59	23.63	24.67	25.73	26.78	27.85
120	5.77	6.63	7.52	8.42	9.34	10.28	11.22	12.19	13.16	14.14	15.14	16.14	17.16	18.19	19.22	20.27	21.32	22.38	23.45	24.53	25.61	26.71	27.81	28.91
125	5.98	6.88	7.79	8.73	9.68	10.65	11.63	12.63	13.64	14.68	15.69	16.73	17.79	18.85	19.92	21.01	22.10	23.20	24.31	25.43	26.55	27.68	28.82	29.97
130	6.19	7.12	8.07	9.04	10.02	11.03	12.04	13.07	14.12	15.17	16.24	17.32	18.41	19.51	20.62	21.74	22.87	24.01	25.16	26.32	27.48	28.65	29.83	31.02
135	6.39	7.36	8.34	9.34	10.36	11.40	12.45	13.51	14.59	15.68	16.79	17.91	19.03	20.17	21.32	22.48	23.65	24.82	26.01	27.20	28.41	29.62	30.84	32.07
140	6.60	7.60	8.61	9.65	10.70	11.77	12.85	13.95	15.07	16.19	17.33	18.49	19.65	20.83	22.01	23.21	24.41	25.63	26.85	28.09	29.33	30.58	31.84	33.11
145	6.81	7.83	8.88	9.95	11.03	12.14	13.26	14.39	15.54	16.70	17.88	19.07	20.27	21.48	22.70	23.93	25.18	26.43	27.68	28.97	30.25	31.54	32.84	34.15
150	7.01	8.07	9.15	10.25	11.37	12.50	13.66	14.82	16.01	17.21	18.42	19.64	20.88	22.13	23.39	24.66	25.94	27.23	28.53	29.84	31.16	32.49	33.83	35.18
155	7.22	8.31	9.42	10.55	11.70	12.87	14.06	15.26	16.48	17.71	18.96	20.22	21.49	22.77	24.07	25.38	26.70	28.03	29.37	30.72	32.07	33.44	34.82	36.21

COMITE EDITORIAL DEL CENID-COMEF

Dr. Fabián Islas Gutiérrez

Presidente

M.C. Tomás Hernández Tejeda

Secretario Técnico

Ing. Francisco Camacho Morfín

Biól. José Francisco Reséndiz Martínez

Biól. Marisela C. Zamora Martínez

Vocales

Toda correspondencia relacionada con esta publicación, favor de dirigirla a:

Biól. Marisela C. Zamora Martínez

Av. Progreso No. 5

Barrio de Santa Catarina

C.P. 04010 México, D.F.

Correo-e: zamora.marisela@inifap.gob.mx

Tel. (0155)36268700 ext. 301 y 302

M.C. Efraín Velasco Bautista

Av. Progreso No. 5

Barrio de Santa Catarina

C.P. 04010 México, D.F.

Correo-e: velasco.efrain@inifap.gob.mx

Tel. (0155)36268700 ext. 406



CENID-COMEF
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACION DISCIPLINARIA
EN CONSERVACION Y MEJORAMIENTO DE
ECOSISTEMAS FORESTALES

inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias