

MODELOS DE ESTIMACION DE BIOMASA EN NOPAL (*Opuntia* spp.)

¹Flores H., A.; J.L. Rodríguez O.¹; F. Ramírez V.²

¹ Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx. C. P. 56230.

² URUZA-UACH, Bermejillo, Dgo.

RESUMEN. La estimación del área "foliar" en nopal fue hecha en forma manual mediante la fórmula del círculo ($\pi \times r^2$), y fue utilizada como variable independiente en el análisis de correlación y regresión contra las variables dependientes; área foliar "real" (determinada con integrador electrónico de área foliar LICOR LI-3100), peso fresco y peso seco del mismo cladodio o "penca", utilizándose 10 pencas tomadas al azar de cada una de 10 variedades agrupadas en las especies *Opuntia megacantha* (3), *O. ficus-indica* (4), y *O. amyclae*(3). Se probaron diferentes modelos de regresión lineal simple y se seleccionó el mejor por su coeficiente de determinación (R^2), cuadrado medio del error (CME) y coeficiente de variación (CV). La alta correlación entre las variables estudiadas (85 a 97%) permite, con mayor confianza, el uso del área foliar manual como variable independiente. Las ecuaciones de regresión para nopal en general son: Área foliar real (cm^2) = $20.89 + 0.821 \times \text{Área foliar manual}$; R^2 0.95 y CV=8.0%, Peso fresco (g) = $289.22 + 0.0010 \times (\text{Área foliar manual})^2$; R^2 0.78 y CV=20.9% Peso seco (g) = $31.62 + 0.000098 \times (\text{Área foliar manual})^2$; R^2 0.75, CV=21.1%. A nivel de especie se tuvo un mejor ajuste excepto en *O. megacantha*.

PALABRAS CLAVE: Modelos de regresión, área foliar, producción.

BIOMASS ESTIMATION MODELS IN PRICKLY PEAR (*Opuntia* spp.)

SUMMARY. Estimation of the "leaf" area in prickly pear was made manually by the circle formula ($\pi \times r^2$) and it was utilized as independent variable in the correlation and regression analysis vs the dependent variables; real leaf area (which was determined by electronic detection using a LICOR LI-3100 leaf area measurer, fresh weight and dry weight of the same cladode or "penca". In this work were utilized 10 cladodes randomly chosen from each of 10 varieties clustered in the species *Opuntia megacantha* (3), *O. ficus-indica* (4) and *O. amyclae* (3). Different models of simple linear regression were tested and selected by their determination coefficient (R^2), error mean square and variation coefficient (CV). The high correlation among variables (85 to 97%) allowed to select "manual" leaf area procedure as independent variable. The equations of regression for *Opuntia* spp. are: Real leaf area (cm^2) = $20.89 + 0.821 \times \text{manual leaf area}$, $r^2 = 0.95$ and CV = 8.0% Fresh weight (g) = $289.22 + 0.0010 \times (\text{manual leaf area})^2$; $r^2 = 0.78$ and CV=20.9% Dry weight (g) = $31.62 + 0.000098 \times (\text{manual leaf area})^2$; $r^2 = 0.75$ and CV=21.1%. All the species had a good adjustment, except *O. megacantha*.

KEY WORDS: Regression models, leaf area, production.

INTRODUCCION

La necesidad de construir modelos sobre patrones de crecimiento, productividad, etc., de los recursos forestales, se ha visto plenamente justificada al indicarse que la carencia de conocimientos sobre ello ha impedido la orientación adecuada de los sistemas de control en el aprovechamiento del recurso natural, lo que origina la explotación irracional, desmonte, sobrepastoreo, etc. Dichos modelos además tienen la ventaja de que permiten inventariar la vegetación existente, lo que deja en cierto momento medir el efecto del hombre sobre el ecosistema (Adlar, 1983).

Los modelos matemáticos son una de las herramientas analíticas más utilizadas en la actualidad para la generación de conocimientos en el área de creci-

miento y reproducción de masas forestales sujetas a un régimen de cultivo (Martin y Mendoza, 1983).

En la vegetación y cultivos potencialmente económicos de las zonas áridas; orégano (*Lippia* spp.), cordillón (*Nolina cespitosa*), lechuguilla (*Agave lechuguilla*) y palma (*Yucca* spp.), entre otros, se han realizado modelos orientados a predecir rendimiento de flor, fruto, hoja, tallo, etc., con base en las variables morfológicas fácilmente medibles en la planta como: altura, diámetro de tallo, cobertura, área foliar, vigor, etc. (Sáenz y Castillo, 1991; Flores et al., 1991).

En nopal (*Opuntia* spp.), ha pesar de su constante expansión como cultivo y creciente explotación comercial de sus productos; verdura (brote), fruto (tuna) y forraje (penca), se carece de modelos que permitan predecir rendimiento, área fotosintética, etc., proba-

blemente ello se deba a las características morfológicas de las regiones fotosintéticamente activas (pencas o cladodios), que generalmente contienen en forma dispersa gloquidios o espinas de diferente tipo y la forma elíptica de las pencas, que dificultan el cálculo de su área y peso, área que en el presente estudio se denominará área foliar.

En este trabajo se ensayaron a nivel de especie de nopal, varios modelos de regresión y se seleccionó el que permitió un mejor ajuste en la explicación del comportamiento de las variables dependientes: área foliar "real", peso fresco y peso seco, a partir de la estimación en campo de la variable independiente área foliar "manual" calculada a través de la medición de largo y ancho de penca ($\text{largo} + \text{ancho} / 4 = r^2$), y la aplicación de la fórmula del círculo ($\text{Área} = \pi \times r^2$).

El objetivo general de este trabajo fue el de seleccionar el mejor modelo de regresión lineal simple y con base en ello, establecer la ecuación que permita determinar el área foliar real, peso seco y peso fresco a partir del área "foliar" calculada en forma manual de pencas de nopal.

MATERIALES Y METODOS

Ubicación del trabajo

El presente trabajo se realizó en dos fases: la fase de campo, que comprendió el muestreo de variedades, se efectuó en el campo experimental de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo (URUZA-UACH), en Bermejillo, Dgo., ubicado en límites del Desierto Chihuahuense, donde predominan características de clima cálido seco BW, h'w (García, 1973), con precipitación promedio anual de 300 mm, y la fase de laboratorio, que consistió en la estimación de peso fresco y seco, se realizó en el laboratorio de química de la URUZA-UACH, y la medición del área foliar "real" de pencas se realizó en el laboratorio de fisiotecnia vegetal, del Colegio de Postgraduados en Montecillos, Estado de México.

Material vegetal

Se utilizaron 10 variedades identificadas taxonómicamente de acuerdo al sistema de clasificación de Britton y Rose (1963) y Bravo (1978). Estas fueron tomadas al azar de una reserva de 53 variedades, colectada en cinco diferentes estados de la República. Estas variedades se establecieron en vivero, en agosto de 1987, y fueron manejadas bajo condiciones de temporal. Las características de las variedades utilizadas se presentan en el Cuadro 1.

CUADRO 1. Características generales de las variedades de estudio.

VAR., CLAVE	ESPECIE	PROPÓSITO	ORIGEN
VI	<i>O. megacantha</i>	Tuna	Sn. Martín Edo. Méx.
V	<i>O. megacantha</i>	Verdura	Estado de México
I	<i>O. megacantha</i>	Tuna	Sn. Antonio de A. Coah.
VII	<i>O. ficus-indica</i>	Tuna	Sn. Juan T. Edo. de México
IX	<i>O. ficus-indica</i>	Tuna	Estado de México
III	<i>O. ficus-indica</i>	Verdura	Límites Zacatecas
T	<i>O. ficus-indica</i>	Tuna	Bermejillo, Dgo.
VIII	<i>O. amyclae</i>	Tuna	Sn. Martín Edo. de México
II	<i>O. amyclae</i>	Tuna	Pabellón, Ags.
IV	<i>O. amyclae</i>	Tuna	Límites Zacatecas

Metodología

En enero de 1995, a cada una de las variedades se le cortaron 10 pencas al azar, a las que se les midió largo (L) y ancho (A) para obtener su radio ($r^2 = L + A/4$), y con base en la fórmula del círculo; $\text{ÁREA} = (\pi \times r^2)$, se determinó su área foliar calculada en forma manual (área foliar "manual"). Cada penca se pesó para obtener peso fresco y posteriormente se dibujó en papel cartulina el contorno de cada penca (las pencas con espinas fueron previamente "quemadas" para eliminárselas), para determinarse área foliar "real" mediante el integrador electrónico de área foliar (LICOR LI-3100) y finalmente las pencas fueron secadas en estufa para obtener su peso seco.

En el análisis de la información se utilizó el paquete estadístico SAS, determinándose la correlación entre las variables en estudio, además de la regresión lineal simple entre la variable independiente área foliar "manual" y las variables dependientes área foliar "real", peso fresco y peso seco; con los siguientes modelos de regresión lineal simple:

- (1) $Y = \alpha + bX + \varepsilon$ Donde;
 (2) $Y = \alpha + bX^2 + \varepsilon$ $Y =$ Variable dependiente.
 (3) $Y = \alpha + bX^3 + \varepsilon$ $X =$ Variable independiente.
 (4) $Y = \alpha + b\text{Log}X + \varepsilon$ $\alpha =$ Intercepto.
 (5) $Y = \alpha + b\sqrt{x} + \varepsilon$ $b =$ Coeficiente de regresión.
 $\varepsilon =$ Error experimental.

El criterio para seleccionar el mejor modelo, que explicara el comportamiento de las variables, se basó en el máximo valor de R^2 (coeficiente de determinación), propuesto por Barr and Goodnight, (1972), así como en el menor valor del cuadrado medio del error experimental del ANAVA del modelo, de acuerdo con Volke (1981). El análisis estadístico se realizó a nivel de género *Opuntia* spp. y de especie *O. megacantha*, *O. ficus-indica* y *O. amyclae*.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los modelos empíricos biomatemáticos son usualmente desarrollados por el examen de correlación de datos colectados en muestras de una población de interés donde se aplican procedimientos estadísticos, usualmente de regresión, para estimar los parámetros del modelo (Amateis, 1994). Los resultados estadísticos media y error estándar de los datos obtenidos a nivel de género y especie se muestran en la Figura 1. Donde se aprecia por las barras de error estándar, que éste es alto para todas las variables, lo que indica que se presentó una amplia variación en cada una de las características estudiadas, situación que resulta favorable ya que se contó con cladodios desde muy pequeños (146 cm² y 169 g) hasta muy grandes (929 cm² y 1 514 g), por lo que se considera bien representada la población. Las diferencias a nivel de especie resultan poco contrastantes, como se puede apreciar en esta figura, resultando la especie *O. ficus-indica* y *O. amyclae* con mayor promedio en tamaño (área foliar manual y real) y peso húmedo.

RELACIONES DE CORRELACION DE LAS VARIABLES EN ESTUDIO

Las relaciones de correlación entre las diferentes variables se presentan en el Cuadro 2.

En este cuadro se observa que existe en general una alta correlación entre las variables de estudio, excepto para área "manual" y "real" vs peso fresco y peso seco de *O. megacantha*. Los altos valores de correlación registrados resultan de gran importancia porque posibilita el que la variable área foliar "manual" se pueda manejar como variable independiente. Esto significa, que las lecturas de área foliar tomadas en forma manual que son más económicas, fáciles y prácticas de realizar en campo, pueden utilizarse para calcular, con buena confiabilidad, las otras variables de interés (área foliar real, peso fresco y seco). Se observa también que en las especies *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia amyclae* la correlación entre las diferentes va-

CUADRO 2. Coeficientes de correlación de Pearson de las variables analizadas a nivel de género (*Opuntia* spp.) y a nivel de especie de nopal.

	Variable	Área real	Peso fresco	Peso seco
<i>Opuntia</i>	Area manual	0.9768**	0.8626**	0.8506**
"	Area real	-----	0.8759**	0.8614**
"	Peso fresco	-----	-----	0.9537**
<i>O. megacantha</i>	Area manual	0.9837**	0.5571 ^{N.S}	0.6260 ^{N.S}
"	Area real	-----	0.5559 ^{N.S}	0.6216 ^{N.S}
"	Peso fresco	-----	-----	0.9036**
<i>O. ficus-indica</i>	Area manual	0.9633**	0.9217**	0.9050**
"	Area real	-----	0.9137**	0.8981**
"	Peso fresco	-----	-----	0.9581**
<i>O. amyclae</i>	Area manual	0.9941**	0.9110**	0.9111**
"	Area real	-----	0.9164**	0.9167**
"	Peso fresco	-----	-----	0.9700**

** = Altamente significativa ^{N.S} = No. significativa

riables es mayor y por tanto, la estimación es más confiable. No obstante se tienen serios problemas con la identificación adecuada de la especie, ya que la clasificación presenta algunas dificultades, dado el enorme polimorfismo, producto del proceso de hibridación natural presente en cactáceas (Rzedowski, 1964).

Análisis de regresión de las variables de estudio

Para explicar la selección del mejor modelo, se incluyen los componentes principales del análisis de varianza (ANAVA) a nivel de género *Opuntia* spp. (Cuadro 3). En éste se observan las diferencias altamente significativas entre las variables de estudio para cada uno de los modelos ensayados. Además, resulta de primordial importancia la relación estrecha entre los componentes: cuadrado medio del error experimental (CMEE), coeficiente de determinación (R^2) y el coeficiente de variación (CV), de modo que el mejor modelo para cada una de las variables dependientes resulta fácil de detectar, ya que presenta paralelamente el máximo valor de R^2 , el mínimo valor del CMEE y del CV. Así por ejemplo, se tiene que es posible distinguir para la variable dependiente área foliar real que el modelo de regresión lineal que mejor se ajusta es de tipo (1) lineal. El máximo valor de R^2 indica que el 95.4% del comportamiento del área foliar real es explicado por el área foliar manual; es decir, que al aumentar el área

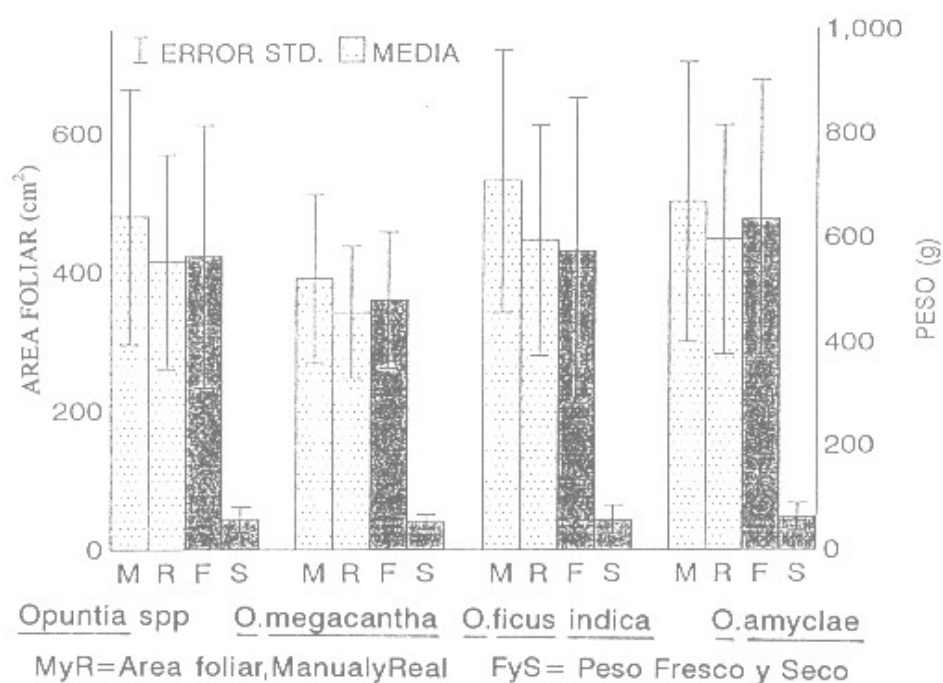


Fig. 1. Valor medio y error estándar de las variables analizadas a nivel género y especie de nopal.

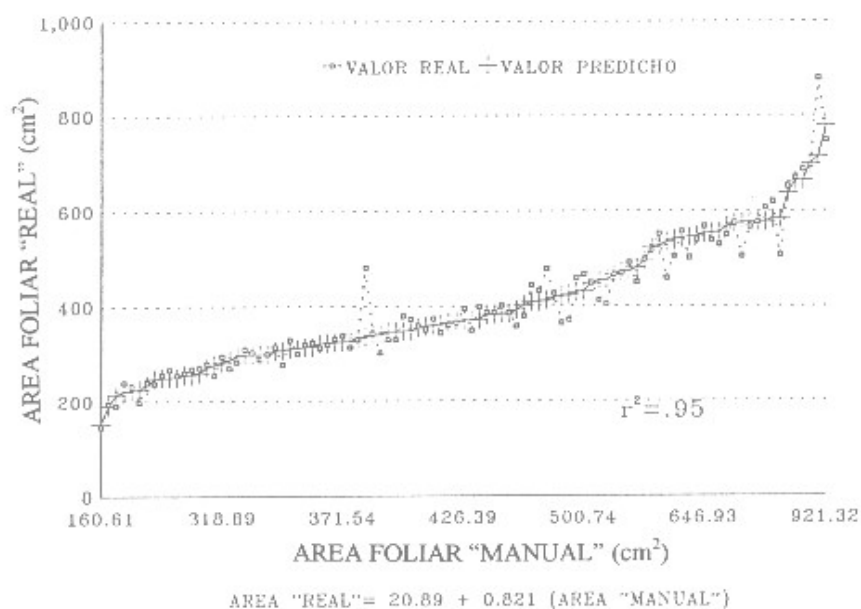


Fig. 2. Valores reales y predichos en base a la ecuación de regresión para área foliar "real" en nopal.

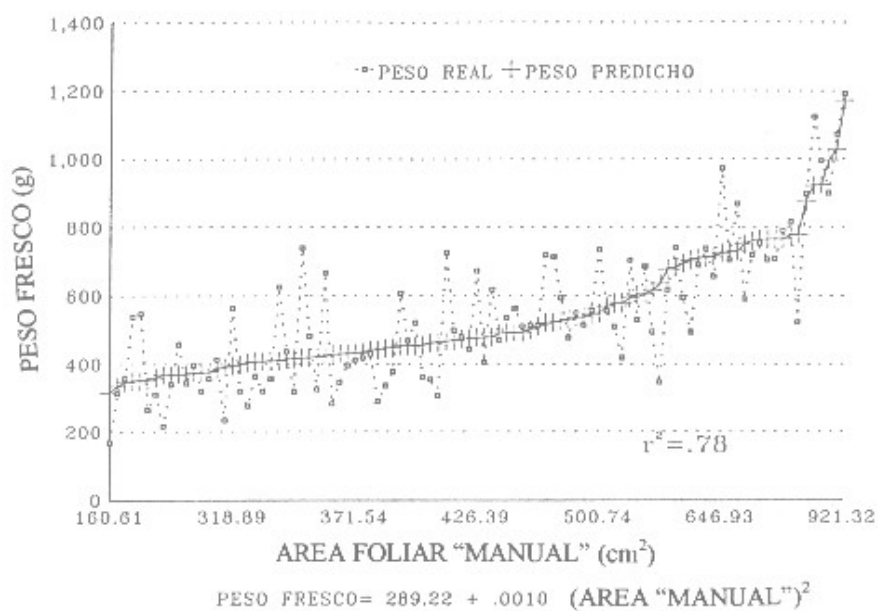


Fig.3. Valores reales y predichos en base a la ecuación de regresión para peso fresco en nopal.

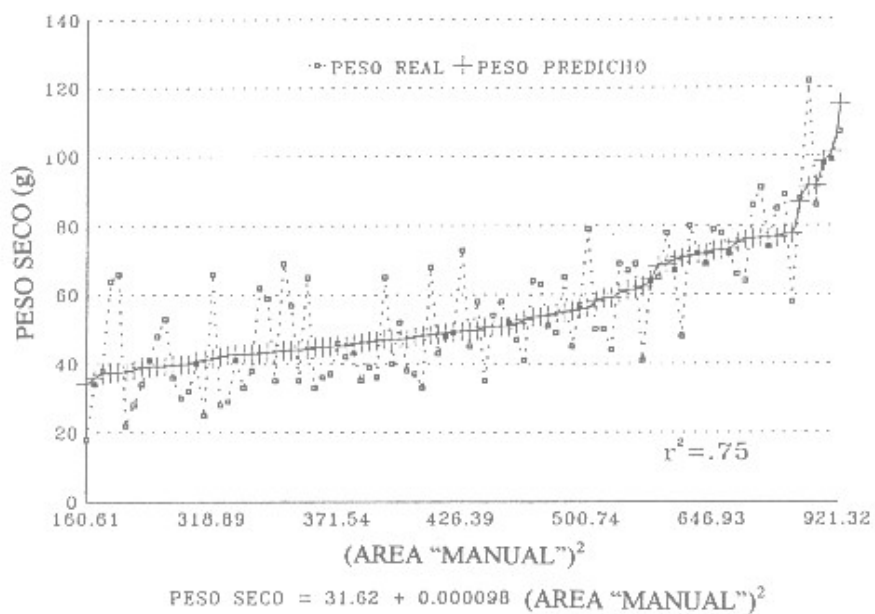


Fig. 4. Valores reales y calculados de acuerdo a la ecuación de regresión de peso seco en nopal.

foliar "manual" le corresponde un aumento proporcional del área foliar real y lo mismo sucede cuando ocurre la disminución de éstas, de lo que se deduce la alta relación lineal presente entre la variable dependiente e independiente. Situación similar se presenta para las variables peso fresco y seco, donde el modelo de regresión lineal que mejor se ajusta es de tipo (2) cuadrático, en ambos casos el máximo valor de R^2 indica que el 78 y 75% del comportamiento de peso fresco y seco, respectivamente, es explicado por el área foliar calculada en forma manual.

CUADRO 3. Componentes principales del análisis de varianza para diferentes modelos de regresión lineal simple donde la variable independiente es área foliar "manual" en nopal.

Variable	Modelo Tipo ^z	C.M.E.E.	R^2	C.V.
Area real	(1) <u>Lineal</u>	1111.49**	0.9541	8.02
" "	(2) Cuadrático	1947.46**	0.9196	10.61
" "	(3) Cúbico	4241.132**	0.8250	15.67
" "	(4) Logarítmico	2494.51**	0.8971	12.01
" "	(5) Exponencial	1500.31**	0.9381	9.32
Peso fresco	(1) Lineal	16520.9**	0.7441	22.77
" "	(2) <u>Cuadrático</u>	14204.0**	0.7800	21.12
" "	(3) Cúbico	15783.6**	0.7555	22.26
" "	(4) Logarítmico	23076.6**	0.6426	26.92
" "	(5) Exponencial	19309.8**	0.7009	24.62
Peso seco	(1) Lineal	164.32**	0.7236	22.26
" "	(2) <u>Cuadrático</u>	145.97**	0.7544	20.89
" "	(3) Cúbico	164.18**	0.7238	22.25
" "	(4) Logarítmico	223.45**	0.6241	25.96
" "	(5) Exponencial	189.18**	0.6817	23.88

^z Los modelos subrayados son los modelos seleccionados.

Este mismo criterio se utilizó para la selección del mejor modelo de la variable en estudio a nivel de especie, por lo que en el Cuadro 4, sólo se presentan los modelos seleccionados y sus respectivos componentes del ANAVA. En éste se aprecia que la R^2 , como medida de la asociación lineal entre la variable independiente y dependiente, se presenta con el máximo valor entre el área foliar "manual" y área foliar "real", relación que se ajusta más al modelo de tipo (1) lineal con ex-

cepción de la especie *O. megacantha*. En las otras dos variables dependientes el modelo de regresión lineal más frecuente es el de tipo (2) cuadrático, aunque en *O. megacantha* los modelos no resultan recomendables, dado el bajo valor de R^2 .

El coeficiente de variación, como se puede apreciar en los Cuadros 3 y 4 resultó de mayor proporción cuando se considera peso fresco y seco como variables dependientes, lo que resulta lógico dada su menor correlación con el área foliar "manual". No obstante los altos valores de R^2 registrados en todas las variables muestra que los modelos de regresión entre éstas son bastante aceptable.

MODELOS DE REGRESION DE LAS VARIABLES DE ESTUDIO

La ecuación de regresión es aquella que relaciona las dos variables en estudio con base en el modelo matemático que debe dar el mejor ajuste para el comportamiento de esas variables. Las ecuaciones obtenidas de acuerdo a los modelos de regresión lineal seleccionados se presentan en el Cuadro 5, donde se omite la especie *O. megacantha*, debido a su baja confiabilidad (bajo valor de R^2).

Las representaciones resultantes de la aplicación de la fórmula de regresión para nopal (*Opuntia* spp.), se presentan para la variable dependiente área foliar real en la Figura 2, donde se aprecia la estrecha relación lineal entre los valores reales y predichos, resultante del alto valor de R^2 . En comparación con la Figura 3, donde se registra la variable dependiente peso fresco con menor relación lineal con el área foliar "manual", indicada por el bajo valor de R^2 . La misma situación se presenta para la variable peso seco presentada en la Figura 4.

De la relación observada en las variables peso fresco y peso seco con respecto al área foliar "manual" se deduce que hay mayor independencia entre éstas y que en un momento dado pudieran presentarse otros factores no controlados como disponibilidad de humedad y nutrientes, entre otros, que probablemente afecten en forma diferente al peso del cladodio y al área "foliar" de éste.

CONCLUSIONES

1. Existe una alta correlación entre las variables analizadas, lo que permite el uso, por conveniencia, de la variable área foliar "manual" como variable independiente.

CUADRO 4. Modelos de regresión seleccionados y componentes de varianza principales para cada una de las variables dependientes en nopal *Opuntia* spp. y a nivel de especie.

	Variable	Modelo	Grados de libertad	CME	R ²	CV
<i>Opuntia</i>	Area real	Lineal	98	1111.49	0.9541	8.02
"	Peso fresco	Cuadrático	98	14204.0	0.780	21.12
"	Peso seco	Cuadrático	98	145.97	0.7544	20.98
<i>O. megacantha</i>	Area real	Exponencial	28	251.10	0.9736	4.62
"	Peso fresco	Logarítmico	28	11918.8	0.3247	22.73
"	Peso seco	Cuadrático	28	134.47	0.3959	22.04
<i>O. ficus-indica</i>	Area real	Lineal	38	2054.55	0.9280	10.15
"	Peso fresco	Cuadrático	38	10552.0	0.8817	17.89
"	Peso seco	Cuadrático	38	119.24	0.8501	18.87
<i>O. amyclae</i>	Area real	Lineal	28	334.60	0.9882	4.09
"	Peso fresco	Lineal	28	12615.3	0.8300	17.68
"	Peso seco	Lineal	28	123.72	0.8302	17.88

CUADRO 5. Ecuación de regresión recomendada en la predicción de las variables en estudio de nopal (*Opuntia* spp.) y sus especies.

	Variable	Ecuación
<i>Opuntia</i> spp.	Area real	= 20.89 + 0.821 (Area manual)
"	Peso fresco	= 289.22 + 0.0010 (Area manual) ²
"	Peso seco	= 31.62 + 0.000098 (Area manual) ²
<i>O. ficus-indica</i>	Area real	= -5.21 + 0.849 (Area manual)
"	Peso fresco	= 182.26 + 0.0012 (Area manual) ²
"	Peso seco	= 21.50 + 0.000115 (Area manual) ²
<i>O. amyclae</i>	Area real	= 37.04 + 0.817 (Area manual)
"	Peso fresco	= 28.11 + 1.21 (Area manual) ²
"	Peso seco	= 2.04 + 0.120 (Area manual) ²

- Los valores de R² de 92 a 97% para área foliar "manual" y área real, así como de 75 a 88% para área foliar "manual" y peso fresco y seco, indican una fuerte relación lineal entre esas variables.
- Los modelos matemáticos de regresión lineal seleccionados con base en el máximo valor de R², mínimo valor del CME y mínimo valor en el CV, son de tipo (1) lineal y (2) cuadrático.
- Se recomienda emplear el modelo de regresión obtenido a nivel de género (*Opuntia* spp.) para las variedades de nopal, a menos que exista una plena identificación de las especies aquí estudiadas.

LITERATURA CITADA

- ADLAR, M.A. 1983. Clases de modelos de crecimiento de masas forestales y tipos de variables necesarias para su calibración. En SARH-INIF. 1a. Reunión sobre modelos de crecimiento de árboles y masas forestales. Publicación Especial Núm. 44, México, pp 47-57.
- AMATEIS, L.R. 1994. An approach to developing process oriented growth and yield models. *Forest Ecology and Management* 69:7-20.
- BARR, J.A.; J. H. GOODNIGHT. 1972. A user's guide to the statistical analysis system (SAS). North Carolina State University, North Carolina, USA.
- BRAVO H., H. 1978. Las Cactáceas de México. Instituto de Biología, Universidad Autónoma de México.
- BRITTON, N.F.; L.N. ROSE. 1963. The Cactaceae. Descriptions and Illustrations of Plants of the Cactus Family. Dover Pubsh. Inc. New York, Vol. I:177-190.
- FLORES, G.J.; F. SOLÓRZANO I.; M. RUIZ A. 1991. El vigor una opción de ajuste en la estimación del peso de hoja seca de orégano. III Simposio Nal. sobre Ecología, Manejo y Domesticación de Plantas Útiles del Desierto. INIFAP-SARH. Saltillo, Coah.
- GARCIA, E. 1973. Modificación al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- MARTIN, M.S.; A. MENDOZA B. 1983. Conceptos generales sobre modelaje matemático. En SARH-INIF. 1a. Reunión sobre modelos de crecimiento de árboles y masas forestales. Publicación especial Núm. 44, México pp 35-45.

- RZEDOWSKI, J. 1964. Las zonas áridas del centro y noreste de México y el aprovechamiento de sus recursos. Inst. Méx. de Rec. Nat. Ren. A.C. México, D. F. pp 135-152.
- SAENZ, R.J.; D. CASTILLO Q. 1991. Tarifas de predicción de rendimiento de orégano. III Simposio Nal. sobre Ecología, Manejo y Domesticación de las Plantas Útiles del Desierto. INIFAP-SARH. Saltillo, Coah.
- VOLKE, H.V. 1981. Estimación de producción mediante regresión en experimentos. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.