

Cobertura vegetal estimada por fotografías digitales relacionada con la biomasa en un sitio de pastizal del norte de México

Vegetal cover estimated by digital photographs related to biomass in a grassland site in northern Mexico

Gutiérrez-Guzmán UN¹, E Castellanos-Pérez¹, JJ Quiñones-Vera¹, JS Serrato-Corona¹, JJ Martínez-Ríos¹, I Orona-Castillo¹, I Chairez-Hernández²

Resumen. Se utilizó un modelo de regresión para determinar la relación entre la producción de biomasa aérea herbácea y la cobertura vegetal, estimada mediante el uso de imágenes digitales. En el año 2011, durante la estación de crecimiento, se realizaron cuatro muestreos (n =36 por medición) de la cobertura vegetal y biomasa herbácea, en un pastizal dominado por *Bouteloua gracilis* en La Cieneguilla, Municipio de Villa Hidalgo, Durango. La producción promedio de biomasa seca fue de $37,36 \pm 9,66 \text{ g/m}^2$, y la cobertura aérea promedio de 30,02%. Los datos de peso seco de la biomasa se sometieron a la prueba de normalidad de Kolmogorov Smirnov encontrando una falta de ajuste. Los datos se sometieron a una transformación logarítmica encontrando el modelo $\text{Ln}(y) = 1,637926 + 0,08501X - 0,000586X^2$ con R^2 ajustado = 0,89. Para la validación de este modelo se hizo otro muestreo en el mismo sitio en cinco fechas durante el verano y otoño de 2013 utilizando el mismo tamaño de muestra por fecha que en 2011. Los datos obtenidos se analizaron con el modelo $\text{Ln}(y) = \beta_0 + \beta_1X + \beta_2X^2$. Se hizo la comparación de los coeficientes de los modelos de 2011 con los de 2013 con $t(180+144-9-11-2=302, p<0,05) = 1,967$. Los resultados indicaron que es posible usar este modelo de regresión de 2011 para estimar la biomasa aérea con datos de cobertura vegetal generados mediante fotografías aéreas en la Cieneguilla para los meses de verano y otoño.

Palabras clave: Regresión; Pastizal; Fotografía digital; Cobertura aérea; Biomasa.

Abstract. A regression model was used to determine the relationship between aerial herbaceous biomass and vegetation coverage estimated by digital images. Four samplings (n=36 each date) of vegetation cover and herbaceous biomass were performed during the growing season in 2011 in a grassland dominated by *Bouteloua gracilis* in La Cieneguilla, Municipality of Villa Hidalgo, Durango. Average production of dry biomass was $37.36 \pm 9.66 \text{ g/m}^2$, and mean vegetation cover 30.02%. Dry biomass data were tested for normality using the test of Kolmogorov Smirnov, finding a lack of fit. The data were subjected to a logarithmic transformation and the model $\text{Ln}(y) = 1.637926 + 0.08501X - 0.000586X^2$ with an adjusted $R^2 = 0.89$ was found. In order to validate this model, another five samplings were carried out in 2013 at the same site during summer and autumn, using the same sampling size for each date as in 2011. Data collected in 2013 were analyzed with the model $\text{Ln}(y) = \beta_0 + \beta_1X + \beta_2X^2$. A comparison of regression coefficients was carried out between the 2011 and 2013 models with $t(180+144-9-11-2=302, p<0.05) = 1.967$. The results indicated that it is possible to use the 2011 regression model to estimate herbaceous aerial biomass from vegetation cover measurements with aerial photographs in La Cieneguilla site during summer and fall.

Keywords: Regression; Grassland; Digital photography; Aerial coverage; Biomass.

¹ Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Agricultura y Zootecnia. Ejido Venecia, Municipio de Gómez Palacio, Durango, México. Apdo. Postal 1-142. C.P. 35111.

² CIIDIR IPN Unidad Durango, México.

Address Correspondence to: Edmundo Castellanos Pérez, e-mail: ecastellmx@yahoo.com.mx
Recibido / Received 19.XI.2013. Aceptado / Accepted 12.XII.2014.

INTRODUCCIÓN

Maximizar la producción y por otro lado prevenir la degradación de los pastizales es una tarea difícil para quienes toman decisiones; además de otras razones como el hecho de que las tierras de pastizal son áreas extensas, la información espacial es difícil de obtener de manera oportuna, las variables de los patrones climáticos anuales hacen difícil la predicción de producción, y las técnicas tradicionales de medición sobre el terreno requieren de mano de obra intensiva que consume tiempo y recursos (Pickup et al., 1994; Reeves et al., 2001; Tueller, 2001).

En México el matorral xerófilo y pastizal natural ocupan una extensión aproximada de 70 millones de hectáreas, equivalente al 50,3% del total de su superficie; los ecosistemas terrestres son los que tienen mayor presencia (Merino et al., 2008). En el período de 2002 a 2007 se estimó que 220 mil hectáreas fueron degradadas (SEMARNAT, 2009). Esto se ha manifestado en pérdidas de cobertura y diversidad vegetal; pérdida de agua y de suelo, y en general, baja productividad.

Una de las características más observadas de una comunidad ecológica es su estructura física (Smith, 1990). La cobertura vegetal es una parte importante de esta estructura (Bonham, 1989) y es un indicador de la salud de los pastizales (Society for Range Management, 1995; Pyke et al., 2002; Pellant et al., 2005). La cobertura de vegetación se define como la proporción de suelo cubierto, cuando se mira directamente desde arriba, desde el contorno de las partes aéreas de una planta (Brower et al., 1990). Este material vegetal puede estar vivo o muerto. Por esta razón, los vehículos aéreos y plataformas cercanas a la Tierra pueden ser una herramienta eficaz para la toma de fotografías en posición directamente por encima de un punto de observación (Breckenridge et al., 2012).

La evaluación de la vegetación de las tierras de pastoreo es esencial para (1) diagnosticar y planificar su aprovechamiento, y (2) evaluar el impacto del ganado y otras actividades antropogénicas sobre las especies vegetales. Un método comúnmente aceptado para la estimación de la biomasa es cosechar y pesar las plantas directamente en una unidad de área determinada (Sorensen et al., 2012). Un método alternativo para estimar la producción de biomasa es el uso de características morfológicas altamente correlacionados a ésta, tales como área basal, altura de planta, y volumen del follaje (Guevara et al., 2002; Flombaum y Sala, 2007; Nafus et al., 2009). Generalmente se ha considerado a la cobertura vegetal en las zonas de pastizal como una variable que puede representar tanto la disponibilidad de alimento para el ganado como la degradación del recurso (Campo et al., 2002). Las formas tradicionales de campo para medir este atributo de la vegetación son la línea de intercepción, los puntos de contacto, y la parcela de muestreo, entre otros (Bonham, 1989; Brower et al., 1990). Sin embargo, estas técnicas son laboriosas y costosas, por lo que es necesario implementar el uso de metodologías más rápidas y confiables

para estimar este atributo biofísico de la vegetación, como el uso de los sensores remotos (Casiano et al., 2011; Pickup et al., 1994; Reeves et al., 2001; Tueller, 2001). La exactitud de los métodos para la estimación de cobertura automatizados emergentes, como el uso de medidas de reflectancia o estimaciones grabadas fotográficamente (Byrne et al., 2011) ha sido evaluada por algunos investigadores en comparación con los métodos convencionales (Booth y Tueller, 2003; Booth et al., 2006). Booth et al. (2006) reportaron una correlación superior a 92% al estimar cobertura vegetal mediante reflectancia o el uso de fotografías aéreas. El objetivo de esta investigación fue encontrar la relación entre la producción de biomasa aérea herbácea y la cobertura vegetal estimada en imágenes digitales mediante modelos de regresión.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción y ubicación del área de estudio. El trabajo de investigación se llevó a cabo en los años 2011 y 2013. El área de estudio se estableció en el predio La Cieneguilla del Municipio de Hidalgo ubicado en la parte Centro-Norte del Estado de Durango (25° 39' N, 104° 39' O) (Fig. 1). El clima predominante en el área es estepario, semiárido templado (BS₁ kw) y árido semi-cálido (BWhw), la temperatura promedio anual es de 20 °C (Espinoza et al., 2000). El suelo es migajón arenoso y migajón arcilloso-arenoso con pendientes del 1 al 8%. Hidrológicamente el sitio de estudio está englobado en la Región Hidrológica No. 35 Mapimí y Región Hidrológica RH 36 Nazas-Aguanaval.

En la Figura 2 se presentan datos de precipitación de la estación meteorológica Agua Nueva; estación más cercana al área de estudio, aproximadamente a 16 kilómetros de distancia del sitio La Cieneguilla, la precipitación media anual his-



Fig. 1. Ubicación del área La Cieneguilla en el norte del estado de Durango.

Fig. 1. Location of area La Cieneguilla in northern Durango State.

tórica es de 457 mm, y alrededor del 80% de la precipitación pluvial ocurre entre los meses de junio a septiembre de forma irregular, ocasionalmente se presentan lluvias en la estación de invierno (SAGARPA-INIFAP). También en la misma figura se presentan los valores de precipitación acumulada para los años de 2011 y 2013, siendo éstos de 139 y 382 mm, respectivamente.

El tipo de vegetación presente se clasifica como pastizal mediano abierto con dominancia de *Bouteloua gracilis* (Willd. ex Kunth) Lag. ex Griffiths con diferentes asociaciones de encino-enebro (*Quercus* spp.- *Juniperus* spp.) hacia la parte del bosque, y mezquital (*Prosopis* spp.) hacia la parte del matorral (SEMARNAT, 2009). El predio es usado para la producción de becerros al destete bajo condiciones de pastoreo extensivo del pastizal mediante el sistema vaca-becerro, principalmente destinado para la venta a engordadores en los Estados Unidos de Norteamérica.

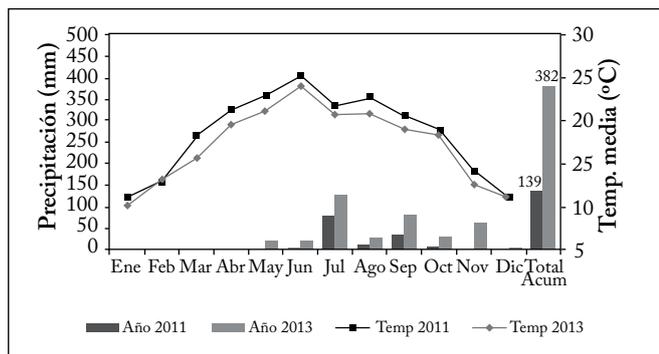


Fig. 2. Precipitación pluvial y temperatura media mensual en la estación meteorológica Agua Nueva en el municipio de Hidalgo, Durango, de la Red Nacional de Clima de la SAGARPA-INIFAP.
Fig. 2. Rainfall and mean monthly temperature at the weather station Agua Nueva in the municipality of Hidalgo, Durango, National Climate Network SAGARPA-INIFAP.

Metodología. Se estableció un sitio permanente de muestreo (SPM) mediante la técnica de muestreo sistemático (Fig. 3), en el cual se ubicaron dos transectas de 1500 m cada una, en forma perpendicular una de la otra. Las mismas formaron un eje de coordenadas sobre las cuales se distribuyeron nueve estaciones de muestreo (EM) de 10000 m² cada una, espaciadas cada 200 m y en una secuencia de Norte a Sur y de Este a Oeste. Cada EM se dividió en cuatro cuadrantes de 50 por 50 m cada uno; en cada cuadrante se ubicó al azar un punto de muestreo de biomasa aérea (PMB) delimitado por un aro de poliuretano de 1,6 m de diámetro (área de unidad de muestreo = 2,01 m²), dando un total de 36 puntos en el SPM.

Medición de variables en las Estaciones de Muestreo (EM). Una vez ubicado el aro de poliuretano se procedió a elevar el equipo de medición (cámara fotográfica digital Sony CyberShot S730 de 12 mega píxeles) mediante un bastón telescópico ajustable a 3,20 m de altura. Se tomó una fotografía digital a nadir con ayuda de una plomada para ubicar el centro

del aro. Posteriormente se procedió a cosechar la biomasa aérea herbácea a un cm por encima del suelo, se secó en estufa a 60 °C hasta peso constante.

En 2011, en la época de lluvia en el verano las mediciones se hicieron el 04 de julio, 02 de agosto y 20 de septiembre; se efectuó además otra medición en otoño el 10 de noviembre

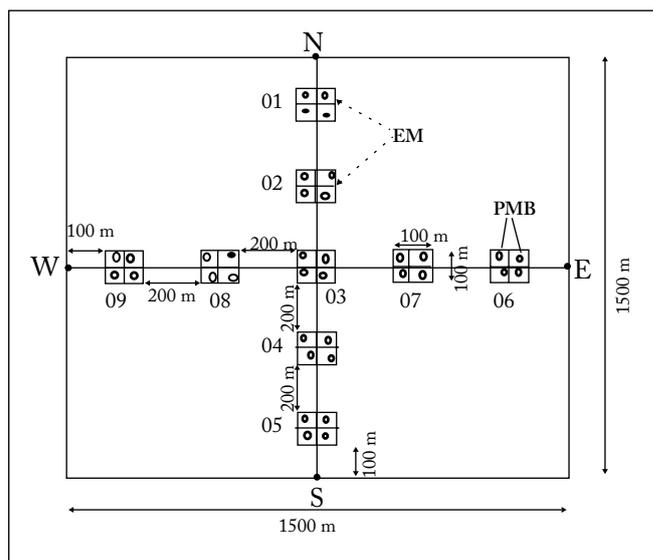


Fig. 3. Representación esquemática del Sitio Permanente de Muestreo (SPM) con sus nueve Estaciones de Muestreo (EM) y 36 Puntos de Muestreo de Biomasa (PMB).

Fig. 3. Schematic representation of the permanent sampling site (SPM) showing nine sampling stations (EM) and 36 biomass sampling points (PMB).

(n=36 por fecha de muestreo). En 2013 se registró información en el mismo sitio el 08 de junio, 27 de julio, 01 de septiembre, 22 de octubre y 08 de diciembre con el mismo número de muestras por fecha. Estos datos se usaron para validar el modelo de 2011.

Metodología para la estimación de la cobertura vegetal en las imágenes. Se inició con la creación de una máscara para delimitar el área útil para la edición en la fotografía digital mediante el programa Corel Photo-Paint. Posteriormente en el programa ENVI 4.4, se utilizó el método de clasificación supervisada de máxima probabilidad para determinar los atributos dentro de la imagen. Seguidamente se determinó el número de píxeles correspondientes a cada clase de la imagen. Esto se hizo utilizando la opción Classification-Post Classification Class Statistics. El resultado se obtuvo automáticamente en forma de gráfica, acompañado de la cuantificación de píxeles de cobertura por clase; estas clases incluyeron los porcentajes de cobertura vegetal, suelo desnudo, pedregosidad, mantillo orgánico y aro de poliuretano.

Análisis estadístico. Para el análisis de la información obtenida se usó el programa STATISTICA Versión 7 de

Statsoft Inc. (2004). Se obtuvo un modelo de regresión con la información de 2011 donde el peso seco de la biomasa aérea herbácea fue la variable dependiente y la cobertura aérea la variable independiente. El modelo de regresión fue validado con la información de 2013. Se realizaron inferencias a partir del análisis de regresión siguiendo a Neter et al. (1996), y se efectuaron pruebas de normalidad Kolmogorov Smirnov (Smirnov, 1948) para la variable peso de la biomasa aérea herbácea de 2011 y de 2013. Desde que estos datos no se ajustaron a esta distribución se aplicó el Ln a los mismos en ambos años y se encontró el modelo $\text{Ln}(y) = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2$.

RESULTADOS

Producción de biomasa y cobertura vegetal. Las cantidades promedio de materia seca y de porcentaje de cobertura vegetal para los años 2011 y 2013 (Fig. 4, Fig. 5) mostraron que a mayor cobertura vegetal se obtuvo una mayor cantidad de biomasa aérea. En 2011 se presentó una sequía en el norte de México; en este sitio, la precipitación fue de solo 139 mm cuando la media histórica es de 475 mm. Sin embargo, las cantidades de biomasa aérea fueron superiores a las de 2013 en los primeros meses de muestreo, indicando el buen manejo del pastoreo que se realiza en el sitio. La baja producción encontrada en otoño de 2011 fue en gran parte debido a la falta de lluvias (ver Fig. 2).

Generación de modelos de regresión. Luego de verificar los residuales estudentizados con los valores predichos para cada modelo, se eliminaron los valores anormales (nueve datos de 2011 y once de 2013). El modelo se puso a prueba sin dichos valores tanto para 2011 como para 2013, y se observaron los supuestos de Gauss Markov, cumpliéndolos ambos modelos (Tablas 1 y 2; Fig. 6 y 7). Se hizo la comparación de los coeficientes de los modelos de 2011 y 2013, y los mismos no difirieron significativamente de acuerdo a la "t" de Student (Tabla 3) demostrando que el modelo de 2011 fue validado con la información de 2013.

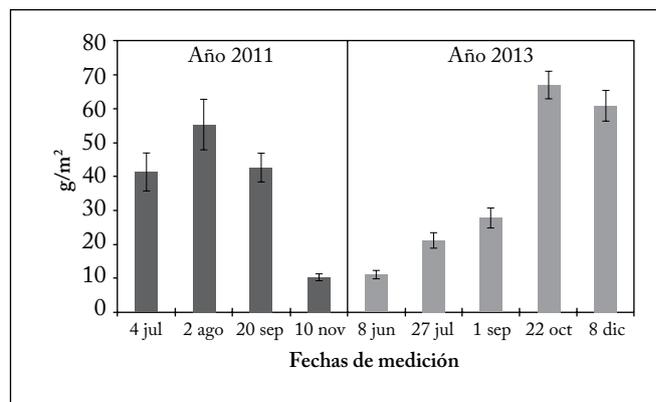


Fig. 4. Producción de biomasa aérea promedio en 2011 (n=144) y 2013 (n=180), en el sitio La Cieneguilla municipio de Hidalgo, Durango.

Fig. 4. Mean aerial biomass production in 2011 (n=144) and 2013 (n=180) at the site La Cieneguilla municipality of Hidalgo, Durango.

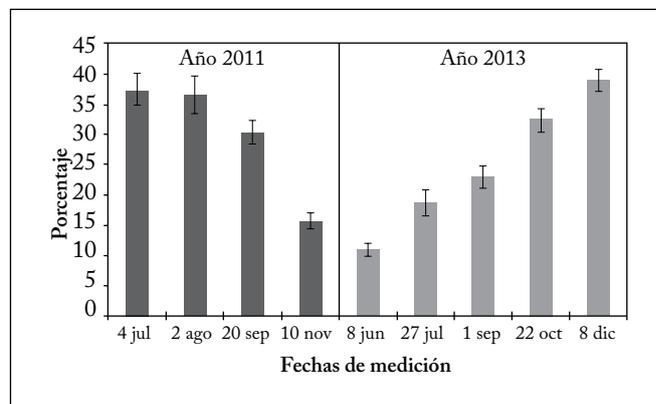


Fig. 5. Cobertura vegetal promedio estimada por imágenes digitales en 2011 (n=44) y 2013 (n=180) en el sitio La Cieneguilla municipio de Hidalgo, Durango.

Fig. 5. Mean plant cover estimated by digital images in 2011 (n=144) and 2013 (n=180) at the site La Cieneguilla municipality of Hidalgo, Durango.

Tabla 1. Parámetros del modelo de regresión de 2011 utilizando el peso de la biomasa aérea (Y) versus el porcentaje de cobertura aérea (X) en La Cieneguilla, Durango, México.

Table 1. Parameters of the regression model in 2011 using the aerial biomass weight (Y) versus the aerial plant cover percentage (X) in La Cieneguilla, Durango, Mexico.

	Ln (Y ₂₀₁₁) Parámetro	Ln (Y ₂₀₁₁) Std. E.	Ln (Y ₂₀₁₁) t	Ln (Y ₂₀₁₁) p	Gauss Markov (residuales)	
β_0	1,637926	0,073257	22,35853	0,000000	D. Normal	Si
$\beta_1 X$	0,085010	0,005604	15,16912	0,000000	Independencia	Si
$\beta_2 X^2$	-0,000586	0,000094	-6,20733	0,000000	Homocedasticidad	Si

R² ajustado 0,89

DISCUSIÓN

Muchas de las características morfológicas y productividad de las plantas herbáceas cambian en respuesta a cambios en la distribución estacional y la cantidad de precipitación en zonas áridas y semiáridas. Esto resulta en cambios en la

cobertura aérea, área basal y la altura de la planta, los cuales son complejos y específicos de las especies herbáceas. Por lo tanto, es razonable esperar que la relación entre las variables morfométricas evaluadas varíe entre años (Gibbens y Beck, 1988; Shackelford, 2004). En este estudio, el año 2011 fue anormalmente seco, por lo que la cobertura vegetal fue más

Tabla 2. Parámetros del modelo de regresión de 2013 utilizando el peso de la biomasa aérea (Y) versus el porcentaje de cobertura aérea (X) en La Cieneguilla, Durango, México.

Table 2. Parameters of the regression model in 2013 using the aerial biomass weight (Y) versus the aerial plant cover percentage (X) in La Cieneguilla, Durango, Mexico.

	Ln (Y ₂₀₁₃) Parámetro	Ln (Y ₂₀₁₃) Std. E.	Ln (Y ₂₀₁₃) t	Ln (Y ₂₀₁₃) p	Gauss Markov (residuales)	
β_0	1,403350	0,141620	9,90924	0,000000	D. Normal	Si
$\beta_1 X$	0,071363	0,009281	7,68942	0,000000	Independencia	Si
$\beta_2 X^2$	-0,000252	0,000136	-1,85477	0,065986	Homocedasticidad	Si

R² ajustado 0,81

Tabla 3. Comparación de los coeficientes de los modelos 2011 y 2013 con t (180+144-9-11-2=302, p<0,05) = 1,967.

Table 3. Comparison of the coefficients of the 2011 and 2013 models with t (180 + 144-9-11-2 = 302, p <0.05) = 1.967.

	β_0	$\beta_1 X$	$\beta_2 X^2$
2011	1,637926	0,085010	-0,000586
2013	1,403350	0,071363	-0,000252
t student	1,109 n.s.	1,103 n.s.	1,719 n.s.

n.s.: no significativo a p<0,05.

n.s.: not significant at p<0.05.

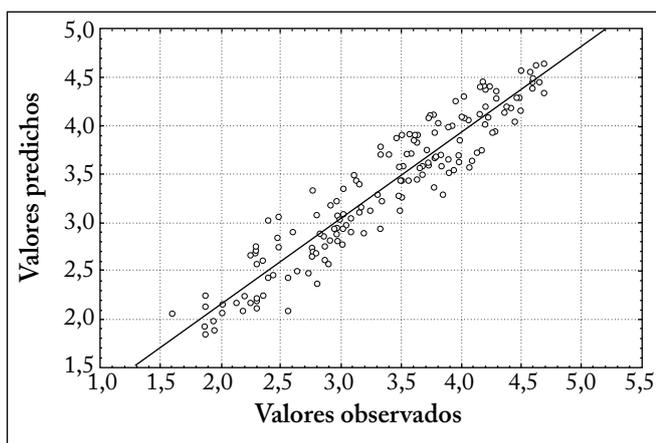


Fig. 6. Relación entre los valores predichos del modelo de regresión $\text{Ln}(Y) = 1,637926 + 0,08501X - 0,000586X^2$ y los valores observados en el año 2011 en La Cieneguilla, Durango, México.

Fig. 6. Relationship between the predicted values of the regression model $\text{Ln}(Y) = 1.637926 + 0.08501X - 0.000586X^2$ and the observed values in 2011 in La Cieneguilla, Durango, Mexico.

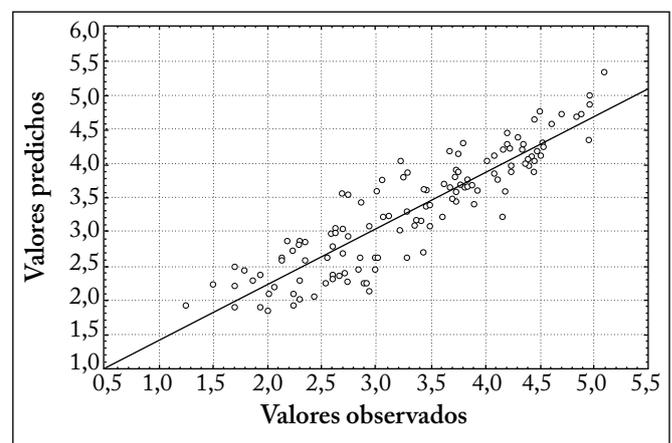


Fig. 7. Relación entre los valores predichos del modelo de regresión $\text{Ln}(Y) = 1,40335 + 0,071363X - 0,000252X^2$ y los valores observados en el año 2013 en La Cieneguilla, Durango, México.

Fig. 7. Relationship between the predicted values of the regression model $\text{Ln}(Y) = 1.40335 + 0.071363X - 0.000252X^2$ and the observed values in 2013 in La Cieneguilla, Durango, Mexico.

difícil de medir que en 2013. Esto se debió a que fue más complicado diferenciar el mantillo orgánico de la cobertura herbácea aérea.

Diferentes estudios realizados con el propósito de estimar la biomasa aérea herbácea han sido realizados con variables de fácil medición como la altura o el diámetro de la cobertura aérea o basal. Esto se efectuó con modelos de regresión (Nafus et al., 2009; MacDonald et al., 2012) donde se encontraron modelos de regresión lineal simple (Williamson et al., 1987; Assaeed, 1997; Flombaum y Sala, 2007; Axmanová et al., 2012; MacDonald et al., 2012), con transformación logarítmica (Andariese y Covington, 1986; Assaeed, 1997; Gutiérrez y Aguilera 1989; Guevara et al., 2002; Nafus et al., 2009; Oliveras et al., 2013), y de regresión múltiple (Sorensen et al., 2012). También se efectuaron estudios relacionando la cobertura aérea estimada con fotografías digitales y la producción de biomasa aérea herbácea, encontrando modelos con transformación logarítmica (Bennet et al., 2000; Paruelo et al., 2000).

La validación de cualquier modelo de regresión informado es un aspecto importante. Dicha validación se puede hacer de distintas maneras. Una manera es medir nuevamente la variable o variables independientes (en este caso la cobertura aérea medida con fotografía digital) y cortar nuevamente la biomasa, para luego comparar los coeficientes de regresión del modelo encontrado con el modelo anterior. Otra manera es la comparación de resultados con expectativas teóricas, usando la simulación de resultados, y otra forma es la retención de datos para usarlos con el modelo encontrado (Neter et al., 1996).

La retención de datos es la metodología más común para validación de modelos. Guevara et al. (2002), Andariese y Covington (1986) y Oliveras et al. (2013) retuvieron un 20% de sus muestras para validar sus modelos, y Flombaum y Sala (2007) lo hicieron con un set de datos de 50. Xiao et al. (2011) realizaron modelos de simulación para el análisis de datos debido a la controversia entre investigadores sobre el uso de modelos con transformación logarítmica. Finalmente, se concluyó que no hay problemas si la información tiene distribución log-normal. Búrquez y Martínez-Yrizar (2011) recomendaron validar los modelos a través de la comparación de la cosecha directa de la biomasa aérea. Guevara et al. (2002) recomendaron observar si los nuevos datos de los años siguientes se ajustan a los modelos encontrados.

Sorensen et al. (2012) hallaron diferentes modelos en diferentes años, concluyendo que el efecto de la lluvia fue variable entre los mismos, y que la longitud de la planta fue más dinámica como respuesta a las condiciones de crecimiento. En este estudio los modelos encontrados para 2011 y 2013 fueron estadísticamente iguales. La diferencia en la cantidad de lluvia entre un año y otro fue de 243 mm (para esta región el promedio es de 475 mm). En consecuencia, es de suponer que las diferencias en crecimiento de las plantas fueron diferentes; sin embargo, este modelo no fue afectado por la estructura

de crecimiento de las plantas en respuesta a la cantidad de precipitación, como sí lo fue para los modelos de Sorensen et al. (2012). Por lo tanto es posible usar este modelo tomando fotografías aéreas con la metodología descrita para predecir la biomasa del sitio la Cieneguilla para los meses de julio a diciembre, sin importar la cantidad de lluvia.

CONCLUSIONES

Los modelos de regresión log-normal mostraron que es factible estimar el peso seco de la biomasa forrajera del pastizal con la cobertura vegetal como variable independiente, estimada a partir de fotografías en unidades de muestreo de 2,01 m².

La producción de biomasa aérea herbácea, estimada a partir de la cobertura vegetal mediante el empleo de fotografías aéreas, no fue afectada por otras características de la vegetación en respuesta a la lluvia. Esto se debió a que en 2011 se registró una sequía extrema, y se validó el modelo encontrado con información proveniente de un año con valores de precipitación más cercanos a la media histórica.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y al Colegio de Posgraduados (COLPOS) en la persona del Dr. Fernando Paz P. por el financiamiento de este trabajo de investigación mediante el programa federal Sistema Nacional de Monitoreo Terrestre Orientado a la Ganadería (SIMTOG).

REFERENCIAS

- Andariese, S.W. y W.W. Covington (1986). Biomass estimation for four common grass species in Northern Arizona ponderosa pine. *Journal of Range Management* 39: 472-473.
- Assaeed, A.M. (1997). Estimation of biomass and utilization of three perennial range grasses in Saudi Arabia Department. *Journal of Arid Environments* 36: 103-111.
- Axmanová, I.L. Tichy, Z. Fajmonova, P. Hajkova, E. Hettenbergerova, Ch. Li, K. Merunkova, M. Nejezchlebova, Z. Otypkova, M. Vymazalova y D. Zeleny (2012). Estimation of herbaceous biomass from species composition and cover. *Applied Vegetation Science* 15: 580-589.
- Bennett, L.T., T.S. Judd y M.A. Adams (2000). Close-range vertical photography for measuring cover changes in perennial grasslands. *Journal of Range Management* 53: 634-641.
- Bonham, C.D. (1989). Measurements for Terrestrial Vegetation. New York, NY. John Wiley and Sons. 352 p.
- Booth, D.T., S.E. Cox, T.W. Meikle y C. Fitzgerald (2006). The accuracy of ground-cover measurements. *Rangeland Ecology & Management* 59: 179-188.
- Booth, D.T. y P.T. Tueller (2003). Rangeland monitoring using remote sensing. *Arid Land Research and Management* 17: 455-467.

- Brower, J.E., J.H. Zar y C.N. Von Ende (1990). *Field and Laboratory Methods for General Ecology*. Third edition. Wm C Brown Publishers. 237 p.
- Breckenridge, P.R., M. Dakins, S. Bunting, J.L. Harbour y R.D. Lee (2012). Using unmanned helicopters to assess vegetation cover in sagebrush steppe ecosystems. *Rangeland Ecology & Management* 65: 362-370.
- Búrquez, A. y A. Martínez-Yrizar (2011). Accuracy and bias on the estimation of aboveground biomass in the woody vegetation of the Sonoran Desert. *Botany* 89: 625-633.
- Byrne, K.M., W.K. Lauenroth, P.B. Adler y C.M. Byrne (2011). Estimating aboveground net primary production in grasslands: a comparison of nondestructive methods. *Rangeland Ecology & Management* 64: 498-505.
- Campo, A., R. García González, A. Marinas y M. Gartzia (2002). Relaciones entre el índice espectral de vegetación NDVI y la cobertura vegetal en pastos de puerto del pirineo occidental. XIV Reunión Científica de la SEEP (Sesión: sistemas agrosilvopastorales). Instituto Pirenaico de Ecología CSIC, Jaca, España. pp. 304-310.
- Casiano, M., M. Bolaños, M. Pérez y F. Paz (2011). Sistema de Monitoreo Terrestre Orientado a la Ganadería SIMTOG: Avances 2011. En: F. Paz (ed.), *Memorias del III Simposio Internacional del Carbono en México*, Programa Mexicano del Carbono. Toluca, Estado de México. pp. 299-306.
- Espinoza, C., L. Aguilar A., E. Martínez, L. Gómez y E. Loa (2000). Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México, D.F.
- Flombaum, P. y O.E. Sala (2007). A non-destructive and rapid method to estimate biomass and aboveground net primary production in arid environments. *Journal of Arid Environments* 69: 352-358.
- Gibbens, R.P. y R.F. Beck (1988). Changes in grass basal area and forb densities over a 64-year period on grassland types of the Jornada Experimental Range. *Journal of Range Management* 41: 186-192.
- Guevara, J.C., J.M. Gonnet y O.R. Estevez (2002). Biomass estimation for native perennial grasses in the plain of Mendoza, Argentina. *Journal of Arid Environments* 50: 613-619.
- Gutiérrez, J.R. y L.E. Aguilera (1989). Relaciones entre tamaño y biomasa de algunas plantas herbáceas de la región árida de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 62: 95-98.
- MacDonald, R.L., J.M. Burke, H.Y.H. Chen y E.E. Prepas (2012). Relationship between aboveground biomass and percent cover of ground vegetation in Canadian boreal plain riparian forests. *Forest Science* 58: 47-53.
- Merino, L., J. Rodríguez, G. Ortiz y A. García (2008). Estudio estratégico sobre el sector forestal mexicano. Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A.C. México, D.F. 215 p.
- Nafus, A.M., M.P. McClaran, S.R. Archer y H.L. Throop (2009). Multispecies allometric models to predict grass biomass in semi-desert rangeland. *Rangeland Ecology & Management* 62: 68-72.
- Neter, J., M.H. Kutner, C.J. Nachtsheim y W. Wasserman (1996). *Applied linear regression models*. 3rd ed. Irwin Inc. Chicago IL. 720 p.
- Oliveras, I., M.V.D. Eynden, Y. Malhi, N. Cahuana, C. Menor, F. Zamora y T. Haugaasen (2013). Grass allometry and estimation of above-ground biomass in tropical alpine tussock grasslands. *Austral Ecology* 39: 408-415.
- Paruelo, J.M., W.K. Lauenroth y P.A. Roset (2000). Technical note: Estimating aboveground plant biomass using a photographic technique. *Journal of Range Management* 53: 190-193.
- Pellant, M., P. Shaver, D.A. Pyke y J.E. Herrick (2005). *Interpreting indicators of rangeland health*. Version 4. Denver, CO, USA: US Department of the Interior- Bureau of Land Management National Science and Technology Center. Technical Reference 1734-6, 122 p.
- Pickup, G., G.N. Bastin y V.H. Chewings (1994). Remote-sensing-based condition assessment for nonequilibrium rangelands under large-scale commercial grazing. *Ecological Applications* 4: 497-517.
- Pyke, D.A., J.E. Herrick, P. Shaver y M. Pellant (2002). Rangeland health attributes and indicators for qualitative assessment. *Journal of Range Management* 55: 584-597.
- Reeves, M.C., J.C. Winslow y S.W. Running (2001). Mapping weekly rangeland vegetation productivity using MODIS algorithms. *Journal of Range Management* 54: A90-A105.
- SAGARPA-INIFAP. Red Nacional de Clima. <http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/historicos.aspx?est=41513&cedo=9&tm=1&can=2013>
- SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2009). *El Medio Ambiente en México 2009: en Resumen*. México. 51 pp. Disponible en PDF en: http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/documents/sniarn/index_informes.html
- Shackelford, C.S. (2004). *Edaphic variation and long-term herbivory on the Edwards Plateau of Texas* [thesis]. College Station, TX, USA: Texas A&M University. 97 p.
- Smith, R.L. (1990). *Ecology and field biology*. 4th ed. New York, NY, USA: Harper Collins. 922 p.
- Society for Range Management, Task Group on Unity in Concepts and Terminology Committee Members (1995). New concepts for assessment of rangeland condition. *Journal of Range Management* 48: 271-282.
- Smirnov, N. (1948). Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions. *Annals of Mathematical Statistics* 19: 279-281.
- Sorensen, G.E., D.B. Wester y S. Rideout-Hanzak (2012). A non-destructive method to estimate standing crop of purple threeawn and blue grama. *Rangeland Ecology & Management* 65: 538-542.
- StatSoft, Inc. (2004). *STATISTICA* (data analysis software system), version 7. www.statsoft.com.
- Tueller, P.T. (2001). Remote sensing of range production and utilization. *Journal of Range Management* 54: A77-A89.
- Williamson, S.C., J.K. Detling, J.L. Dodd y M.I. Dyer (1987). Non-destructive Estimation of Shortgrass Aerial Biomass. *Journal of Range Management* 40: 254-256.
- Xiao, X., E.P. White, M.B. Hooten y S.L. Durham (2011). On the use of log-transformation vs. nonlinear regression for analyzing biological power laws. *Ecology* 92: 1887-1894.