

Estimación de la producción de forraje con imágenes de satélite en los pastizales de Zacatecas

Use of satellite images to assess forage production in the rangelands of Zacatecas

Guillermo Medina García^a, Ramón Gutiérrez Luna^a, Francisco G. Echavarría Chairez^a,
Mario D. Amador Ramírez^a, J. Ariel Ruiz Corral^b

RESUMEN

La producción de forraje en los agostaderos del estado de Zacatecas es muy variable, debido a que las condiciones del clima, suelo y manejo también lo son. Debido a las grandes extensiones de pastizales con que se cuenta en el Estado y ante la necesidad de valorar la producción de materia seca en los pastizales, es necesario contar con herramientas de medición técnica y económicamente factibles. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se ha utilizado con éxito para estimar la producción primaria de pastizales. El objetivo de este estudio fue ajustar un modelo de regresión múltiple con base en datos de producción del estrato herbáceo y sus valores correspondientes de NDVI, para estimar espacialmente la producción de forraje en los pastizales de Zacatecas. Se obtuvo un modelo de regresión múltiple para los tres años en conjunto, con un valor de R^2 de 0.66 ($P < 0.01$). Se estimó la producción de forraje para todas las áreas de pastizal aplicando el modelo generado a partir de las imágenes "SPOT Vegetation". Los modelos de regresión con base en el NDVI, pueden ser buenos estimadores de la cantidad de forraje que existe al final de la estación de crecimiento en las áreas de pastizal.

PALABRAS CLAVE: Forraje, Pastizal, NDVI, SPOT, Modelos.

ABSTRACT

Forage yields in the rangelands of Zacatecas are variable, due to soil, weather and management. The Zacatecas state has large rangeland areas which need to be continuously monitored to define a management plan of vegetation use. To estimate forage yield some easy, reliable and inexpensive measuring tools are needed. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) has been used successfully to this end. The aim of this study was to set a multiple regression model based on forage production data and corresponding NDVI values, which can help to assess spatial herbage production in the rangelands of Zacatecas. Field samplings of herbage yield were carried out across the rangelands of the State for three years. NDVI data were associated to forage yields and a multiple regression model was set for estimating forage yield in Zacatecas. The R^2 value was 0.66 ($P < 0.01$). Through this model herbage yield was estimated for all rangeland areas from the SPOT vegetation images. Regression models based on NDVI, can be good estimators of the amount of forage available at the end of the growing season in the rangelands of Zacatecas.

KEY WORDS: Forage, Grasslands, NDVI, SPOT, Models.

INTRODUCCIÓN

Las actividades agropecuarias generan el mayor número de empleos y aportan la mayor parte de los ingresos económicos en el estado de Zacatecas; en el año 2003 representó 26.9 % del producto

INTRODUCTION

Rural activities provide the greatest employment and contribute the biggest share of income in the state of Zacatecas, Mexico. In 2003 agricultural income represented 26.9 % of state GNP. Livestock

Recibido el 28 de mayo de 2007. Aceptado para su publicación el 3 de septiembre de 2008.

^a Campo Experimental Zacatecas CIRNOC-INIFAP. Km 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo, Calera, Zacatecas., 98500. gmedina@inifapzac.sagarpa.gob.mx. Correspondencia al primer autor.

^b Campo Experimental Centro Altos de Jalisco CIRNPAC-INIFAP.

interno bruto (PIB). La población ganadera del Estado al 31 de diciembre de 2003 fue de 937,437 cabezas de bovinos, 452,092 cabezas de caprinos, 275,700 de ovinos y 168,904 de equinos⁽¹⁾.

De la superficie total del Estado, 26.93 % es de uso agrícola, 15.67 % es pastizal, 12.96 % bosque, 2.12 % selva, 38.79 % matorral y 3.53 % tiene otros usos⁽¹⁾. Después del matorral xerófito, el pastizal es el tipo de vegetación con mayor porcentaje de superficie estatal (19 %) y se encuentra principalmente distribuido en el altiplano del Estado, donde la especie ganadera más importante es la bovina⁽²⁾.

La producción de las áreas agrícolas de temporal y de los agostaderos de Zacatecas es muy variable, debido a que año con año las condiciones del clima también lo son; esto da lugar a siniestros que afectan las actividades agrícolas y ganaderas cuya principal causa es la sequía⁽³⁾.

Las regiones áridas son grandes ambientes naturales cuyo uso principal es el pastoreo de ganado doméstico. Cualquier decisión acerca de la utilización y manejo de estas regiones, debe estar basado en el conocimiento de la distribución temporal y espacial de la producción primaria^(4,5).

Los pastizales son recursos naturales que el hombre no ha sabido explotar apropiadamente; como consecuencia, es frecuente que de estos se obtengan bajos niveles productivos, pérdidas de cobertura vegetal, de la diversidad vegetal, de agua y de suelo debido a la sobre utilización vía pastoreo^(6,7).

Con base en lo expuesto, se hace necesario contar con programas de manejo de los agostaderos, de acuerdo a la carga animal que puedan soportar y a las condiciones que se vayan presentando durante el ciclo de desarrollo de las especies forrajeras, de tal manera que se reduzca el sobre pastoreo, las plantas puedan sobrevivir y recuperarse, y se evite el deterioro del ecosistema, expresado éste, por medio de los recursos agua, suelo y planta.

La biomasa de los agostaderos se puede estimar de diferentes maneras: cosecha⁽⁸⁾, estimaciones visuales⁽⁹⁾, alturas o volúmenes de las plantas⁽¹⁰⁾,

at the end of 2003 totaled 937,437 cows, 452,092 goats, 275,700 sheep and 168,904 equines⁽¹⁾.

Crops occupy 26.9 % of total area of the state, rangeland 15.69 %, forests 12.96 %, lowland deciduous woodland 2.12 %, scrublands 38.79 % and the remaining 3.53 % is under other uses⁽¹⁾. After xerophile scrubland, rangeland is the type of vegetation occupying more land (19 %) and is found mainly in the plateau, being bovines the most important species in this area.

Rainfed agriculture and rangeland production in Zacatecas fluctuate greatly between years due to weather conditions, and losses in production are common, due mainly to drought⁽³⁾.

Arid regions are wide natural environments which are grazed by domestic animals. Any decision on management and use in these areas should be based on knowledge of spatial and temporal primary production distribution^(4,5).

Rangelands are natural resources that man has generally mismanaged, in consequence, low production is frequent, accompanied by losses in vegetation cover, plant diversity, water and soil due to overgrazing^(6,7).

Due to the above, it is necessary to have available rangeland management programs, in accordance with the stocking rate they can support and on conditions that may arise during the forage species growth and development cycle, in such a way that overgrazing can be kept under control, plants can survive and ecosystem (soil, plant, water) decline is avoided.

Biomass in rangelands can be estimated through different methods: harvest⁽⁸⁾, visual estimation⁽⁹⁾, plant height and volume⁽¹⁰⁾, radiometry⁽¹¹⁾, photography⁽¹²⁾ and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)⁽¹³⁾, among others.

Several methods have been developed over the years to determine standing biomass. Traditional methods frequently are lengthy and field sampling has not been successful always in terms of exactness in measuring the amount of forage in big rangeland

ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE CON IMÁGENES DE SATÉLITE

radiometría⁽¹¹⁾, fotografías⁽¹²⁾ y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés)⁽¹³⁾, entre otros métodos.

Numerosos métodos han sido desarrollados en el transcurso de los años para determinar la cantidad de forraje en pie. Los métodos tradicionales frecuentemente consumen mucho tiempo, y el muestreo de campo no siempre ha sido exitoso, en términos de exactitud de la medición de la cantidad de forraje, en grandes áreas de pastizal. Las grandes extensiones de los agostaderos, combinadas con la necesidad de conocer su estado de desarrollo, hacen necesario contar con herramientas de muestreo y monitoreo eficientes y económicas. El uso de sensores remotos es una técnica económicamente factible para tener mediciones en grandes áreas⁽¹⁴⁻²¹⁾.

El NDVI, cuando se calibra con muestreos de biomasa herbácea en campo, se ha utilizado con éxito para estimar la producción primaria aérea. Los resultados permiten estimar la cantidad de forraje al final de la estación de crecimiento y planear estrategias de pastoreo para la estación seca^(13,14).

La producción primaria estimada a partir de las imágenes de la "National Oceanic and Atmospheric Administration" (NOAA) NDVI puede proveer información que anteriormente no ha estado disponible para los manejadores y tomadores de decisiones de los agostaderos⁽⁴⁾. Sin embargo, dado que este tipo de estimaciones son de carácter regional con base en modelos empíricos, se hace necesario generar los modelos para el estado de Zacatecas o regiones ecológicas dentro del Estado.

El objetivo de este trabajo fue ajustar un modelo con base en el NDVI y muestreos de campo, para estimar la producción de forraje en los pastizales de Zacatecas al final de la estación de crecimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se llevó a cabo en las áreas de pastizales del Altiplano del estado de Zacatecas, localizadas en la región centro, durante los años 2002, 2003 y 2004. Las áreas de pastizales fueron

areas. These big rangeland areas combined to the need to know their growth stage makes necessary having efficient and cost-effective sampling and monitoring tools available. Use of remote sensors is an economically viable technology for measurement in big areas⁽¹⁴⁻²¹⁾.

NDVI when adjusted with field biomass samplings has been used successfully for estimating above ground primary biomass production. Results allow to estimate the amount of forage at the end of the growing season and to plan grazing strategies for the dry season^(13,14).

Primary production estimated from National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA NDVI) images can provide data not available before to range managers and decision makers⁽⁴⁾. However, because estimates of this type are regional and based on empirical models, it is of the utmost necessity to develop models for Zacatecas or for ecological regions in the state.

The aim of the present study was to calibrate a model based on NDVI and field samplings for estimating forage production in the rangelands of Zacatecas at the end of the growing season.

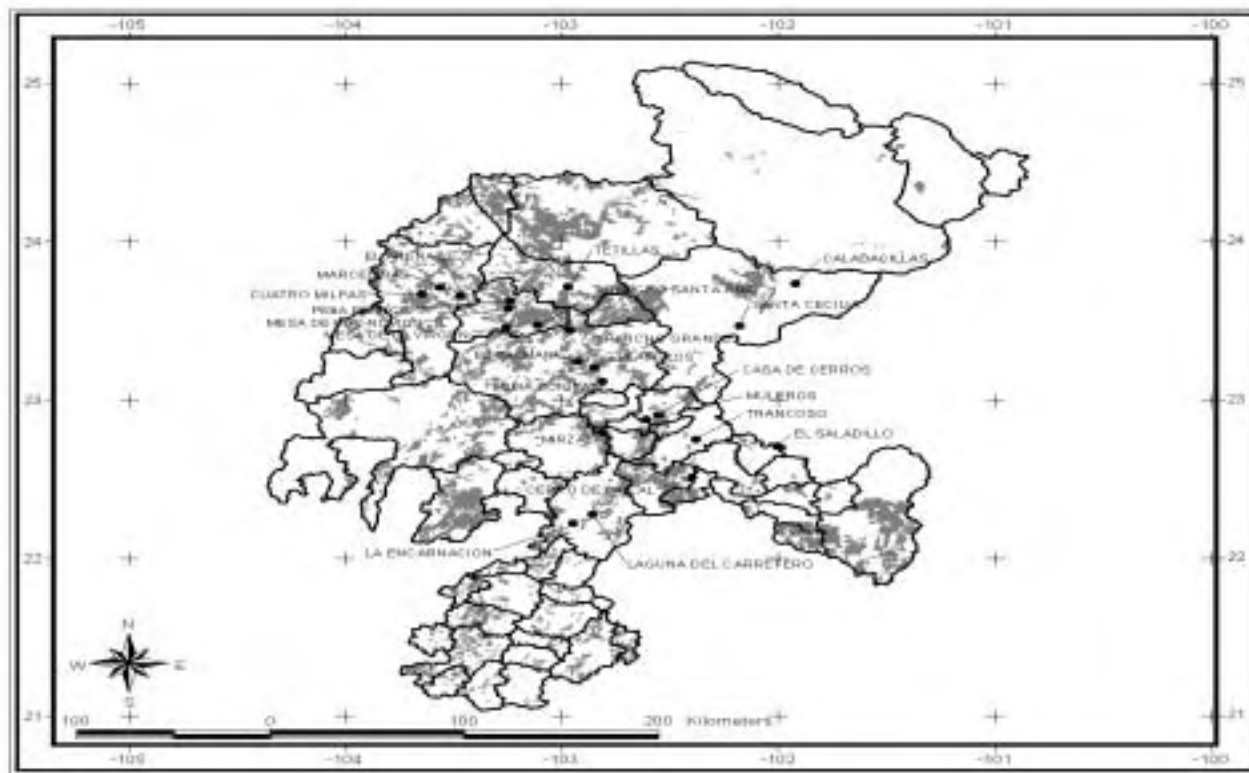
MATERIALS AND METHODS

The present study was carried out in the rangelands of the Zacatecas plateau, which is located in the central region, during 2002, 2003 and 2004. Rangeland areas were identified using the Inventario Nacional Forestal charts⁽²⁾, scale 1:1,250,000 (Figure 1). In this Figure, sites where field samplings were carried out are shown. Sampling sites were chosen taking into account rangeland areas and greater bovine population.

Field samplings for estimating forage production were carried out during the summer of the three years of the present study. Samples were taken at the end of the growing season, with the objective of recording total forage production in the rainy season⁽³⁾.

Samples were obtained using a 50*50 cm⁽¹¹⁾ frame at transects up to 500 m in all directions. Herbage

Figura 1. Áreas de pastizal del estado de Zacatecas y ubicación de los sitios de muestreo en los años 2002 al 2004
 Figure 1. Zacatecas rangelands and sampling sites from 2002 to 2004



ubicadas con base en las cartas del Inventario Nacional Foresta⁽²⁾ escala 1:250,000 (Figura 1). En la misma figura se presentan los sitios donde se realizaron los muestreos de campo. Para la ubicación de los sitios de muestreo se consideraron las áreas de pastizales y los municipios con mayor concentración de bovinos.

Durante los veranos de los tres años se llevaron a cabo muestreos de campo para estimar la producción del estrato herbáceo. Los muestreos se realizaron al final de la estación de crecimiento, con el objetivo de registrar la producción total de forraje en la temporada de lluvias⁽³⁾.

Los muestreos se obtuvieron con un marco de 50 x 50 cm⁽¹¹⁾, los cuales se realizaron utilizando transectos hasta de 500 m en diferentes direcciones. El pasto y la hierba encontrada en el cuadrante se cortaron a ras del suelo, para luego ser secada hasta peso constante.

found inside the frame was cut at ground level and later dried to constant weight.

Coordinates were obtained through GPS (Global Positioning System) for each sampling quadrant; these coordinates were used to obtain average coordinates for each site. Coordinates for each site were used to obtain the corresponding NDVI values in the SPOT vegetation satellite images, which were downloaded from <http://freee.vgt.vito.be>. Available images are ten day composites and in the present study images pertaining to the growing season were used for obtaining index values. Forage yields means of each sampling site from 2002 to 2004 and their respective NDVI values coming from same years, of the 15 ten days periods from June to October, were used to fix multiple linear regression models⁽⁴⁾ for the three years as a whole using the SAS software⁽²²⁾.

Model validation was performed through a regression between observed and estimated values,

ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE CON IMÁGENES DE SATÉLITE

De cada uno de los cuadrantes de muestreo se obtuvieron sus coordenadas mediante un GPS (Global Position System); estas coordenadas se utilizaron para obtener las coordenadas promedio de cada sitio. Las coordenadas de cada sitio se utilizaron para obtener los valores correspondientes de NDVI en las imágenes de satélite SPOT vegetation, las cuales se obtuvieron del sitio <http://free.vgt.vito.be>. Las imágenes de NDVI disponibles son compuestas decenales, y en este estudio se utilizaron las imágenes de la temporada de crecimiento para obtener los valores de este índice.

Con los datos de producción promedio de cada uno de los sitios de muestreo de los años 2002 al 2004 y sus respectivos valores de NDVI en esos años, de las 15 decenas de los meses de junio a octubre, se ajustaron modelos de regresión lineal múltiple⁽⁴⁾ de los tres años en conjunto con el programa SAS⁽²²⁾.

La validación del modelo obtenido fue realizada mediante una regresión entre los valores observados y los estimados, analizando los datos de cada año y los tres años en conjunto. La precisión del modelo en la estimación de la producción fue de acuerdo a las siguientes asunciones: una R^2 apropiada, la pendiente debe ser significativamente igual a uno y el intercepto debe ser significativamente igual a cero. La precisión óptima de los valores estimados por el modelo ocurre cuando la pendiente se acerca a uno, lo que implica que por cada unidad de producción observada, corresponderá una unidad de producción estimada^(23,24,25). Posteriormente se estimó la producción para las áreas de pastizal en el año 2004 utilizando el modelo ajustado y las imágenes SPOT vegetation necesarias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo de regresión múltiple generado con los datos de producción de forraje del estrato herbáceo de las áreas de pastizal y sus respectivos valores de NDVI de los tres años de estudio fue el siguiente:

$$MS = -2328.242 + 5.688 \text{ NDVI}_{8_2} + 2.512 \text{ NDVI}_{9_1} + 16.769 \text{ NDVI}_{10_2}$$

analyzing data of each year and a group of the three years as a whole. Model precision for estimating production was defined following these assumptions: an adequate R^2 , the slope should be significantly equal to 1 and the intercept should be significantly equal to 0. The optimal precision of the estimated values in the model occurs when the slope approaches 1, which imply that for each estimated unit, observed production also represents one unit^(23,24,25). Rangeland production for 2004 was estimated afterwards by using the adjusted model and the respective SPOT vegetation images.

RESULTS AND DISCUSSION

The multiple regression model developed with forage production data from the rangeland areas and their respective NDVI values for the three years of the present study was as follows:

$$DM = -2328.242 + 5.688 \text{ NDVI}_{8_2} + 2.512 \text{ NDVI}_{9_1} + 16.769 \text{ NDVI}_{10_2}$$

Where: DM is herbaceous stratum dry matter production, NDVI_{8_2} is the NDVI value for the second ten day period of August, NDVI_{9_1} is the NDVI value for the first ten day period of September and NDVI_{10_2} is the NDVI value for the second ten day period of October. Model was significant at ($P < 0.01$), $n = 33$ and $R^2 = 0.66$.

Of the 15 ten days images from June to October which were included in the regression analysis only three were significant, one for each month (August, September, October). This can be explained because the rainy season usually starts in Zacatecas⁽²⁶⁾ at the end of June or beginning of July, therefore herbage growth in these months was insignificant for the model. By contrast, during August, September and October herbage growth is greater and relationship with NDV is improved^(13,14,27).

The model obtained with a 0.66 determination coefficient can be considered as satisfactory due to the great variability present in the range. This variability is due to soil types, botanical composition, climate and range management which influence herbage production. In Zacatecas 21

Donde: MS es la producción de forraje del estrato herbáceo en materia seca, NDVI_8_2 es el valor del NDVI en la segunda decena del mes de agosto, NDVI_9_1 es el valor del NDVI en la primera decena de septiembre y NDVI_10_2 es el valor del NDVI en la segunda decena de octubre. El modelo resultó significativo $P < 0.01$, $n = 33$ y $R^2 = 0.66$.

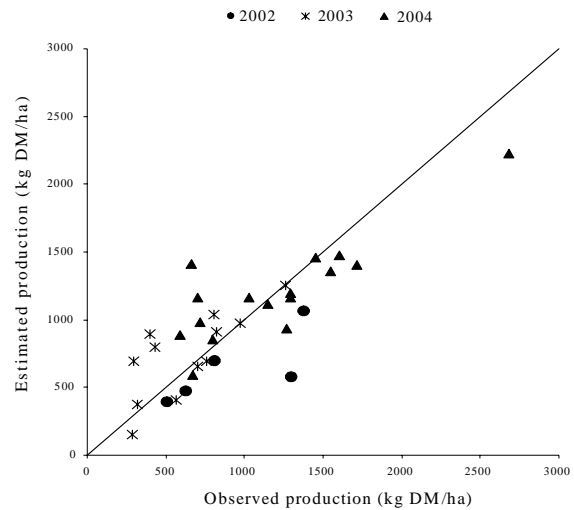
De las 15 imágenes decenales de los meses de junio a octubre que se incluyeron en el análisis de regresión, sólo tres resultaron significativas, una de cada uno de los meses de agosto, septiembre y octubre. Esto se explica por el hecho de que la temporada de lluvia en el altiplano de Zacatecas⁽²⁶⁾ comienza normalmente a finales del mes de junio o al principio de julio; en estos meses el desarrollo del pastizal es poco, por lo cual las imágenes de estos meses no fueron significativas para el modelo. En cambio en los meses de agosto, septiembre y octubre el desarrollo del pastizal es mayor, por lo que existe mejor relación con el valor del NDV^(13,14,27).

El modelo obtenido con un coeficiente de determinación de 0.66 se considera aceptable dada la gran variabilidad que existe en el agostadero. Esta variabilidad se debe a las diferentes condiciones del agostadero, ya que los tipos de suelo, la composición botánica, el clima y el manejo del agostadero influyen para que ocurra esa gran variabilidad en producción del estrato herbáceo. Así se tiene que en el estado de Zacatecas se reportan 21 tipos diferentes de vegetación⁽²⁾ y

different types of vegetation are reported⁽²⁾ and although the present study was carried out in areas identified as rangeland, in the State there are 57 different soil types or units are identified⁽²⁸⁾, showing different depth, pH, texture, salinity, etc. which produce, among other causes, different responses of vegetation even inside rangeland areas.

Figura 2. Relación entre producción observada y estimada con el modelo de regresión múltiple de los años 2002 a 2004 en el altiplano del estado de Zacatecas

Figure 2. Relationship between observed and estimated data through the multiple regression model herbage production for 2002, 2003 and 2004 in the Zacatecas Plateau



Cuadro 1. Parámetros de los modelos de producción estimada como función de la producción observada de materia seca del estrato herbáceo en los pastizales del altiplano del estado de Zacatecas

Table 1. Parameters of production models estimated as a function of dry matter observed production in rangeland herbaceous stratum in the Zacatecas Plateau

| Year | Intercept | | Slope | | R ² |
|-----------|-----------|--------|-----------|------|----------------|
| | Estimated | ASE | Estimated | ASE | |
| 2002 | 164.90 | 244.78 | 0.51 | 0.25 | 0.59 |
| 2003 | 254.12 | 149.54 | 0.76 | 0.21 | 0.56 |
| 2004 | 536.69** | 129.00 | 0.56** | 0.10 | 0.70 |
| 2002-2004 | 320.21** | 91.28 | 0.66** | 0.08 | 0.66 |

ASE= average square of error of estimates.

** Intercept different from 0 or slope different from 1 ($P < 0.05$).

ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE CON IMÁGENES DE SATÉLITE

aunque el trabajo se realizó en las áreas identificadas como pastizal, en el Estado existen 57 unidades o tipos diferentes de suelo⁽²⁸⁾, con diferentes profundidades, texturas, salinidad, pH, etc., lo cual ocasiona, entre otras causas, la diferente respuesta de la vegetación aún dentro de las áreas de pastizal.

En otras palabras, el NDVI es un índice integrador, es decir, este índice refleja toda la variación que existe en cada sitio de pastizal, de tal manera que existe una fuerte relación entre los valores del NDVI y la producción de biomasa de pastizales nativos^(3,4,29,30).

La validación del modelo se basó en la línea de regresión 1:1 con los datos observados y los estimados para cada uno de los años de manera independiente y para los tres años en conjunto (Figura 2). Los coeficientes de determinación y los

In other words, NDVI is an integrating index, that is to say, this index represents every variation in each rangeland site, in such a manner that a strong relationship between NDVI values and biomass production in native rangelands can be found^(3,4,29,30).

Model validation is based on regression line 1:1 with observed and estimated data for each single year and for the three years as a whole (Figure 2). Determination coefficients and model parameters are shown in Table 1. In 2002 and 2003 validation assumptions were fulfilled, that is to say that in both cases the intercept was statistically equal to 0 and the slope statistically equal to 1. By contrast in 2004 and for the three years as a whole, assumption were not met. However, in both cases R^2 was higher, thus explaining 70 % of the observed - estimated ratio and the error means square was lower. These two factors influence

Cuadro 2. Producción, cobertura y número de especies por sitio de muestreo realizados en los años 2002 al 2004 en el estado de Zacatecas

Table 2. Production, coverage and number of shrub species in each sampling site between 2002 and 2004 in Zacatecas

| Site | DM(kg ha ⁻¹) | Total coverage(%) | | Num shrub species |
|----------------------|--------------------------|-------------------|--------|-------------------|
| | | Herbs | Shrubs | |
| Laguna del Carretero | 2682.7 | 66.0 | 22.6 | 1 |
| Rancho Santa Ana | 1712.0 | 71.9 | 16.4 | 4 |
| Muleros | 1549.1 | 70.0 | 20.7 | 7 |
| El Arenal | 1450.1 | | | |
| Calabacillas | 1289.9 | 63.1 | 19.3 | 8 |
| El Saladillo | 1289.9 | | | |
| Marcelinas | 1284.7 | | | |
| El Palmar | 1175.5 | 51.3 | 16.8 | 16 |
| Loma Bonita | 1089.6 | 24.3 | 44.7 | 11 |
| Trancoso | 1032.5 | 71.3 | 21.5 | 6 |
| Santa Cecilia | 973.1 | 31.5 | 29.1 | 18 |
| Plateros | 797.1 | 66.3 | 9.5 | 11 |
| La Encarnación | 745.3 | 82.9 | 34.1 | 6 |
| Casa de Cerros | 677.8 | 36.7 | 14.6 | 7 |
| Rancho Grande | 672.4 | 28.8 | 57.8 | 20 |
| Cuatro Milpas | 494.6 | | | |
| Mesa de los Novios | 478.1 | 46.6 | 26.6 | 5 |
| Peña Blanca | 445.3 | 58.5 | 53.7 | 11 |
| Mesa de la Virgen | 293.3 | 69.4 | 39.1 | 7 |
| Tetillas | 290.5 | | | |

parámetros de los modelos se presentan en el Cuadro 1. En los años 2002 y 2003 se cumplieron los supuestos para la validación, es decir, en ambos casos el intercepto fue estadísticamente igual a cero y la pendiente estadísticamente igual a uno. En cambio para el año 2004 y para el análisis conjunto, los supuestos no se cumplieron; sin embargo, en estos dos casos el valor de R^2 resultó mayor, explicando hasta el 70 % de la relación observado-estimado, y el cuadrado medio del error resultó menor; estos dos aspectos influyen positivamente al generar los estimados. El comportamiento del año 2004 y del análisis conjunto posiblemente se debió al hecho de que en ese año la dispersión de los datos fue mayor (Figura 2), afectando con ello la diferencia de los observados y los estimados.

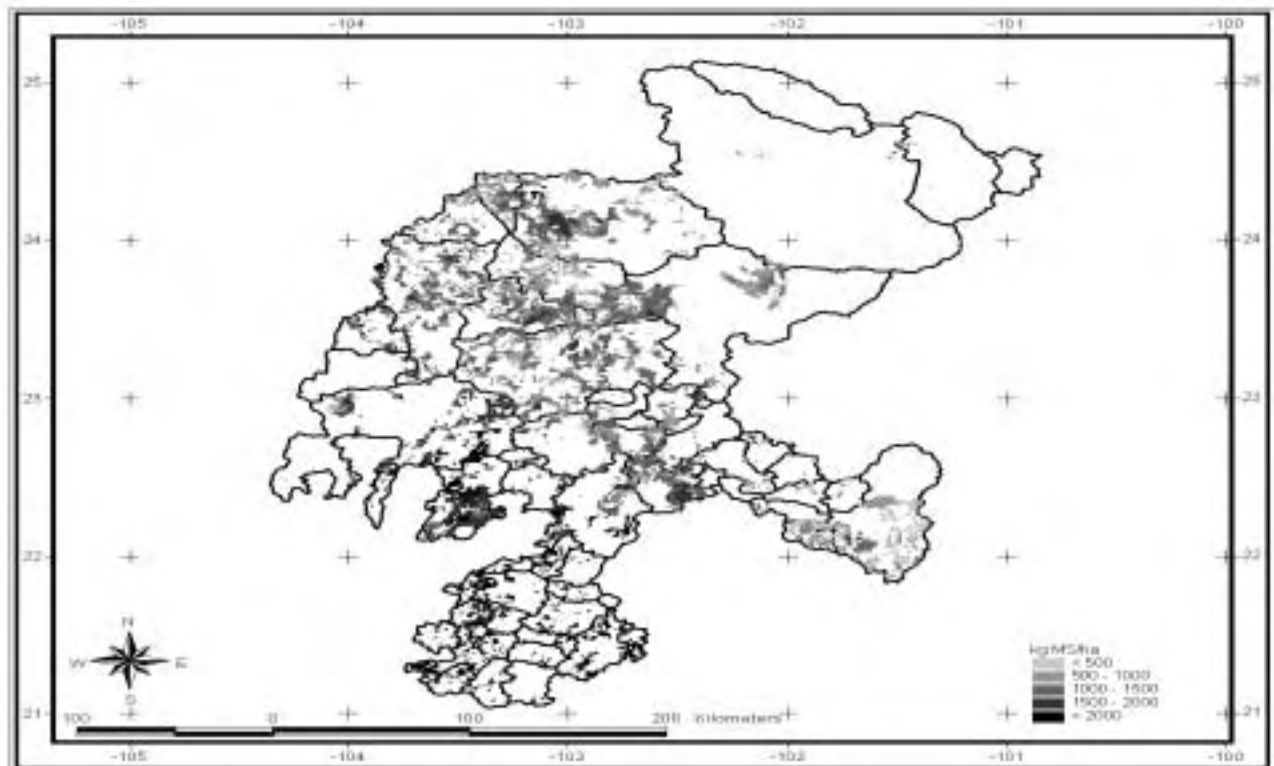
Cabe señalar nuevamente que aunque los valores de los coeficientes de determinación pudieran parecer bajos, se debe considerar la variación de la

positivamente when estimates are generated. Model behavior in 2004 and the analysis for the three years as a whole may be due to the fact that in 2004 data dispersion was greater (Figure 2), thus affecting the difference between observed and estimated data. It should be pointed out that although determination coefficient values could be considered low, variation in rangeland vegetation, as shown in Figure 2, should be taken into account. As a part of the present study some vegetation attributes were measured at the sites which allow perceiving variation in forage production, coverage and number of shrub species. This variation is a natural condition and therefore a small variation should not be expected.

Finally, using this model, forage production for 2004 for all Zacatecas rangeland areas were estimated using SPOT Vegetation⁽⁴⁾ images (Figure 3). More than 60 % of the rangeland area produced between 500 and 1,500 kg DM ha⁻¹, which

Figura 3. Producción estimada de forraje para el año 2004 a partir del modelo de regresión múltiple entre NDVI y producción para el estado de Zacatecas

Figure 3. Forage production estimated through a multiple regression model and NDVI for 2004 in Zacatecas



ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE CON IMÁGENES DE SATÉLITE

vegetación presente en los pastizales, tal como se muestra en el Cuadro 2, donde como parte del estudio se midieron algunos de sus atributos en los sitios de muestreo, en los cuales se aprecia la variación que existe en producción, cobertura y número de especies arbustivas, y esta variación es algo natural, por lo que no debe esperarse una variación baja.

Finalmente, con el modelo obtenido se estimó la producción de forraje para todas las áreas de pastizal del Estado utilizando las imágenes SPOT vegetation⁽⁴⁾ para el año 2004 (Figura 3). Más del 60 % de la superficie de pastizal tuvo una producción entre 500 y 1,500 kg/ha, lo cual concuerda con los datos de producción obtenidos en campo para ese año. Con la estimación de la producción de MS es posible determinar la carga animal apropiada sin causar sobre pastoreo.

Con base en lo expuesto, se puede afirmar que el NDVI puede ser utilizado como una buena herramienta para estimar la producción de forraje al final de la estación de crecimiento y planear estrategias de pastoreo para la estación seca^(13,14), información que actualmente no está disponible para los manejadores y tomadores de decisiones de los agostaderos⁽⁴⁾.

Para mejorar el modelo, se sugiere que se continúen haciendo muestreos de la producción de forraje en años contrastantes, incrementar los ambientes de muestreo y hacer más repeticiones dentro de cada sitio del pastizal.

CONCLUSIONES E IMPLICACIONES

El modelo de regresión múltiple presentado, con base en la producción de materia seca y el NDVI, puede ser un buen estimador de la producción de forraje del estrato herbáceo. Las imágenes de NDVI con mayor relación con la producción de materia seca de los pastizales fueron la segunda decena de agosto, la primera de septiembre y la segunda de octubre. La cantidad de forraje al final de la estación de crecimiento en los pastizales, estimada con las imágenes del NDVI, puede servir de base para estimar la carga animal y mejorar los programas de manejo. Se sugiere mejorar el modelo

corresponds with field production data for that year. With DM production estimates it is possible to determine the appropriate stocking rate that should not cause overgrazing. Based on the facts described up to here, it can be safely assumed that NDVI can be used as an adequate tool for estimating forage production at the end of the growing season and for planning grazing strategies for the dry period^(13,14). This information is not available at this moment for range managers and decision makers⁽⁴⁾.

To improve the model above described, forage production samples should be taken in contrasting years, number of sampling sites should be increased and more replications should be planned in each site.

CONCLUSIONS AND IMPLICATIONS

The multiple regression model described here, based on dry matter production and NDVI could be a good estimator of forage production in the herbaceous stratum. NDVI images with stronger relationship with rangeland dry matter production were the second ten day period of August, the first ten day period of September and the second ten day period of October. The amount of forage at the end of the growing season, estimated through NDVI images, could be used as a base for estimating stocking rate and to improve grazing management programs. For improving the model the increase of field samples in time and space is suggested.

End of english version

umentando el número de muestreos de campo en espacio y tiempo.

LITERATURA CITADA

1. INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Anuario estadístico del estado de Zacatecas. Edición 2004. Aguascalientes, Ags., México. 2004.
2. UNAM. Universidad Nacional Autónoma de México. Cartas del inventario forestal escala 1:250,000. 1993.

3. Diallo O, Diouf A, Hanan NP, Nidiaye A. AVHRR monitoring of savanna primary production in Senegal, West Africa: 1987-1988. *Int J Remote Sensing* 1991;(12):1259-1279.
4. Hobbs T. The use of NOAA-AVHRR NDVI data to assess herbage production in the arid rangelands of Central Australia. *Int J Remote Sensing* 1995;(16):1289-1302.
5. Bork EW, Werner SJ. Viewpoint: Implications of spatial variability for estimating forage use. *J Range Manage* 1999;(52):151-156.
6. Serna PA, Rubio AFA, Echavarría CFG. Áreas de exclusión; una opción para la rehabilitación y conservación de los pastizales. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Norte Centro. Campo Experimental Zacatecas. (Folleto para Productores No. 27). 2004.
7. Gutiérrez LR. Salud y condición del pastizal. En: II Simposio Internacional de manejo de pastizales. Memorias del taller para técnicos "Inventario de pastizales". Zacatecas, Zac. 2005:1-21.
8. Sala OE, Deregibus VA, Schlichter T, Alippe H. Productivity dynamics of a native temperate grassland in Argentina. *J Range Manage* 1981;34:48-51.
9. Waite RB. The application of visual estimation procedures for monitoring pasture yield and consumption in exclosures and small plots. *Trop Grassl* 1994;(28):38-42.
10. Thomson EF, Mirza SN, Afzal J. Predicting the components of aerial biomass of fourwing saltbush form shrub height and volume. *J Range Manage* 1998;(51):323-325.
11. Olson KC, Cochran RC. Radiometry for predicting tallgrass prairie biomass using regression and neural models. *J Range Manage* 1998;(51):186-192.
12. Paruelo JM, Lauenroth WK, Roset PA. Estimating aboveground plant biomass using a photographic technique. *J Range Manage* 2000;(53):190-193.
13. Wylie BK, Denda I, Piepper RD, Harrington JA, Reed BC, Southwood GM. Satellite-Based herbaceous biomass estimates in the pastoral zone of Niger. *J Range Manage* 1995;(48):159-164.
14. Lobo A. Regional scale hierarchical classification of temporal series of AVHRR vegetation index. *Int J Remote Sens* 1997;18:(15)3167-3193.
15. Tueller PT. Remote sensing technology for rangeland management. *J Range Manage* 1989;(42):442-452.
16. Tueller PT. Remote sensing of range production and utilization. *J Range Manage* 2001;(54):A77-A89.
17. Reeves CR, Winslow JC, Running SW. Mapping weekly rangeland vegetation productivity using MODIS algorithms. *J Range Manage* 2001;(54):A90-A105.
18. Ritchie JC, Seyfried MS, Chopping MJ, Pachepsky Y. Airborne laser technology for measuring rangeland conditions. *J Range Manage* 2001;(54):A8-A21.
19. Hunt ER Jr, Everitt JH; Ritchie JC, Moran MS, Booth DT, Anderson GL, Clark PE, Seyfried MS. Applications of research using remote sensing for rangeland management. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 2003;(69):675-693.
20. Everitt JH, Yang C, Fletcher RS, Drawe DL. Evaluation of high-resolution satellite imagery for assessing rangeland resources in south Texas. *Rangeland Ecol Manage* 2006;(59):30-37.
21. Báez-González AD, Chen PY, Tiscareno-Lopez M, Srinivasan R. Satellite-based method of estimating corn yield in real time under irrigated and non-irrigated conditions in Mexico. *Crop Sci* 2002;42(6):1943-1949.
22. Statistical Analysis System (SAS). SAS/STAT User's Guide. Carey, NC. Release 8.02.
23. Fritz JO, Vanderlip RL, Heiniger RW, Abelhalim AZ. Simulating forage sorghum yields with SORKAM. *Agron J* 1997;89:64-68.
24. Khorsandi FM, Boone YL, Weerakkody G, Wishler FD. Validation of the soil temperature subroutine HEAT in the cotton simulation model GOSSYM. *Agron J* 1997;89:415-420.
25. Amador-Ramírez MD, Acosta-Díaz E, Medina-García G, Gutiérrez-Luna R. An empirical model to predict yield of rainfed dry bean with multi-year data. *Rev Fitotec Mex* 2007;3:311-319.
26. Medina GG, Ruiz CJA. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Zacatecas (Período 1961-2003). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Norte Centro. Campo Experimental Zacatecas. Calera de V.R. Zacatecas. (Libro Técnico No. 3). 2004.
27. Reeves CM, Zhao M, Running SW. Applying improved estimates of MODIS productivity to characterize grassland vegetation dynamics. *Rangeland Ecol Manage* 2006;(59):1-10.
28. CETENAL. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. Cartas edafológicas escala 1:50,000 del estado de Zacatecas, 1a. ed. México, DF. 1972.
29. Aase JK, Frank AB, Lorenz RJ. Radiometric reflectance measurements of Northern Great Plains rangeland and crested wheatgrass pasture. *J Range Manage* 1987;(40):299-302.
30. Echavarría CFG, Gutiérrez LR, Ledesma RRI, Bañuelos VR, Aguilera SJI, Serna PA. Influencia del sistema de pastoreo con pequeños rumiantes en un agostadero del semiárido Zacatecano: I Vegetación nativa. *Tec Pecu Mex* 2006;44(2):203-217.