



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN

Y SERVICIO EN ZOOTECNIA

POSGRADO EN PRODUCCIÓN ANIMAL

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL FORRAJERO DEL MATORRAL XERÓFILO POR FOTOGRAFÍA DIGITAL Y REFLECTANCIA

TESIS

Que como requisito parcial

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

Presenta:

ALDO TORRES SALES

Bajo la supervisión de: PEDRO ARTURO MARTÍNEZ HERNÁNDEZ, Ph.D.



DIRECCIÓN GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



Diciembre de 2010

Chapingo, Estado de México

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL FORRAJERO DEL MATORRAL XERÓFILO POR FOTOGRAFÍA DIGITAL Y REFLECTANCIA

Tesis realizada por **ALDO TORRES SALES**, bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

DIRECTOR:



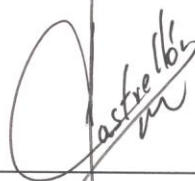
Ph.D. PEDRO ARTURO MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

ASESOR:



Ph.D. RODOLFO RAMÍREZ VALVERDE

ASESOR:



M.C. JORGE LUIS CASTRELLÓN MONTELONGO

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Aldo Torres Sales

Fecha de nacimiento: 19 de octubre de 1983

Lugar de nacimiento: Arapiraca – Alagoas – Brasil

Profesión: Zootecnista



Desarrollo académico

	Graduación en Técnico en Agropecuaria
2000 – 2003	Colégio Agrícola Vidal de Negreiros Universidade Federal da Paraíba – Brasil
	Zootecnista
2003 – 2007	Departamento de Zootecnia Universidade Federal da Paraíba – Brasil
	Posgrado en Producción Animal
2009 – 2010	Departamento de Zootecnia Universidad Autónoma Chapingo

ÍNDICE

LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE APÉNDICES.....	viii
1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
2 REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Opciones para la evaluación de áreas forrajeras.....	3
2.1.1 Mediciones directas.....	3
2.1.2 Mediciones indirectas.....	5
2.2 Condición de las áreas forrajeras	9
2.3 Implicaciones del sobrepastoreo en las áreas forrajeras	11
2.4 Determinación de la condición de áreas forrajeras por sensores remotos	12
2.5 Matorral xerófilo	17
3 LITERATURA CITADA	20
4 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL FORRAJERO DEL MATORRAL XERÓFILO POR FOTOGRAFÍA DIGITAL Y REFLECTANCIA	24
4.1 Resumen	24
4.2 Abstract.....	25
4.3 Introducción	26
4.4 Materiales y métodos.....	27
4.4.1 Sitios, parcelas y estaciones de muestreo	27
4.4.2 Mediciones ópticas y destructivas	28
4.4.3 Procesamiento de la información óptica.....	31
4.4.4 Manejo y análisis estadístico de los datos	31

4.5	Resultados y discusión	32
4.5.1	Componentes de cobertura del dosel descritos por fotografía digital asociados a la cantidad de forraje presente	32
4.5.2	Estimación del forraje presente mediante índice verde (IVIS)..	38
4.6	Conclusiones	42
4.7	Literatura citada	42
5	APÉNDICES	45

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Caracterización climática, edáfica y de vegetación en los sitios de colecta de datos de campo.	28
Cuadro 2. Fechas de colecta de datos de campo en los dos sitios de muestreo.....	30
Cuadro 3. Coeficiente de determinación (r^2) para estimación de forraje presente a partir de índice verde (IVIS).	39

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de la generación de imágenes a partir de sensores remotos presentes en un satélite	6
Figura 2. Imagen satelital con y sin superposición de una cuadrícula que representa la unidad píxel.....	8
Figura 3. Arreglo de un sitio de muestreo (SM) de 1500 m por lado, con dos transectos y nueve parcelas de monitoreo (PM) de 100 m por lado.	29
Figura 4. Mediciones ópticas (A) y (B) foto digital y lectura de reflectancia; y (C) cosecha dentro de una estación de muestreo.	30
Figura 5. Componentes principales para cobertura aérea en la estación seca del sitio San Juan del Río.	33
Figura 6. Componentes principales para cobertura aérea en la estación de lluvia del sitio San Juan del Río.	33
Figura 7. Componentes principales para cobertura aérea en la estación seca del sitio Cadereyta.	36
Figura 8. Componentes principales para cobertura aérea en la estación de lluvia del sitio Cadereyta.	37

LISTA DE APÉNDICES

Apéndice 1. Fotografía digital de una estación de muestreo circular de 1.6 metros de diámetro, sitio San Juan del Río en la época de lluvias.	45
Apéndice 2. Fotografía digital de una estación de muestreo circular de 1.6 metros de diámetro, sitio San Juan del Río en la época seca.	46
Apéndice 3. Fotografía digital de una estación de muestreo circular de 1.6 metros de diámetro, sitio Cadereyta en la época de lluvias.	47
Apéndice 4. Fotografía digital de una estación de muestreo circular de 1.6 metros de diámetro, sitio Cadereyta en la época seca.	48
Apéndice 5. Dispersión de datos del forraje contenido en el estrato herbáceo (materia verde) presente en relación a índice verde base iso-suelo (IVIS) en los sitios San Juan del Río y Cadereyta.	49
Apéndice 6. Dispersión de datos del forraje contenido en el estrato herbáceo (materia seca) presente en relación a índice verde base iso-suelo (IVIS) en los sitios San Juan del Río y Cadereyta.	49
Apéndice 7. Dispersión de datos del forraje contenido en el estrato arbustivo (materia verde) presente en relación a índice verde base iso-suelo (IVIS) en los sitios San Juan del Río y Cadereyta.	50
Apéndice 8. Dispersión de datos del forraje contenido en el estrato arbustivo (materia seca) presente en relación a índice verde base iso-suelo (IVIS) en los sitios San Juan del Río y Cadereyta.	50
Apéndice 9. Dispersión de datos del forraje total (materia verde) presente en relación a índice verde base iso-suelo (IVIS) en los sitios San Juan del Río y Cadereyta.	51

DEDICATORIAS

A mis amados padres

José Aldo Sales y María de Fátima T. Guedes Sales, con todo mi cariño, admiración y respeto, por el apoyo incondicional y paciencia en todos los momentos de mi vida.

A mi familia por ser pilar de sustento en los momentos que ya no sé a quién recurrir.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo y el Posgrado en Producción Animal, por la oportunidad de continuar con mi formación profesional.

A la Secretaria de Relaciones Exteriores de México, por la beca de estudios que me otorgaron a lo largo de cuatro semestres.

Al Ph.D. Pedro Arturo Martínez Hernández, por la confianza, amistad y apoyo, no sólo en la vida académica, sino también por su motivación, paciencia y conocimientos tan enriquecedores a lo largo de estos últimos dos años.

Al M.C. Jorge Luis Castrellón Montelongo, amigo que despertó mi interés en conocer el universo de sensores remotos y los sistemas de producción animal de México.

Al Ph.D. Rodolfo Ramírez Valverde por su participación en el comité asesor.

Al M.C. Manuel Chavarría, que considero mi amigo y hermano a lo largo de estos dos años de maestría.

Al programa SIMSOG (Sistema Nacional de Monitoreo Satelital Orientado a la Ganadería), por las facilidades y conocimientos técnicos disponibles para la ejecución de esta tesis.

A todos mis compañeros de posgrado, por su paciencia y compañerismo.

A todas las personas que me brindaron su amistad en México, cada día con ustedes fue una lección de cultura y costumbres de este encantador país.

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

Un área forrajera es una superficie con especies vegetales que proveen alimento, principalmente para rumiantes domésticos y otros animales; la composición florística, bromatológica y fenológica puede ser muy variable e incluir especies sembradas, inducidas o espontáneas. La composición botánica de un área forrajera en un tiempo dado es función de las condiciones edáficas y climáticas específicas del lugar, y del impacto modificador del paisaje aplicado por el hombre, a través de prácticas agronómicas, culturales y de aprovechamiento.

Los agostaderos son un tipo de área forrajera, caracterizados por ser tierras inapropiadas para el cultivo agrícola, sea por clima, relieve, dificultad de acceso o limitantes edáficas como es el caso de los suelos salinos.

Los agostaderos de México cubren no menos de 45% de la superficie del país (INEGI, 2008), y por aprovechamientos poco sustentables, el recurso forrajero presente en ellos viene enfrentando una problemática diversa limitando a los agostadores como una fuente importante para la alimentación del ganado doméstico y silvestre. La degradación de la vegetación y del suelo causada por aprovechamientos que exceden la capacidad de soportar perturbaciones de estos componentes del ambiente, es uno de los factores que reduce el potencial forrajero de los agostaderos. El seguimiento continuo del estado de salud del agostadero permitiría proponer de manera oportuna opciones de manejo para restituir o prevenir la degradación de una forma económica.

Básicamente existen dos formas para determinar el estado de salud y potencial forrajero de un agostadero, una es mediante mediciones directas, destacando la cosecha de biomasa y la otra es por medio de mediciones indirectas que no requieren en todo momento de la cosecha de biomasa. Entre las mediciones indirectas sobresale el uso de las imágenes satelitales, por su alto grado de precisión y facilidad para la caracterización continua.

Almeida *et al.* (1990) indican que el seguimiento dado con el uso de imágenes satelitales permitió la caracterización continua de la vegetación con más de 80% de precisión. Sin embargo, la utilidad de las imágenes satelitales depende de un proceso de calibración específico; en la actualidad la mayoría de dichas calibraciones fueron desarrolladas a partir de praderas conformadas por pocas especies o de agostaderos con dosel vegetal dominado por herbáceas y muy particularmente gramíneas (Ares *et al.*, 2002; Del Valle *et al.*, 2002). No existen formas de calibración para vegetaciones conformadas por estratos herbáceo y arbustivo comunes en varios agostaderos nacionales, entre ellas el matorral xerófilo.

El matorral xerófilo es un tipo de vegetación importante para la ganadería mexicana por presentarse en los agostaderos de las regiones centro norte, noreste y noroeste, ocupando aproximadamente 34% de la superficie nacional (INEGI, 2008).

La presente tesis consiste en describir mediante una revisión de literatura, la importancia del uso de sensores remotos como una herramienta no destructiva para la determinación de características físicas y biológicas de agostaderos. Además, esta tesis presenta los resultados de una investigación de campo donde se colectó información óptica de un agostadero con vegetación de matorral xerófilo, para validar el posible uso de esta tecnología como medio para describir el potencial forrajero de áreas extensas de agostaderos.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Opciones para la evaluación de áreas forrajeras

La utilización de técnicas para determinar la disponibilidad de biomasa en áreas forrajeras, es importante en la investigación científica y en el proceso de elaboración de planes estratégicos para el aprovechamiento comercial de dichas áreas.

Para la determinación de la cantidad total y otros aspectos físicos y biológicos de la biomasa vegetal presente en un área forrajera existen dos grupos de mediciones: las directas e indirectas (Hodgson *et al.*, 2000).

En forma sucinta las mediciones directas comúnmente implican la remoción y destrucción de la biomasa vegetal, por tener que cortar y posteriormente aplicar métodos de laboratorio basados en procesos de digestión o solubilización del tejido vegetal cosechado de las especies de interés. Las indirectas son en realidad una forma de expandir en espacio y tiempo las implicaciones de las mediciones directas, por lo que son dependientes de la precisión con que se tomen estas últimas. Las mediciones indirectas consisten en medir atributos de las plantas *"in situ"*, sin necesidad de remoción ni destrucción de las mismas o parte de ellas (Hodgson *et al.*, 2000).

2.1.1 Mediciones directas

Todas las técnicas de mediciones directas implican la cosecha y remoción de tejido vegetal, variando en la extensión de biomasa a cosechar; herramienta o equipo para la cosecha; y la forma geométrica de la unidad con que se delimita el área de cosecha. La intensidad y distribución de los puntos de cosecha también han originado variaciones en las técnicas de medición directa.

T'Mannetje (2000) y Carvalho *et al.* (2008) coinciden en señalar que las mediciones directas son más precisas, por implicar la cosecha del material a evaluar. Sin embargo, los primeros autores, indican que las mediciones

directas no permiten evaluar la acumulación de biomasa vegetal a través del tiempo en una misma planta, ya que en cada momento de medición se está removiendo el material vegetal presente.

Carvalho *et al.* (2008) mencionan que las mediciones directas son poco viables al intentar cuantificar el rendimiento de grandes superficies por el gran número de puntos de cosecha, además de que aquellos lugares donde se realizó la cosecha, no aportarán forraje para el uso o aprovechamiento proyectado para el total del área, por ejemplo, proveer forraje para animales en pastoreo.

La “técnica parcela superficie” es la técnica directa con mayor frecuencia de uso en campo y consiste en cosechar superficies rectangulares, circulares o cuadradas delimitadas por marcos de madera o fierro. Para vegetación herbácea la superficie de cosecha es de 1 m², en especies rastreras o de crecimiento muy exuberante, puede ser difícil aplicar el criterio de que material cosechar, ya que los puntos de enraizamiento de las plantas pueden no coincidir con la ubicación del estrato aéreo en relación a la superficie de muestreo (T´Mannetje, 2000).

Aguilar (2002) señala que la forma geométrica y la superficie de la unidad de muestreo varían de acuerdo con las características morfológicas de la planta forrajera evaluada; para pastizales con dominancia de estrato herbáceo recomienda el uso de superficies menores a 1 m², pero aumentando al máximo posible el número de puntos de muestreo. Hodgson *et al.* (2000) indican que el tiempo y mano de obra que demandan las técnicas directas limitan su uso en praderas comerciales, aunque esta información es importante para la toma de decisiones en el manejo y aprovechamiento óptimo de la pradera, situación que explica y justifica la necesidad de desarrollar técnicas de medición que reduzcan tiempo y mano de obra, como son las técnicas indirectas.

2.1.2 Mediciones indirectas

Los métodos indirectos se desarrollaron para atender dos necesidades: medir la biomasa de la planta sin destruirla, y reducir el trabajo y costo en campo, por menor desplazamiento de personal y equipo para obtención de las muestras.

Para medir la cantidad y producción de forraje, Laca y Lemaire (2000) destacan tres grupos de métodos indirectos: los mecánicos; los electrónicos o de capacitancia; y los sensores remotos.

Entre los mecánicos se destacan: altura de la planta; altura comprimida; índice de área foliar; y calificación por abundancia florística. Los métodos electrónicos o de capacitancia, consisten en determinar el flujo eléctrico dentro del dosel vegetal y la magnitud de este flujo se relaciona con la presencia de biomasa vegetal; en general la tendencia es que a mayor flujo mayor rendimiento (Carnevali y Silva, 1999).

Los sensores remotos se basan en principios ópticos y por tanto usa equipos que pueden estar totalmente fuera del área a evaluar, como es el caso de los satélites. En particular los sensores remotos obtienen imágenes del área de interés, relacionando características de estas imágenes, como por ejemplo la intensidad del color, con atributos como cantidad de biomasa vegetal, tipo de especies vegetales presentes, estrato de crecimiento de las especies, etc. (Florenzano, 2002).

Para Crosta (1993), la aplicación de los sensores remotos para el seguimiento y evaluación de áreas forrajeras ha ganado mucha importancia tanto a nivel científico como comercial, por ser una técnica que no demanda ni siquiera el traslado de personal y equipos al área forrajera en evaluación, una vez que se cuente con la calibración que relaciona características de la imagen con los atributos de interés; además de poder abarcar grandes extensiones de terreno, incluyendo áreas con accidentes topográficos como pendientes o de vegetación muy densa con la ausencia de senderos.

Según Carvalho y Guayuru (2003), originalmente las imágenes satelitales se usaron para fines militares, posteriormente a mediados de la década de los 90 la comercialización abierta de estas imágenes y la experiencia acumulada en el manejo e interpretación de las mismas permitió su uso para otros fines, entre ellos el seguimiento al estado de la masa vegetal de áreas específicas.

Las imágenes por satélite son producto de la reflectancia en las diferentes bandas espectrales provenientes de cuerpos que reciben la energía electromagnética que llega a la Tierra en forma de ondas o bandas; esta energía se propaga a través del espacio y puede ser absorbida o reflejada por los objetos o seres vivos tomando un patrón único (Chuvienco, 1996).

La reflectancia de esta energía depende y es específica a la naturaleza de los objetos, por lo que se originan patrones específicos que podrán ser relacionados con atributos de interés, por ejemplo, rendimiento, biomasa, estado de crecimiento, tamaño, etc. del objeto, permitiendo su evaluación y seguimiento (Figura 1).

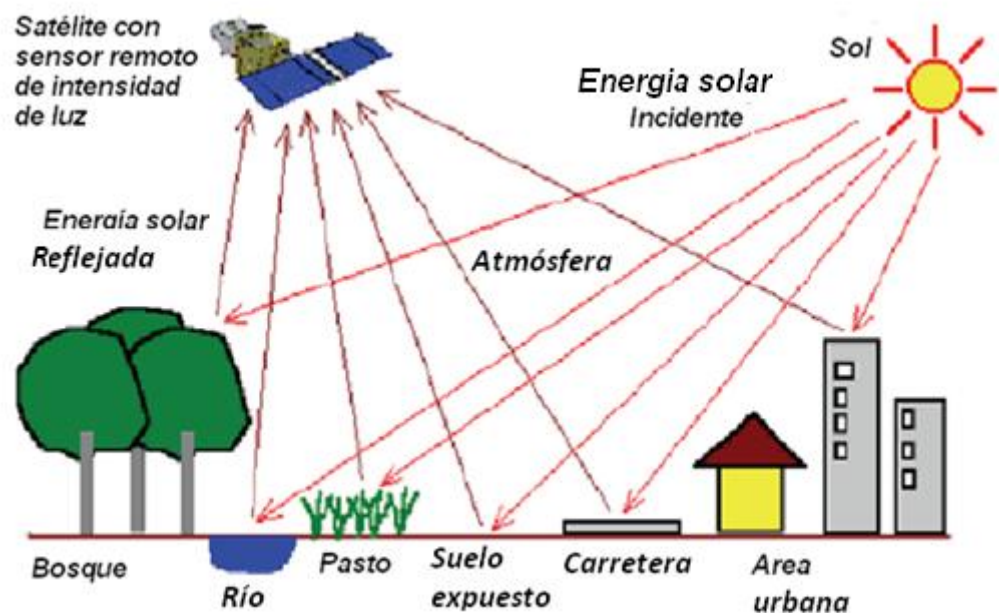


Figura 1. Representación esquemática de la generación de imágenes a partir de sensores remotos presentes en un satélite (Almeida, 1993).

Los datos de reflectancia captados por los satélites deben ser ajustados debido a las variaciones ambientales que distorsionan la imagen como nubosidad, insolación, clima, tipo de vegetación, y posición geométrica de la tierra con respecto al sol, antes de ser usados para determinar la magnitud de los atributos de interés. Este proceso de ajuste se llama calibración e implica manipulación numérica del espectro, espacio, temporal y radiométrica.

La calibración espectral está basada en la elección de las regiones del espectro electromagnético o bandas espectrales en las cuales se produce un patrón de imagen con características únicas y fácilmente identificables, y se relaciona este patrón con los atributos físicos y químicos en evaluación (Maia y Padua, 2009).

Mather (1999) y Paruelo (2000) señalan que las bandas espectrales comúnmente usadas en estudios de individuos vegetales han sido: azul visible, rojo visible, infra-rojo cercano, medio y distante, y dentro de estas bandas espectrales la rojo visible e infra-rojo cercano han mostrado ser las que mejores resultados presentan para la estimación de biomasa vegetal.

La calibración espacial consiste en identificar el objeto de menor tamaño que es posible representar en la imagen. Lo importante en esta calibración es determinar el tipo de aplicación en la cual puede ser empleada la imagen, así como superficie de trabajo posible y el grado de detalle deseado de la superficie terrestre en estudio (Maia y Padua, 2009).

La resolución temporal se refiere al intervalo de tiempo en días u horas, que el satélite tarda en obtener dos imágenes consecutivas de la misma región en la Tierra. Crosta (1993) señala que el punto de calibración para la resolución temporal consiste en identificar los mejores días para obtener las imágenes en relación a la hora del día, insolación e intensidad de luz presentes al momento de la toma de la imagen.

La calibración radiométrica se relaciona con la composición de las imágenes digitales en función de la composición de un conjunto de elementos denominados píxeles. Un píxel representa un área definida de la superficie

terrestre; así el área total del conjunto de todos los píxeles forma el área de superficie cubierta por la imagen requerida (Figura 2).

Imagen satelital de un punto específico de la superficie de la tierra



Imagen satelital con sobreposición de una cuadrícula organizada en líneas y columnas donde cada unidad es un píxel

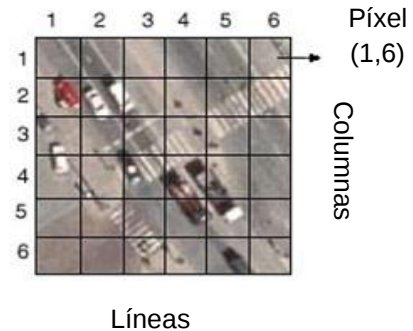


Figura 2. Imagen satelital con y sin sobreposición de una cuadrícula que representa la unidad píxel (Almeida, 1993).

El punto importante de la calibración radiométrica es definir la representación gráfica de lo reflejado y captado por los satélites. Por ejemplo, determinar que una reflectancia en la banda 650 nm con un patrón específico corresponde a un árbol de *Leucaena*.

Con la ayuda de programas computacionales es posible sobreponer imágenes captadas en diferentes espectros, generando una sola imagen de mayor precisión, colorido, y de formas distinguibles a la visión humana. Las calibraciones ya mencionadas hacen que en su conjunto las imágenes de satélite sean fuente de información, detallada y precisa de la cobertura de la superficie terrestre (Trejo y Hernández, 1996); como puede ser la cobertura vegetal formada de especies cultivadas o de dispersión más heterogénea como la compuesta por bosques de diferentes tipos.

Almeida *et al.* (1990) lograron mediante el uso de imágenes satelitales una precisión superior a 80% al describir cuantitativa y cualitativamente áreas forrajeras en tres diferentes fases sucesionales. Russel (1989) indica que la posibilidad del uso de imágenes obtenidas por sensores remotos para describir cuantitativa y cualitativamente un dosel vegetal, radica en que todas las alternativas en la composición de las especies vegetales, como en

el tejido que conforman dichas especies, ocasionan cambios paralelos en los patrones de absorción, transmisión y reflectancia de la radiación solar incidente.

2.2 Condición de las áreas forrajeras

La condición de un área forrajera es el producto de la suma de factores biológicos, físicos y químicos que determinan el estado de sustentabilidad de la vegetación en aspectos de cantidad, calidad y composición.

Para Machado (1999), tener un área forrajera en buena condición implica que el crecimiento y la composición de la vegetación presente, está haciendo uso al máximo posible de los factores ambientales, como luz, temperatura y humedad, manteniendo en un alto nivel productivo al componente suelo.

Por el contrario, una condición pobre implica que la cubierta vegetal no es capaz de expresar su máximo potencial de uso de los recursos, ya sea por no estar presentes las especies vegetales que pueden lograr esto o bien que el número de individuos está por debajo del potencial, permitiendo la existencia de áreas desprovistas de vegetación y permitiendo además que el suelo quede sujeto a presiones erosivas ejercidas por elementos ambientales como el viento y el agua (Ortiz-Solorio *et al.*, 1994).

Esta situación la mayoría de las veces muestra una tendencia a mayor degradación de no erradicarse el o los factores que llevaron a la pérdida de la buena condición, continuando hasta dar lugar a niveles altos de erosión del suelo. Para el caso de áreas forrajeras, el pastoreo no controlado es comúnmente el factor promotor de la pérdida de condición, aun cuando otros factores de manejo pueden acelerar o aumentar el impacto negativo, como lo es la inadecuada aplicación del fuego (Ortiz-Solorio *et al.*, 1994).

Macedo y Zimmer (1993) y Macedo (1999) señalan que la degradación o pérdida de condición de un área forrajera es un proceso evolutivo que implica reducción en el vigor, productividad y capacidad de recuperación natural de los pastos para sustentar los niveles de producción y calidad

exigida por los animales, también puede presentarse un incremento de efectos nocivos por plagas, enfermedades y plantas oportunistas. La degradación de la condición de las áreas forrajeras, de no ser revertida, puede culminar con un deterioro de los recursos naturales referido como desertificación.

En México, las áreas cubiertas por pastos nativos han desarrollado distintos grados de degradación a consecuencia de aprovechamientos forestal y ganadero, que rompen el equilibrio original existente entre los componentes bióticos y abióticos, con lo que se favorecen procesos de degradación (Andrade *et al.*, 2006). El proceso de degradación originado por animales pastoreadores puede asociarse al hábito de pastoreo selectivo de estos animales, que prefieren consumir prioritariamente aquellas especies que le son más apetecidas, dejando sin cosechar individuos de otras especies que con el tiempo logran una mayor propagación o expansión, al contrario de las especies mayoritariamente cosechadas, que pierden su capacidad competitiva (Nascimento Júnior *et al.*, 1999a).

Permitir o promover pastoreos que ocasionan una cosecha excesiva de la biomasa de las especies vegetales preferidas por el animal sin ningún tipo de descanso o de manejo, hace que se origine un desequilibrio ambiental, disminuyendo la capacidad de competencia de las especies preferidas con respecto de las menos preferidas (Stoddart y Smith, 1975). La mayor frecuencia e intensidad de cosecha a la que son sometidas las especies preferidas, promueve la muerte de las mejores plantas forrajeras y facilita la proliferación de especies poco deseables por no servir como alimento para el ganado. Nascimento Júnior *et al.* (1999a) indican que este proceso de desequilibrio provoca la pérdida de la cobertura vegetal del suelo, la erosión y la productividad, siempre y cuando no se erradiquen los factores que condicionan dicho desequilibrio.

Desde el punto de vista de clasificación de agente causal, Nascimento Junior *et al.* (1999b) dividen el origen de la degradación de un ecosistema en tres tipos: física, química y biológica. Compactación, limitaciones de aeración y gran susceptibilidad a erosión son síntomas evidentes de degradación de

origen físico del suelo. En general la mayoría de la degradación física, puede ser observada en lugares próximos a aguadas, saladeros y comederos, y promovida por el pisoteo excesivo por los animales.

La degradación biológica está asociada a la reducción de materia orgánica (mantillo), y de la actividad y diversidad de los organismos del suelo. La degradación química es reflejo de la pérdida por lixiviación, traslado, erosión de nutrientes del suelo o acumulación de elementos tóxicos, que son nocivos al crecimiento de la planta (Macedo, 1999). En las tres degradaciones, un factor predominante es la reducción en la magnitud de la cobertura vegetal, comúnmente asociada a la disminución en la biodiversidad de flora y fauna.

2.3 Implicaciones del sobrepastoreo en las áreas forrajeras

El sobrepastoreo ha sido señalado como el principal factor que promueve la degradación de las áreas forrajeras al romper el equilibrio entre el almacenaje de nutrientes acumulados en la materia orgánica y el crecimiento inicial de las plantas, principalmente del estrato herbáceo (Carvalho, 1998).

El crecimiento inicial de las plantas luego de un periodo de latencia o dormancia determinado por condiciones limitantes del ambiente, depende de las reservas presentes en la planta y que deberá responder para asegurar un nuevo crecimiento inicial en la siguiente estación. Si la planta no cuenta con la cantidad de reservas suficientes para mantener el crecimiento inicial o no es capaz de reponer las reservas usadas para mantener un nuevo crecimiento inicial en la próxima estación, estará en un alto riesgo de morir o de sucumbir ante la competencia de otros individuos vegetales con suficiente cantidad de reservas (Andrade *et al.*, 2006).

La cosecha sin control alguno por parte de los animales, puede originar una fuerte reducción del área foliar, afectando la posibilidad de la planta de sintetizar sustancias de reserva, alterando también la magnitud de crecimiento y desarrollo de raíces, y la emergencia y expansión de nuevas hojas (Chacon y Stobbs, 1976). La reducción o alteración en el patrón de

acumulación de la biomasa vegetal aérea y subterránea, puede implicar afectaciones directamente del ecosistema, por permitir exceso de penetración de luz, aumento de la temperatura y reducción de la humedad aprovechable del suelo, que son factores que afectan la dinámica de las partes aéreas.

La cosecha excesiva promovida por el sobrepastoreo disminuye el vigor de las plantas y plántulas originadas por semillas, lo que facilita la proliferación y predominancia de especies indeseables, por ser de baja palatabilidad y en ocasiones tóxicas (Nascimento Júnior *et al.*, 1999a).

Con limitantes ambientales para el crecimiento y desarrollo de la vegetación, el impacto negativo del sobrepastoreo puede ser mayor en magnitud y tiempo de permanencia de dicho impacto. Condiciones estresantes como falta de humedad, frío o alta incidencia de radiación solar demanda de la planta una mayor cantidad de reservas para asegurar sobrevivir o superar estos momentos de alto estrés para el crecimiento, desarrollo y supervivencia de las plantas.

2.4 Determinación de la condición de áreas forrajeras por sensores remotos

La evaluación y caracterización de áreas forrajeras por imageneología es algo relativamente nuevo, y se ha encaminado fundamentalmente a praderas compuestas por herbáceas y a un número reducido de especies. Para los agostaderos poco se ha realizado, por presentar una conformación florística muy diversa en cuanto a especies y tipos de plantas: herbáceas, arbóreas, y arbustivas.

La mayor diversidad florística demanda una mayor precisión en la evaluación de áreas forrajeras, por lo que debe recurrirse al uso de modelos a diferentes resoluciones, con el objetivo de observar y dar seguimiento al significado de las variables del paisaje estudiado (Paruelo, 2008). Ningún satélite ha mostrado tener por sí solo las características que lo hagan exclusivamente ideal para la determinación de la condición de un área forrajera, principalmente en regiones secas; el uso combinado de datos

pancromáticos, multiespectrales e hiper-espectrales, parece ser la solución para la detección y monitoreo de procesos de degradación de la forma más temprana posible (Rocchini, 2007).

En la evaluación de la condición de áreas forrajeras se utilizan tres categorías de sensores remotos ópticos: los pancromáticos, multiespectrales e hiper-espectrales. Los pancromáticos tienen una sola banda en el espectro visible, proporcionando un número muy grande de píxeles a los datos por línea, que se traduce en una alta resolución espacial. Por consiguiente, son muy útiles al proporcionar información textural, porque su tamaño de píxel puede ser menor que la heterogeneidad de la superficie.

Semorile *et al.* (2007) validaron el uso de sensores remotos en la determinación del impacto ambiental en la porción semiárida argentina, afirmando que la utilización de la banda pancromática de LANDSAT 7 ETM+ permitió obtener más detalles de la zona en estudio, lo que posibilitó una mejor clasificación de las zonas degradadas.

En la gran mayoría de los estudios que intentan determinar la condición de la vegetación por sensores remotos se usan las bandas multiespectrales, para incorporar datos de bandas espectrales anchas permitiendo una mayor definición del espectro reflejado.

Para Semorile *et al.* (2007), el hecho de que estos sensores proporcionen los datos en bandas múltiples, hace que el número total de píxeles por línea sea menor que el de los sensores pancromáticos. Por consiguiente, la resolución espacial es normalmente más baja para los multiespectrales que para los pancromáticos. A estos sensores les faltan además bandas estrechas en el visible e infrarrojo, región de absorción que requiere modelar el vapor de agua atmosférico y calcular la reflectancia de la superficie aparente. Como resultado, no existe una conversión de datos multiespectrales calibrados a datos de reflectancia con significado físico real.

Por su facilidad de adquisición y mediana a alta resolución espacial, los sensores multiespectrales se han usado para una gran variedad de aplicaciones ecológicas. El uso típico de esta información está en relación

con los índices de vegetación; sin embargo, en los ecosistemas áridos y semiáridos, estas aplicaciones no son eficaces. En general los datos de estos sensores exigen de métodos para calibrar los índices tanto de vegetación como del brillo del suelo. Calderón y Jong (1999), al estimar la biomasa arbórea por medio de imágenes satelitales de LANDSAT 5 en bosque de pino, pino-encino, encino y bosque de niebla en el estado de Chiapas, México, obtuvieron una R^2 de 0.676 cuando contrastaron las bandas infra-rojo cercano e infra-rojo medio, concluyendo que se hace necesaria la interacción entre más bandas y puntos de calibración para una mayor precisión con el uso de sensores remotos multiespectrales.

Para estudios de vegetación que busquen obtener alto grado de precisión espectral, Hall-Beyer *et al.* (2001) sugieren los sensores hiper-espectrales, una vez que proporcionan datos con un número grande de bandas estrechas y contiguas que cubren en su totalidad el espectro reflejado. El número total de píxeles por línea es muy reducido comparado a los sensores pancromáticos o multiespectrales. Como resultado, estos sensores proporcionan datos con poca precisión espacial, pero son de gran utilidad para algunos tipos de análisis fitosociológicos. Vibrans y Schramm (2009), al identificar nuevas áreas forestales en la parte templada del sur de Brasil, concluyeron que con los sensores hiper-espectrales se identificaron nuevas áreas forestales siempre y cuando éstas tuvieran una extensión de al menos dos hectáreas.

Algunos estudios sugieren la interacción entre los tres tipos de sensores para lograr una mejor caracterización de las áreas en estudio. Del Valle *et al.* (2002) y Ares *et al.* (2002) lograron hasta 92% de exactitud en la descripción vegetal de un corredor eólico en la península de Valdez (Chile) y de las características superficiales del suelo en una vegetación arbustiva en Puerto Madryn (Argentina), con el uso de sensores remotos en comparación a métodos directos “in-situ”; para los autores, este resultado se debió al uso de tamaños de píxel menores al de la variabilidad presente en cada uno de estos dos sitios y la interacción entre los tres tipos de sensores.

Utilizando los sensores MERIS MTCI y MODIS, Harris y Dash (2010) evaluaron la tasa fotosintéticamente activa y la correlación con el contenido de carbono en bosques templados de la región Este de los Estados Unidos. Los autores concluyeron que los sensores son buenos indicadores de la tasa fotosintética y contenido de carbono en el ecosistema; sin embargo, se hace necesaria la elaboración de modelos que describan con mayor exactitud los flujos de carbono en todos los estratos del ecosistema. Un problema similar se presenta en evaluaciones de agostaderos, por estar conformados de tres estratos: herbáceo, arbustivo y arbóreo.

Por su escasa disponibilidad de forraje, en agostaderos es de fundamental importancia identificar puntos de endemismo de especies forrajeras o indeseables en el área. Sassan *et al.* (2008) estudiaron agostaderos en la región amazónica y concluyeron que es posible identificar puntos de concentración de especies forrajeras. Sin embargo, para mayor exactitud se requiere mezclar la información obtenida de los satélites con datos climatológicos, principalmente la precipitación pluvial del área. Esto denota la importancia de la interacción de datos satélites con mapas de vegetación, confrontando mapas de vegetación y contenido de agua en suelo para la identificación de áreas de riesgo de incendios forestales. En California, Estados Unidos, Miller *et al.* (2009) concluyeron que la confrontación de mapas aumenta la exactitud de los datos obtenidos.

Una vez identificadas las áreas de endemismo de las especies forrajeras dentro del agostadero, el siguiente paso es estimar la acumulación de fitomasa en estas áreas; este procedimiento por lo general se hace utilizando bandas de reflectancia y el atributo relacionado. Baret y Guyot (1991) estudiaron la correlación entre diferentes bandas de reflectancia y atributos de crecimiento aéreo y concluyeron que la banda infra-rojo cercano proporciona las mejores correlaciones con el índice de área foliar, biomasa de la hojas verdes y actividad fotosintética. Sin embargo, los autores afirman que aún no se tiene un modelo adecuado para estimar atributos de crecimiento aéreo en ecosistemas áridos, dada las particularidades morfológicas y fisiológicas de adaptación de sus especies al estrés hídrico.

Numata *et al.* (2007) caracterizaron posibles cambios en la vegetación en función del pastoreo mediante la relación entre la banda infra roja y roja provenientes del satélite Landsat TM en praderas de *Brachiaria brizantha*, y concluyeron que es posible identificar, con más de 70% de exactitud, cambios en función del pastoreo y de la época del año, siempre y cuando las praderas estuvieran en una buena condición ecológica.

Para evaluaciones de degradación en las porciones más secas del globo, se aconseja la utilización de imágenes en multiescala, o sea, en diferentes tamaños de píxel; tal medida tiene por finalidad aumentar el grado de precisión y así posibilitar la distinción de las especies encontradas en las áreas evaluadas (Rocchini, 2007). Con base en lo expuesto, es fundamental que en la elección de satélites se presenten sensores que se adapten a la necesidad de investigación: producción de biomasa, degradación, endemismo de especies, cosa que para áreas forrajeras no es fácil. Novo y Moraes (2003) consideran que con el lanzamiento de LANDSAT en 1972, la utilización de este satélite por sí solo sería suficiente para evaluaciones de áreas forrajeras, dada la gran capacidad y flexibilidad de sus sensores. Las imágenes de este satélite fueron suficientes para dar una visión general de la diversidad y potencial forrajero de grandes áreas, pero con poca precisión en áreas con poca superficie.

Cohen (1991) propone, como forma auxiliar de ayuda en la interpretación de atributos relacionados con el crecimiento aéreo en ambientes áridos, a la determinación del contenido de humedad en suelo o de la biomasa muerta. Esta información es obtenida en función de las reflectancias de la banda infra-rojo medio.

En este sentido, Yilmaz *et al.* (2008) proponen un modelo de estimación del contenido de agua en suelo en cultivos forrajeros; los autores obtuvieron 94% de exactitud cuando compararon la medida *in-situ* con el valor obtenido por los satélites.

Para mejorar la exactitud de los datos proporcionados por los sensores en estudios en ambientes áridos, es importante obtener de los sensores

imágenes con la mayor calidad posible. Epiphaneo *et al.* (1996) estudiaron la variación en la calidad de las imágenes en función de la hora tomada y afirman que el horario al cual fue tomada la imagen por el satélite es una fuente significativa de variación en la evaluación de cobertura vegetal, siendo necesario para evaluaciones de una misma área seleccionar imágenes que fueran tomadas en la misma hora del día. Esto es fácilmente conseguido cuando se hace uso de un mismo satélite en toda la evaluación, tomando en cuenta que los satélites siempre pasan a la misma hora en un punto de la superficie de la Tierra.

En la actualidad los satélites más utilizados para la evaluación de áreas forrajeras son: LandSat 5 TM, AVHRR, MODIS, SPOT y NAPP, pero ninguno por sí solo es capaz de ofrecer datos precisos del estado real del ecosistema, siendo necesario combinar los datos de estos satélites para obtener valores más cercanos del estado actual de un pastizal con la mayor precisión y exactitud (Paruelo, 2008).

2.5 Matorral xerófilo

Galindo (2009) indica que el matorral xerófilo es un tipo de vegetación de extensa distribución en México, alcanza a cubrir 29% de la superficie del país, lo que corresponde a 41,279,457 hectáreas, ocupando zonas áridas, semiáridas y de desierto, desde el nivel del mar como es el caso del Matorral de la Baja California, hasta los 2,500 msnm en el Estado de México. El matorral xerófilo es un tipo de vegetación que se desarrolla en los grupos climáticos BW y BS, con temperaturas medias anuales de 12 a 20 °C, precipitación anual menor a 600 mm concentrada en la estación cálida del año y con no menos de siete meses de déficit hídrico al año (García, 1988). La vegetación de matorral xerófilo se asocia con suelos caracterizados por pobre capacidad de retener humedad por pendiente o pedregosidad, en zonas de muy escasa precipitación puede encontrarse sobre aluviales, y también prospera en suelos de origen volcánico y formados de roca sedimentaria (caliza o riolita) (Rzedowski, 1991).

Los componentes botánicos de los que se conforma el matorral xerófilo son cactus, cardones, cenizos, cirios, estafiates, garambullos, gobernadoras, magueyes, ocotillos y sahuaros, y se denomina matorral ya que la mayoría de estos componentes no logran una altura mayor a 10 m (Rzedowski, 1991). La fauna común en el matorral xerófilo se conforma de berrendo, borrego cimarrón, codorniz escamosa, conejo matorralero, halcón, lechuza, liebre de cola larga, monstruo de gila, rata canguro, serpientes y zorra norteña, entre otras especies animales (Rzedowski, 1991).

Vega-López (2008) resalta que el matorral xerófilo es un ecosistema importante en la ganadería mexicana, ya que de esta vegetación se origina una proporción de los becerros exportados a EUA o enviados a centros de engorda del norte de México. CONABIO (2006) señala al matorral xerófilo como un tipo de vegetación que juega un papel fundamental en la captura de carbono, considerándolo como el más importante en este aspecto de todos los ecosistemas terrestres de la porción árida de México.

Ordóñez (2004) estima que hasta 76% de la superficie ocupada por matorral xerófilo muestra de moderados a severos grados de degradación a partir de la desaparición de especies típicas de esta vegetación, así como por el escaso crecimiento y desarrollo de los individuos presentes en comparación al potencial de los mismos. Arriaga *et al.* (2005) afirman que el deterioro que sufre el matorral xerófilo proviene de impactos directos e indirectos de la expansión agrícola, de la urbanización y por la aplicación y mantenimiento de prácticas ganaderas que atentan contra la resiliencia de la vegetación en su conjunto. El ataque directo a componentes del matorral xerófilo por extracción desmedida para la venta, como para permitir la substitución por otras especies, es otro factor a considerar entre los que han promovido el deterioro de este tipo de vegetación. Ordóñez (2004) estima que este ataque directo o deforestación puede afectar anualmente entre 1 a 10% de la superficie cubierta del matorral xerófilo.

La conservación, mantenimiento y rehabilitación del matorral xerófilo es de importancia nacional por su apoyo a la ganadería, captura de carbono y ser un banco genético vegetal desarrollado en un ambiente agresivo y hostil

para el crecimiento vegetal. El seguimiento de la condición del matorral xerófilo es un primer componente en la conformación e implementación de cualquier estrategia de manejo de este recurso natural y es en este aspecto la importancia de poder validar el seguimiento a través de sensores remotos.

3 LITERATURA CITADA

- Aguiar A., P. A. 2002. Técnicas de medição da produção da pastagem para planejamento alimentar nos períodos de baixa e alta produção de forragem. *In: Encontro Terra Nova de Pecuária*. 12 al 15 de marzo. Mato Grosso, Brasil. pp: 12-31.
- Almeida, L. J., L. Oliveira, G., e C. Bezerra. 1990. Uso atual da terra com ênfase aos aspectos fitofisionômicos da região nordeste do Estado do Mato Grosso. *In: Memória de Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. 05 al 10 de abril. Mato Grosso, Brasil. pp: 341-349.
- Almeida, T. C. 1993. Geografia, novos desafios e metas. *In: Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. 13 al 18 de agosto. Belo Horizonte, Minas Gerais. Brasil. pp: 555-589.
- Andrade, P. A., E. Souza, S., S. Silva, e D. Silva. 2006. Produção animal no bioma caatinga: paradigmas dos “pulsos-reservas”. *In: 43 Annual Meeting of the Brazilian Society of Zootecnia*. 22 al 26 de noviembre. Joao Pessoa, Paraiba, Brasil. pp: 138 - 152.
- Ares, J., M., B. Bertiller, and A. Bisigato. 2002. Estimates of dryland degradation with Fourier signatures in low-altitude monochromatic images with high spatial resolution. *Landscape Ecology* 32: 86-98.
- Arriaga, L., E. Moreno, and C. Aguilar. 2005. An overview of the floristic richness and conservation of the arid regions of northern Mexico. *In: Connecting Mountain Islands and Desert Seas: Biodiversity and Management of the Madrean Archipelago* (ed). 1 y 2 de noviembre. Ciudad de México, México. pp: 171-175.
- Baret, F., and G. Guyot. 1991. Potential and limits of vegetation indices for LA1 and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment* 35: 161-173.
- Calderón J., E., y B. de Jong. 1999. Evaluación de dos métodos para la estimación de biomasa arbórea a través de datos LANDSAT TM en Jusnajib La Laguna, Chiapas, México: estudio de caso. *Investigaciones Geográficas* 40: 71-84.
- Carnevalli R., e A. S. C. Silva. 1999. Validação de técnicas experimentais para avaliação de características agronômicas e ecológicas de pastagens de *Cynodon dactylon* cv. ‘coastcross-1’. *Scientia Agriculture* 56: 489-499.
- Carvalho, M., M. 1998. Recuperação de pastagens degradadas em áreas de relevo acidentado. *In: Simpósio de recuperação de áreas degradadas*. 03 al 07 de julio. Viçosa, Minas Gerais. Brasil. pp: 149-162.
- Carvalho, R. C., R. Rocha, A. A. Valeriano A, R. Medeiros, and T. Pinto. 2008. Methods for determining the availability of forage. *Ciência et Praxis* 1: 23-31.
- Carvalho, V., M., e S. Guaycuru de. 2003. Sensoriamento Remoto e o Ensino da Geodesia. (Ed). Rio de Janeiro, Brasil. 78 p.

- Chacon, E., and T. H. Stobbs. 1976. Influence of progressive defoliation of a grass sward on the eating behaviour of cattle. *Australian Journal of Agriculture* 27: 709-727.
- Chuvieco, E. 1996. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ediciones Rialp. Madrid, España. 568 p.
- Cohen, W., B. 1991. Response of vegetation indices to changes in three measures of leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57: 195-202.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2006. *Capital Natural y Bienestar Social*. Redacta, S.A. de C.V. México. 25 p.
- Crosta, A., P. 1993. *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Revista Campinas. Brasil. 402 p.
- Del Valle H., F., C. M. Rostagno, y G. E. Defossé. 2002. Monitoreo satelital de la degradación del suelo superficial y los procesos de regeneración de la vegetación en áreas incendiadas del noreste del Chubut (1984-2002). *In: XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. 16 al 19 de abril. Puerto Madryn, Chubut, Argentina. pp: 83-89.
- Epiphaneo, J. J. Gleriane, e A. Farmaggio. 1996. Índice de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 31: 445-454.
- Florenzano, T., G. 2002. *Imagens de Satélite para Estudos Ambientais*. Oficina de Textos. São Paulo, Brasil. 183 p.
- Galindo, L., M. 2009. *La economía del cambio climático en México*. SEMARNAT-SHCP. México. 23 p.
- García E. 1988. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F. 220 p.
- Hall-Beyer, M., and Q. H. J. Gwyn. 2001. Integrating satellite images and species-based vegetation maps to manage native grasslands. *Remote Sensing of Environment* 84: 625-639.
- Harris, A., and J. Dash. 2010. The potential of the MERIS terrestrial chlorophyll index for carbon flux estimation. *Remote Sensing of Environment* 114: 1856-1862.
- Hodgson, J., C. Matthew, and C. Harrington. 2000. *Pasture Measurement: Pasture and Crop science*. New Zealand Companies. New Zealand. 312 p.
- INEGI (Instituto Nacional de Información y Estadística). 2008. *Carta de uso actual del suelo y vegetación Serie II*. México.
- Laca, E., A., and G. Lemaire. 2000. Measuring Sward Structure. *In: t'Mannetje, L., and R. M. Jones, eds. Field and Laboratory Methods for Grassland and Animal Production Research*. Wallingford. (ed). CABI Publishing. United States. pp: 103-121.

- Macedo, M., C., M., e A. Zimmer. 1993. Sistema pasto-lavoura e seus efeitos na produtividade agropecuária. *In*: Memória do Simpósio Sobre Ecossistemas de Pastagens. 09 al 11 de marzo. Minas Gerais, Brasil. pp: 216-245.
- Macedo, M., C. M. 1999. Degradação de pastagens: conceitos e métodos de recuperação *In*: "Simpósio de Sustentabilidade da Pecuária de Leite no Brasil". 04 al 07 de agosto. Mato Grosso do Sul, Brasil. pp: 137-150.
- Machado, L., A., Z. 1999. Manejo de Pastagem Nativa. Guaíba. Agropecuária. 156 p.
- Maia, F., O., A. e L. C. Padua T. 2009. Uso do sensoriamento remoto como recurso didático para estudos do espaço geográfico: sistemática revisão de literatura. <http://www.inpe.br>. Consultada el 19 de junio de 2010.
- Mather, P., M. 1999. Computer Processing of Remotely-sensed Images: an Introduction. John Wiley & Sons. Great Britain. 210 p.
- Miller, J., E. E. Knapp, and. C. H. Key. 2009. Calibration and validation of the relative differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) to three measures of fire severity in the Sierra Nevada and Klamath Mountains, California, USA. *Remote Sensing of Environment* 113: 645-656.
- Nascimento Júnior, D., D. Queiroz, e M. Santos. 1999a. Degradação das pastagens e critérios para avaliação. *In*: Simpósio Sobre Manejo de Pastagem. 01 al 04 de noviembre. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. pp: 325-333.
- Nascimento Júnior, D., R. L. J. Oliveira e M. Diogo. 1999b. Manejo de Pastagens. Sistemática revisão de literatura. http://www.tdnet.com.br/domicio/MANEJO_DE_PASTAGENS.HTM. Consultada en 22 de junio de 2010.
- Novo, E., e M. L. de Moraes. 2003. Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações. (ed). Edgard Blücher. Brasil. 308 p.
- Numata, I., I. A. Roberts and O. Chadwick. 2007. Characterization of pasture biophysical properties and the impact of grazing intensity using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 109: 314–327.
- Ordóñez J., A. 2004. Índices de Contenido y Captura de Carbono en Áreas Forestales. UNAM. México. 78 p.
- Ortiz-Solorio, M., G. Anaya, y M. Estrada. 1994. Evaluación Cartográfica y Políticas de la Degradación de la Tierra. CONAZA – Universidad Autónoma Chapingo. México. 133 p.
- Paruelo, J. M. 2000. Evaluation in rangelands from remote sensing data. *Applied Vegetation Science* 3: 189-195.
- Paruelo, J. M. 2008. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. *Applied Vegetation Science* 18: 212-293.
- Rocchini, D. 2007. Effects of spatial and spectral resolution in estimating ecosystem α -diversity by satellite imagery. *Remote Sensing of Environment* 89: 76-82.

- Russel, G. 1989. Absorption of radiation by canopies and stand growth: Plant canopies: their growth, form and function . Cambridge, England. 39 p.
- Rzedowski, J. 1991. Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México, *Acta Botánica Mexicana* 14: 21-37.
- Sassan, S., W. Buermann, and H. Ter Steege. 2008. Modeling distribution of Amazonian tree species and diversity using remote sensing measurements. *Remote Sensing of Environment* 112: 2000–2017.
- Semorile, Z. 2007. Estudio de impacto ambiental en base a teledetección y sistema de información geográfica. Un estudio de caso. *In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Belo Horizonte, Brasil: pp: 555-589.
- Stoddart, L. and A. Smith. 1975. Range Management. McGraw-Hill Book, United States. 431 p.
- T'Mannetje, L. 2000. Measuring Biomass of Grassland: Field and Laboratory Methods for Grassland and Animal Production Research. CAB Internacional. United States. 77 p.
- Trejo, I., y J. Hernández 1996. Identificación de la selva baja caducifolia en el estado de Morelos, México, mediante imágenes de satélite. *Investigaciones Geográficas* 32: 67-76.
- Vega-López, E. 2008. Valor Económico Potencial de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México como Sumideros de Carbono. The Nature Conservancy-México. México. 104 p.
- Vibrans, A., C., e V. F. Schramm. 2009. Perfil temporal de EVI/NDVI na bacia hidrográfica do rio Itajaí em Santa Catarina. *In: Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. 25 al 30 de abril. Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. pp: 1581-1588.
- Yilmaz, M., T. Raymond Hunt, and E. Jackson. 2008. Remote sensing of vegetation water content from equivalent water thickness using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment* 112: 2514-2522.

4 ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL FORRAJERO DEL MATORRAL XERÓFILO POR FOTOGRAFÍA DIGITAL Y REFLECTANCIA

4.1 Resumen

El objetivo de este estudio fue validar la utilización de fotografía digital (FD) y reflectancia para estimar la cantidad de forraje presente en un matorral xerófilo. Los datos provinieron de dos sitios, cada uno con 54 estaciones de muestreo y cinco momentos: tres y dos para las épocas seca y de lluvias, respectivamente. Las fotografías digitales y lecturas de reflectancia cubrieron una superficie circular de 1.6 m de diámetro; en cada estación se tomó una FD y tres lecturas de reflectancia, ambas mediciones ópticas se hicieron en forma simultánea a una altura de 3.2 m del nivel del suelo. Obtenidas las mediciones ópticas, se cosechó el material considerado con valor forrajero presente dentro de la superficie de la estación; para el estrato herbáceo la cosecha fue a ras del suelo y las hojas de las arbustivas fueron las localizadas en los primeros 1.50 m de altura desde el nivel del suelo, el material cosechado fue pesado en verde y seco. Para cada componente de cobertura se determinó el porcentaje de la superficie de foto que ocupó y con las lecturas de reflectancia se calculó el índice verde. Los datos de fotos se analizaron por componentes principales y por regresión lineal simple, el índice verde como estimador de la cantidad de forraje presente. Las coberturas por vegetación verde y seca, y por rocas fueron los componentes que explicaron mayormente la variación en la cantidad de forraje presente. El índice verde fue un mal estimador de la cantidad de forraje presente. Se concluyó que la fotografía digital y reflectancia no fueron buenos estimadores del forraje presente en matorral xerófilo y son sensibles al sitio y época del año, por lo que se debe mejorar esta forma de utilización de medios ópticos.

Palabras claves: Medios ópticos, imageneología, radiómetro, semiárido.

4.2 Abstract

ESTIMATION OF FORAGE POTENTIAL OF DRY SCRUBLAND BY DIGITAL PHOTOGRAPHY AND REFLECTANCE

The objective of the study was to validate the use of digital photography (DP) and reflectance to estimate the amount of forage present in dry scrubland. Field data came from two sites each with 54 sampling stations and five times: three and two for the dry and rainy seasons, respectively. At each station one DP and three reflectance readings were obtained from a circular area of 1.6 m in diameter. Both optical measurements were made simultaneously at a height of 3.2 m above ground level. Once optical measurements were taken, material considered of forage value present within the area of the station was harvested, herbaceous cover was cut to ground level and all leaves from shrubs that were within the first 1.50 m from ground level were located. The harvested material was weighed green and dry. The percentage of the surface of the DP occupied by each component was determined and a green index was calculated from reflectance readings. DP data were analyzed by principal components and the fitness of green index as an estimator of the amount of forage present by simple linear regression. The proportions of green and dead vegetations and of rocks were the components that explained the variation in the amount of forage present. The green index was a poor estimator of the amount of forage present. It was concluded that digital photography and reflectance are not good estimators of the amount of forage in dry scrubland as both were sensitive to site and season. Consequently, improvements should be made to these optical techniques before they are used for the purpose contemplated in this study.

Keywords: Optical techniques, radiometer, imaging, semiarid.

4.3 Introducción

La determinación de la cantidad de forraje presente en agostaderos donde pastorean animales es importante en la investigación científica, y como parte esencial del proceso de elaboración de planes para el aprovechamiento sostenible y pertinente de los agostaderos.

La cantidad de forraje presente es un componente determinante del potencial forrajero de un agostadero y puede medirse por métodos directos, que implican la cosecha y remoción del material vegetal ubicado dentro de una superficie delimitada de muestreo. Estos métodos directos son precisos y confiables; sin embargo, de un costo muy elevado y en ocasiones demandan mucho tiempo para generar la información requerida (Hodgson *et al.*, 2000).

Ante las limitaciones de los métodos directos para la determinación de la cantidad de forraje presente en agostaderos de extensiones amplias y con distribución heterogénea de los componentes botánicos, se han propuesto métodos indirectos, como los que hacen uso de medios ópticos (Almeida *et al.*, 1990).

La aplicación de equipos ópticos para determinar la cantidad de forraje presente, exige que se defina el tipo de cámara digital o radiómetro para determinar el patrón de reflectancia; además de procesos de calibración que permitan relacionar cuantitativamente y con alta precisión las características captadas por medios ópticos y aquéllas de interés, como la cantidad de forraje (Crosta, 1993).

El uso de sensores remotos ha sido ampliamente estudiado para áreas con vegetaciones que muestran una cubierta o dosel continuo y homogéneo, como es el caso de praderas y agostaderos con dominancia de una cubierta de gramíneas de porte bajo a mediano y nula presencia de arbustivas y arbóreas (Russel, 1989; Almeida *et al.*, 1990; Trejo y Hernández, 1996). Sin embargo, poco se ha investigado para validar estos sensores en agostaderos con cobertura vegetal de gran diversidad florística, que incluye especies crasas y otras no consumidas por el ganado y de manera

intermitente la presencia de áreas de suelo desnudo (sin vegetación) o con presencia de piedras (Ares *et al.*, 2002).

La vegetación de matorral xerófilo está distribuida extensamente en varias zonas áridas y semiáridas de México, llegando a ocupar 29% del país (Galindo, 2009). Además de la superficie ocupada, la vegetación de matorral xerófilo es una fuente importante de forraje para los bovinos dedicados a la producción de becerros al destete para exportación y para abastecer los corrales de engorda nacionales (Vega-López, 2008).

El objetivo del presente estudio fue validar el uso de imágenes digitales y patrones de reflectancia para estimar el potencial forrajero de una vegetación de matorral xerófilo, mediante la determinación de las coberturas y cantidad de forraje presente.

4.4 Materiales y métodos

4.4.1 Sitios, parcelas y estaciones de muestreo

La colecta de datos de campo (agosto de 2009 a octubre de 2010) se hizo en dos sitios ubicados en el estado de Querétaro, uno en San Juan del Río (20° 30' 36"N; 99° 42' 55" W) y el otro en Cadereyta del Monte (20° 52' 00"N; 99° 52' 56" W). Una caracterización climática, edáfica y de vegetación de los sitios se muestra en el Cuadro 1.

Cada sitio (SM) consistió de un cuadrado de 1500 m por lado, para dar una superficie de 225 ha. Dentro de cada SM se ubicaron nueve parcelas de muestreo (PM), cada una de 1 ha (cuadrado de 100 m por lado). Para ubicar las PM's se trazaron dos transectos perpendiculares entre sí y partiendo del punto medio de cada lado del SM; en el entrecruce de estos transectos al centro del SM se ubicó la primera PM y a partir de ella, sobre los transectos referidos se ubicaron las otras PM's, equidistantes a 200 m. El arreglo de cada SM y sus PM's se muestra en la Figura 3.

Dentro de cada PM se ubicaron seis estaciones de muestreo (EM), en éstas se tomaron las mediciones ópticas, cada EM fue un círculo de 1.6 m de diámetro. Para la ubicación de las EM en cada PM se siguió el mismo

procedimiento que para las PM's en cada SM, con distancia de 25 m entre EM's contiguas.

Cuadro 1. Caracterización climática, edáfica y de vegetación en los sitios de colecta de datos de campo.

Variable	Sitio	
	San Juan del Río	Cadereyta del Monte
Grupo climático	BShw	BShw
Temperatura mínima promedio, °C	10	26
Temperatura máxima promedio, °C	12	28
Precipitación pluvial promedio anual, mm	550	450
Altitud, m	2250	1985
Tipo de suelo	Rendizina con afloramientos de rocas	Rendizina con afloramientos de rocas
Clasificación de la vegetación	Dominancia de herbáceas y baja densidad arbustos	Dominancia de arbustos y baja densidad de herbáceas

Fuente: García (1988); Rzedowski(1991).

4.4.2 Mediciones ópticas y destructivas

Las mediciones ópticas y destructivas solamente se realizaron en las EM's. Las mediciones ópticas fueron fotografía digital (Apéndices 1 a 4) y lecturas de reflectancia; mientras que las destructivas fueron la cosecha del estrato herbáceo y remoción de las hojas de arbustivas.

Las fotos digitales fueran obtenidas con una cámara fotográfica SONY modelo LENS con 7.2 Megapíxeles de resolución. Las lecturas de reflectancia se tomaron con un radiómetro multiespectral, marca CROPSCANMR, Modelo MSR5R (Multi Spectral Radiometer) de 5 bandas

espectrales (0.450 – 0.520, 0.520 – 0.600, 0.630 – 0.690, 0.760 – 0.900 y 1.55 – 1.75 nm). De las 5 bandas captadas por el radiómetro solamente dos (0.630 – 0.690, 0.760 – 0.900) fueron utilizadas para cálculos posteriores. Este modelo de radiómetro fue diseñado para estudios en campo que busquen medir actividades biológicas en vegetales, dado el ancho de ondas espectrales captados y la facilidad de locomoción en campo.

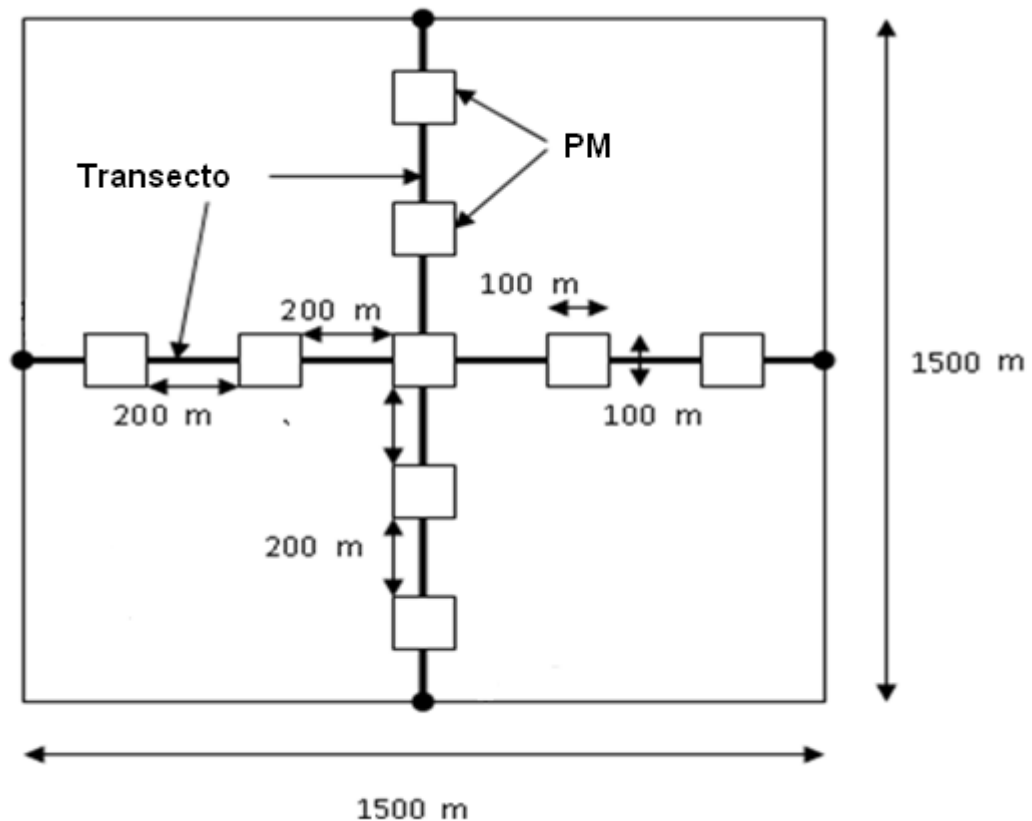


Figura 3. Arreglo de un sitio de muestreo (SM) de 1500 m por lado, con dos transectos y nueve parcelas de monitoreo (PM) de 100 m por lado.

Las mediciones ópticas se tomaron a 3.2 m con respecto del nivel del suelo, con la ayuda de una extensión de aluminio sobre la que se montó la cámara y el radiómetro (Figura 4). Por cada EM, se tomó una foto digital y tres lecturas de reflectancia. Las mediciones ópticas se realizaron entre las 8:00 y 10:30 horas; aproximadamente el tiempo para la toma de las mediciones ópticas por EM fue de 30 segundos.

Una vez realizadas las mediciones ópticas se procedió a las destructivas que fueron la cosecha de las biomásas forrajeras presentes dentro de la EM, para la biomasa de herbáceas se cortó a ras del suelo, y para la de árboles y

arbustos sólo se cosecharon la hojas presentes desde el nivel del suelo hasta 1.50 m de alto, considerando esta altura como la máxima para el ramoneo. El pesaje del material cosechado fue en verde y luego de secado en estufa de aire forzado a 60 °C hasta peso constante; estos pesos fueron usados para determinar la cantidad de forraje presente en base verde y seca, respectivamente.



Figura 4. Mediciones ópticas (A) y (B) foto digital y lectura de reflectancia; y (C) cosecha dentro de una estación de muestreo.

El radiómetro fue programado para las condiciones locales de cada EM, para la obtención de los ángulos cenitales de iluminación y horas GMT. Las fechas en que se realizaron las mediciones ópticas y destructivas se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Fechas de colecta de datos de campo en los dos sitios de muestreo

Fecha	Observaciones del crecimiento del forraje*
16/07/ 2009	Época de mayor crecimiento de forraje
03/09/ 2009	Época de disminución de crecimiento de forraje
23/01/2010	Época de nulo crecimiento
11/05/2010	Época de inicio de crecimiento de forraje
22/07/2010	Época de mayor crecimiento de forraje

* Considerando la experiencia de personas de la localidad.

Considerando la experiencia de personas de la localidad, las fechas de colecta de datos fueron divididas en dos épocas: seca (03/09/2009, 23/01/2010 y 11/05/2010) y lluvias (16/07/2009 y 22/07/2010).

4.4.3 Procesamiento de la información óptica

Las fotografías digitales fueron procesadas mediante el programa ENVI versión 4.3, para cuantificar el área de foto ocupada por cada componente de cobertura. Los componentes de cobertura identificados fueron: vegetación verde, vegetación seca, inflorescencia, suelo desnudo, suelo sombreado, rocas, fondos de imagen y otros. Las coberturas de interés fueron definidas de acuerdo con la metodología propuesta por SIMTOG (2010).

Las lecturas del radiómetro fueron descargadas a una computadora a través del programa específico del mismo equipo y convertidas de voltaje a reflectancia. Con los datos transformados se calculó un índice verde base iso-suelo o IVIS (Paz *et al.*, 2009):

$$IVIS = -\ln\left(\frac{dIRC\infty - dIRC}{dIRC\infty - dIRC_s}\right)$$
$$dIRC\infty = IRC\infty - (a_s + b_s R\infty)$$
$$dIRC_s = IRC_s - (a_s + b_s R_s)$$

Donde,

R = banda rojo (0.630 a 0.690 nm),

IRC = banda infra rojo cercano (0.760 a 0.900 nm), y

a_s y b_s son constantes calculadas de la línea del suelo.

4.4.4 Manejo y análisis estadístico de los datos

El análisis estadístico fue por componentes principales (Jongmann *et al.*, 1995), en donde la variable de respuesta fue la cantidad de forraje presente y los componentes fueron los porcentajes de cobertura generados de las fotos digitales. Se realizaron análisis independientes para cada época (seca y lluvias) y sitio (San Juan del Río y Cadereyta). Programa estadístico????

Aplicando análisis de regresión lineal simple, se desarrollaron ecuaciones para relacionar cuantitativamente el IVIS con la cantidad de forraje presente. Se realizaron análisis independientes de regresión para cantidad de forraje

verde y seco, total y por componente: herbáceo y arbustivo para las épocas seca y de lluvias, y para cada sitio (San Juan del Río y Cadereyta).

El criterio de evaluación utilizado para determinar la cercanía de la estimación de forraje presente mediante el valor de IVIS fue el coeficiente de determinación (r^2) (Weisberg, 1985).

4.5 Resultados y discusión

4.5.1 Componentes de cobertura del dosel descritos por fotografía digital asociados a la cantidad de forraje presente

A partir de tres de los componentes de cobertura descritos por fotografía digital, para el sitio de San Juan del Río se alcanzó explicar 91.8 y 97.1% de la variación en la cantidad de forraje presente en las épocas seca y de lluvias, respectivamente. Sin embargo, estos tres componentes no fueron los mismos para las dos épocas mencionadas (Figuras 5 y 6); para la época seca los componentes fueron la vegetación verde y seca, y las rocas, y para la de lluvias la vegetación verde, el suelo desnudo y las rocas.

En ambas épocas y considerando los tres componentes en conjunto, el componente vegetación verde aportó la mayor capacidad de explicar la variación en la cantidad de forraje presente; en una forma positiva, a mayor vegetación verde mayor cantidad de forraje presente. Sin embargo, la fuente de vegetación verde fue distinta para cada época. En la seca, las hojas de arbustivas era lo único con color verde; mientras que en lluvias, a las hojas de las arbustivas se sumó el estrato herbáceo.

Las arbustivas fueron predominantemente de los géneros *Prosopis* y *Acacia*. El componente arbustivo ofreció tejido verde por un período más largo en el año que el herbáceo, enfatizando la importancia que se le debe dar a este componente en el proceso de mejorar y aumentar la capacidad forrajera en ambientes áridos y semiáridos.

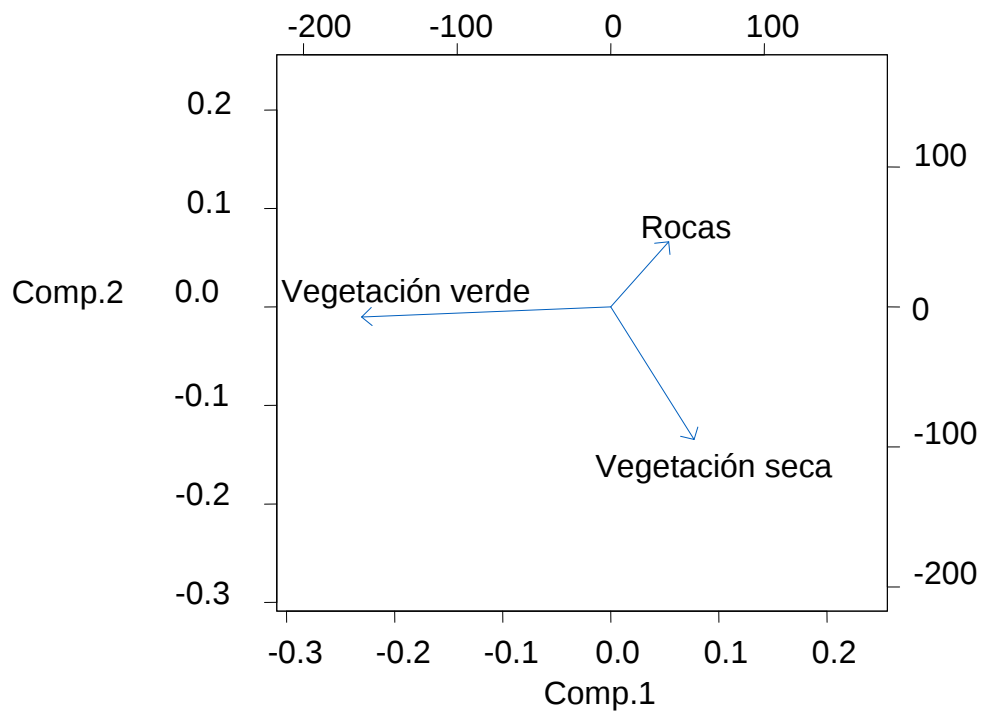


Figura 5. Componentes principales para cobertura aérea en la estación seca del sitio San Juan del Río.

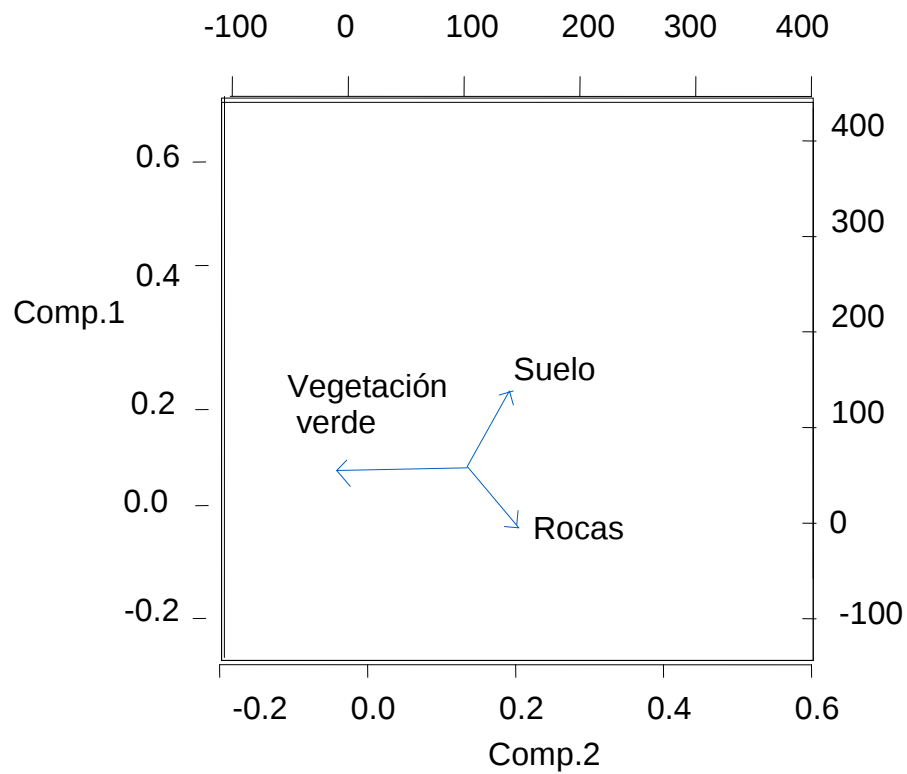


Figura 6. Componentes principales para cobertura aérea en la estación de lluvia del sitio San Juan del Río.

Newton y Goodin (1989) señalan a la capacidad de algunas arbustivas en variar el potencial hídrico de sus hojas como uno de los mecanismos para mantenerlas verdes, aún en los momentos más secos del año y que esta capacidad está asociada a la síntesis de compuestos, que en algunos casos pueden ser tóxicos al ganado u otros posibles comensales (Denogean *et al.* 2006), limitando en estos casos el potencial forrajero de dichas arbustivas. Las arbustivas pueden mantener sus hojas verdes aún durante la época seca, debido a las características morfológicas de su sistema radical y tejido leñoso, que permiten un alto almacén de reservas (Andrade *et al.*, 2006).

La importancia de la vegetación verde proveniente del estrato herbáceo en explicar la variación de la cantidad de forraje presente en la época de lluvias era de esperarse, y al respecto, Goldberg y Novoplansky (1997) mencionan que la densidad de los individuos herbáceos y en particular de gramíneas, se vuelve el factor prioritario en determinar la cantidad de forraje presente en el agostadero. La tendencia general de fomentar en los agostaderos la cubierta por estrato herbáceo, particularmente gramíneas, puede ser una condición para aumentar el rendimiento total de forraje, pero no necesariamente para mantener por la mayor parte posible del año una cobertura verde; las herbáceas aun cuando clasificadas como perennes, el período del año en que se mantienen verdes es más corto que el de las hojas en arbustivas (Araújo Filho *et al.*, 2000).

La cobertura por rocas, al igual que vegetación verde, fue un componente de cobertura que en ambas épocas contribuyó de manera importante a explicar la variación en la cantidad de forraje presente, pero de forma negativa, a mayor cobertura por rocas menor cantidad de forraje presente. La presencia de rocas en la superficie del agostadero limita el espacio donde pudiesen crecer individuos vegetales, además de que la roca es un elemento del suelo con pobre intemperización sin capacidad de retener humedad y proveer de una solución del suelo (Larcher, 2000), por lo que no es un sustrato que pueda formar un ambiente edáfico propicio al crecimiento vegetal y con ello apuntalar el potencial forrajero del agostadero. Además, el afloramiento de rocas es considerado como indicador de degradación del agostadero, debido

a que este afloramiento proviene de un proceso de erosión que es la pérdida de capas de suelo por arrastre del viento y agua, siendo este arrastre posible por no contar el suelo con la protección que le brinda la cobertura por vegetación (NRC, 1994).

Las situaciones relacionadas al afloramiento de roca: nula retención de humedad, formación de solución y erosión del suelo, implican una importante reducción en la fertilidad del suelo y con ello la capacidad del lugar para fomentar la producción vegetal y así el potencial forrajero. También, la actuación de procesos de erosión reduce el banco de semillas y así reduce o anula la posibilidad del crecimiento de nuevos individuos vegetales en la época húmeda. Reducir la erosión y fomentar la formación de suelo son opciones de manejo que reviertan la presencia de roca y son factores para incrementar el potencial forrajero del agostadero (Wester *et al.*, 2003).

La vegetación seca y el suelo desnudo fueron el tercer componente para las épocas seca y de lluvias, respectivamente. La vegetación seca fue conformada de herbáceas cuya parte aérea se encontraba muerta.

La cantidad de forraje presente puede ser explicada por la vegetación seca, dado que fue la expresión de crecimiento vegetal. Para la época de lluvias, el suelo desnudo fue un componente de relación negativa con la cantidad de forraje presente; esta influencia negativa se asocia a lo explicado para la cobertura con rocas en cuanto que representa una porción de la superficie del agostadero que no presenta la posibilidad de crecer vegetación, son áreas despobladas de individuos vegetales.

En el sitio de Cadereyta la extensión de explicación de la variación en la cantidad de forraje presente fue ligeramente mayor a la obtenida en el sitio San Juan del Río en ambas épocas, con 98 y 99% para las épocas de seca y de lluvias, respectivamente. Este nivel de explicación se logró también con tres componentes, que fueron: vegetación seca, suelo sombreado y rocas para la época seca, y para la de lluvias vegetación verde, seca y rocas (Figuras 7 y 8).

La presencia de rocas fue para los dos sitios y épocas un factor de cobertura que se asoció con la posibilidad de cantidad de forraje, enfatizando lo ya mencionado en el sentido de que la formación de suelo y reducción en los agentes erosivos, deben ser considerados como un nodo crucial en el mejoramiento del agostadero como productor de forraje.

Para el sitio de Cadereyta la vegetación seca fue importante en ambas épocas y no en San Juan del Río, esta situación divergente podría ser reflejo de que en Cadereyta la densidad de arbustivas fue menor que en San Juan del Río y por tanto aun cuando son un componente importante de vegetación no fueron determinantes, quedando el estrato herbáceo en calidad de vegetación seca como el elemento de mayor importancia en el proceso de explicar cambios en la cantidad de forraje presente. Esta situación se reafirma en la época de lluvias, cuando la vegetación verde que fue compuesta por estrato herbáceo en crecimiento, como el componente principal para explicar la variación en la cantidad de forraje presente.

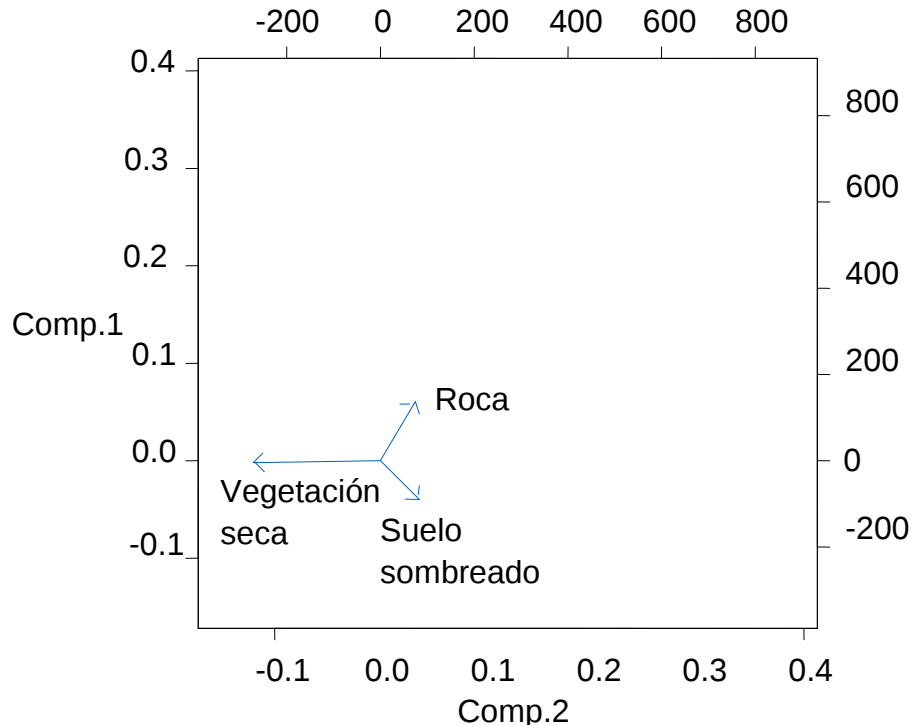


Figura 7. Componentes principales para cobertura aérea en la estación seca del sitio Cadereyta.

El suelo sombreado pudo provenir de sombra por arbustos, micro-relieve o rocas, pero cualesquiera de estas razones su relación negativa con cantidad de forraje presente proviene del hecho de que es una superficie que no cuenta con vegetación y por tanto está sujeta a sombreado por otros accidentes biológicos o físicos.

El sitio Cadereyta presenta 25% menor precipitación anual y largo del período de lluvias que San Juan del Río (CEA, 2010), esta condición de menor humedad implica una vegetación con menor densidad en los estratos arbustivo y herbáceo, y posiblemente esta menor densidad implicó que los componentes con mayor posibilidad de explicación del cambio en la cantidad de forraje presente no fueran los mismos para ambos sitios.

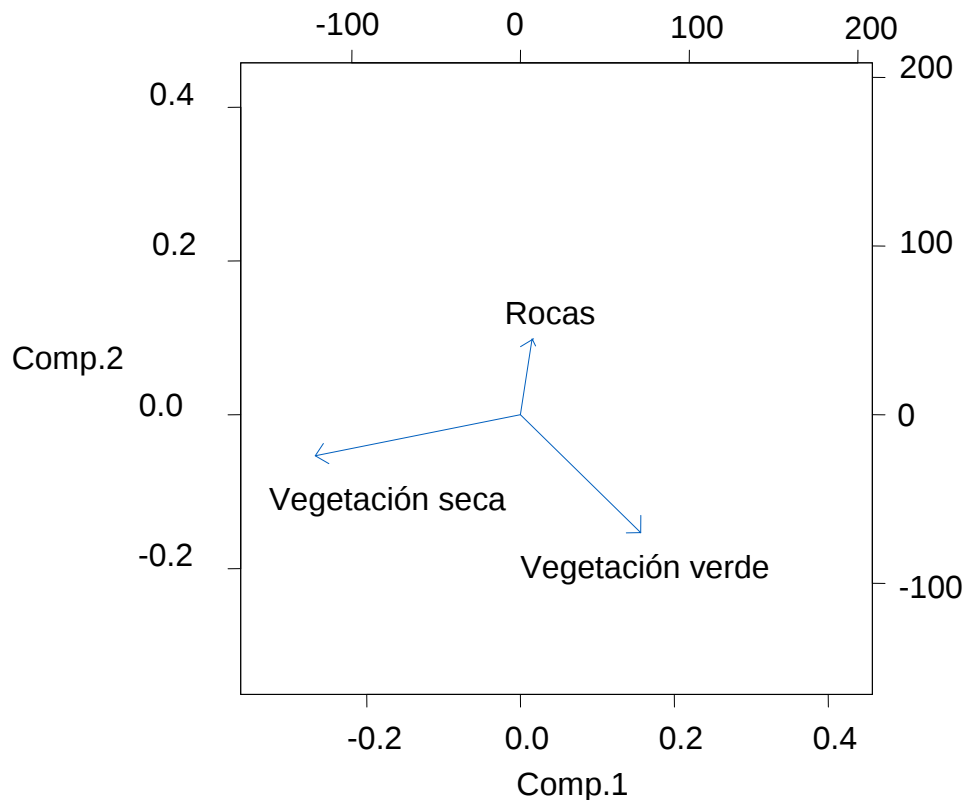


Figura 8. Componentes principales para cobertura aérea en la estación de lluvias del sitio Cadereyta.

Andrade *et al.* (2006) coinciden con este estudio en señalar la importancia de la vegetación seca como posible indicador de la cantidad de forraje presente en ambientes áridos y semiáridos. Esta importancia radica en que a mayor cantidad de vegetación seca, implica que existió una acumulación de forraje en la época de lluvias y con ello la síntesis de reservas y formación

de gran cantidad de nuevos puntos de crecimiento, con lo que se iniciará de forma vigorosa el nuevo crecimiento en la siguiente época de lluvias. También, la presencia de vegetación seca es una cobertura que protegerá el suelo del arrastre por el viento, manteniendo así una mayor fertilidad que servirá como base para un crecimiento vigoroso en la siguiente época de lluvias.

Cangiano (1996) agrega otra importancia de la vegetación seca en relación a la alimentación del ganado en pastoreo; la vegetación seca compuesta del follaje muerto del estrato herbáceo llega a ser la única fuente de forraje para los animales en pastoreo, sobretodo poco antes de que se inicie el nuevo crecimiento vegetal al comenzar la época de lluvias. Concluye este autor que es la vegetación seca la salvaguarda de los animales mientras ocurre el nuevo crecimiento vegetal. Sin embargo, Bartlett *et al.* (1994) advierten que la vegetación seca presenta limitantes para la buena alimentación de los animales en pastoreo, principalmente por el bajo nivel de consumo de dicho material seco.

La importancia de la cobertura por rocas en los dos sitios y épocas en influir sobre la cantidad de forraje presente está asociada a lo señalado por Loik *et al.* (2004), quienes demostraron que la cantidad total de agua recibida en un lugar no es tan determinante en la formación de puntos de concentración con forraje presente, como sí lo es la capacidad del suelo para retener dicha agua recibida. Suelos con afloramiento de rocas, comúnmente son de escasa profundidad por lo que tienen capacidad limitada de retención, no permitiendo que el agua infiltre a perfiles más profundos del suelo donde podrá almacenarse por más tiempo e incrementar el tiempo en que podrá estar disponible a las plantas, sobretodo en ambientes con alto potencial de evaporación como los dos sitios en que se realizó el presente estudio.

4.5.2 Estimación del forraje presente mediante índice verde (IVIS)

La estimación de la cantidad de forraje presente a partir del índice verde calculado por reflectancia mostró coeficientes de determinación (r^2) muy bajos (Cuadro 3), indicando que esta medida óptica no fue lo

suficientemente sensible para relacionar cambios en el espectro con cambios en el peso del forraje.

Los coeficientes de determinación también mostraron una gran variabilidad, oscilando entre 0.08 y 0.38. Esta variabilidad estuvo asociada a los diferentes tipos y fuentes de forraje, así como al sitio y época del año. La tendencia general fue hacia mayores r^2 en la época seca de Cadereyta y menores en la época seca de San Juan del Río. La menor capacidad de estimar la cantidad de forraje presente en San Juan del Río que en Cadereyta puede estar relacionada con la mayor densidad y por tanto presencia del componente arbustivo (Apéndices del 5 a 9).

Cuadro 3. Coeficiente de determinación (r^2) para estimación de forraje presente a partir de índice verde (IVIS).

Tipo y fuente de forraje*	Sitio San Juan del Río		Sitio Cadereyta	
	Seca	Lluvias	Seca	Lluvias
Arbustiva MV	0.08	0.16	0.32	0.17
Arbustiva MS	0.17	0.17	0.26	0.19
Herbácea MV	0.09	0.16	0.29	0.25
Herbácea MS	0.12	0.22	0.29	0.23
Producción total	0.18	0.11	0.38	0.21

MV = materia verde; MS = materia seca.

Bandinelli *et al.* (2003) propusieron varias razones por las cuales medios ópticos fracasaban en dar una relación cuantitativa estable entre el índice verde y el forraje presente, entre éstas está el no haber contado con aparatos ópticos con la sensibilidad suficiente para poder captar variaciones en el espectro que estuvieran más estrechamente relacionadas con cambios

en la cantidad de fitomasa presente. Estos autores resaltan que en algunos tipos de vegetación de conformación compleja, la proporción del peso de fitomasa de interés (forrajera) puede ser muy pequeña en relación a la fitomasa total, por tanto los cambios en peso son muy pequeños en relación a posibles cambios en el espectro. Estas características biológicas pueden sumarse a limitaciones en el procedimiento de pesaje, corte y manejo matemático de los datos.

Una característica morfológica del tejido vegetal que pudiese limitar la relación cuantitativa entre variaciones en el espectro y cantidad de fitomasa, es la presencia de una capa pilosa común en hojas de varias especies vegetales adaptadas a ambientes secos. Esta capa pilosa se desarrolla para facilitar la disipación de la radiación solar y evitar una fuerte presión de demanda evaporativa, esta función de disipación funciona esté o no el tejido desarrollando una fuerte actividad fotosintética, por tanto puede dar un mismo espectro pero con variación en la actividad de síntesis realizada (Larcher, 2000).

El área foliar reducida es una característica común en plantas de ambientes semiáridos, que sirve para reducir la pérdida de agua al ambiente y maximizar la actividad fotosintética (Langer, 1990). Esto puede provocar que mucha de la reflectancia provenga del tejido leñoso y de sustratos inorgánicos como el suelo, por lo que se encubre el patrón asociado al tejido vegetal activo con otros componentes de menor o nula actividad fotosintética. La posibilidad de confusión puede ser alta con aparatos como el utilizado en este estudio, dando un índice de verde muy pobre en relación al tejido verde en realidad funcionando.

Barlett *et al.* (1994) señalan que el posicionamiento de la hoja puede influenciar en la reflectancia y que en ambientes semiáridos la posición de la hoja es diferenciada, a fin de disminuir la incidencia directa de luz solar y por consiguiente una reducción de la transpiración; en este ecosistema las hojas se presentan en una inclinación inferior a 90 grados, diferente de hojas de ambientes tropicales que comúnmente se presentan en 120 grados. Un cambio en el posicionamiento de la hoja puede influenciar en la reflectancia

captada por los aparatos que están contruidos para captar reflectancias entre 150 y 180 grados en relación al suelo.

La predominancia de material verde a partir de las arbustivas con baja actividad fotosintética puede explicarse por la habilidad de este tipo de plantas de poder mantener en latencia sus hojas, éstas no pierden su color verde aun cuando no estén realizando fotosíntesis en forma activa. Las arbustivas de este tipo son capaces de evitar que las hojas oxiden su contenido de clorofila y otros organelos, al no contar con fotosintatos derivados de una fotosíntesis actual. Para Newton y Goodin (1989), el mecanismo de adaptación que promueve este fenómeno es una disminución en su potencial hídrico, por acumulación de agua en los espacios intercelulares, lo que facilita su control por parte de la planta.

Estudios que utilizaron la reflectancia como estimador del forraje presente, se concentraron en gramíneas y monocultivos, estos tipos de vegetación poseen un dosel de altura homogénea, quedando reducida la posibilidad de que haya superposición de estratos y sombreado de hoja (Rocchini, 2007). Para el matorral xerófilo la existencia de hojas superpuestas y de sombreado mutuo es algo relativamente común, lo que hace que la reflectancia de algunos estratos no pueda ser captada en forma apropiada a la magnitud real de hoja, imposibilitando la lectura exacta de la radiación interceptada y reflejada (Larcher, 2000).

Los factores mencionados pueden dar un patrón de reflectancia de la vegetación que no esté ajustado con el peso del forraje presente, haciendo que la relación cuantitativa sea muy pobre. Otro factor que pudiese tener alguna influencia es esta pobre relación cuantitativa en las condiciones del presente estudio, fue que la masa vegetal forrajera representó una parte muy pequeña de la masa vegetal total. García (1988) estima que en vegetación de matorral xerófilo la masa vegetal forrajera sólo aporta 7% del total de la masa vegetal, así las lecturas de reflectancias provinieron de especies vegetales con un mínimo o nulo aporte de forraje. Posiblemente circunscribir las mediciones ópticas a los individuos vegetales que proveen forraje podría ser una opción para mejorar la relación cuantitativa.

4.6 Conclusiones

Los componentes más importantes de cobertura del dosel descritos por fotografía digital asociados con la cantidad de forraje presente, son las vegetaciones verde y seca, y la cobertura por rocas. El índice verde base iso-suelo (IVIS) en la forma calculada mostró limitación para determinar la cantidad de forraje presente en el matorral xerófilo.

Los dos métodos ópticos (fotografía digital y reflectancia) fueron sensibles a sitio y época del año, por lo que se deben considerar estas fuentes de variación en el proceso de calibración.

4.7 Literatura citada

- Almeida, L. J., L. Oliveira, G., e C. Bezerra. 1990. Uso atual da terra com ênfase aos aspectos fitofisionômicos da região nordeste do estado do Mato Grosso. *In: Memoria de Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. 05 a 10 de abril. Mato Grosso, Brasil. pp: 341-349.
- Andrade, P. A., E. Souza, S., S. Silva, e D. Silva. 2006. Produção animal no bioma caatinga: paradigmas dos “pulsos- reservas”. *In: 43 Annual Meeting of the Brazilian Society of Zootecnia*. Joao Pessoa, Paraiba, Brasil. pp: 138-152.
- Araújo Filho, J., A., J. A. Gadelha, S. M. Crispim, e A. Silva, N. 2000. Pastoreio combinado em caatinga manipulada no sertão cearense. Desempenho dos bovinos. *In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia*. 13 19 de junio. Viçosa, Minas Gerais, Brasil. pp: 110-114.
- Ares, J., M., B. Bertiller, and A. Bisigato. 2002. Estimates of dryland degradation with Fourier signatures in low-altitude monochromatic images with high spatial resolution. *Landscape Ecology* 32: 86-98.
- Bandinelli, R., M. Rapaccini, S. Terzi, and M. Macchi. 2003. Proposal for a framework for production plants remote control: a preliminary test case. *European Simulation Symposium*. 15 al 19 de junio. Delft, Netherlands. pp: 343-348.
- Bartlett, E. T., W. C. Leininger, and L. R. Roath. 1994. Planning for Drought on Colorado Rangeland. Colorado State University Cooperative Extension Publication Number 6. 103 p.
- Cangiano C., A. 1996. Consumo en pastoreo: factores que afectan la facilidad de cosecha. *In: Producción Animal en Pastoreo*. Cangiano C., A. (ed.)

- INTA Editora de la Estación Experimental Agropecuaria. Balcarce. Buenos Aires, Argentina. pp: 41-60.
- CEA (Comisión Estatal de Aguas – Querétaro). 2010. Pronóstico del clima. <http://www.ceaqueretaro.gob.mx/pronostico/>. Consultado el 3 de noviembre de 2010.
- Crosta, A. P. 1993. *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Campinas. Brasil. 402 p.
- Denogean B., F., G. Martín, R. M. H. Ibarra, y F. F. A. Moreno. 2006. Plantas forrajeras del agostadero sonorense con potencial tóxico para el ganado. *In: Memoria de la XLII Reunión Nacional de Investigación Pecuaria*. 6 al 11 de noviembre. Veracruz, Ver. México. pp: 155 -165.
- Galindo L., M. 2009. *La Economía del Cambio Climático en México*. SEMARNAT-SHCP. México. 23 p.
- García E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F. 220 p.
- Goldberg, D., and A. Novoplansky. 1997. On the relative importance of competition in unproductive environments. *Journal of Ecology* 85: 409–418.
- Hodgson, J., C. Matthew, and K. C. Harrington. 2000. *Pasture Measurement: Pasture and Crop Science*. (ed). New Zealand Companies. New Zealand. 312 p.
- Jongmann, N. R., H., G. Ter braak, and O. F. R. Van Tongeren. 1995. *Data Analysis in Community and Landscape Ecology*. Cambridge University. Press. United States. 318 p.
- Langer, R. H. M. 1990. *Pastures. Their Ecology and Management*. Oxford University Press, Auckland, New Zealand. 233 p.
- Larcher, W. 2000. *Ecofisiologia Vegetal*. Rima Editora. São Carlos, São Paulo, Brasil. 531 p.
- Loik, M. E., D. Breshears, D. Lauenroth, and W. K. J. Belnap. 2004. Climatology and ecohydrology of precipitation pulses in arid and semiarid ecosystems of the western USA. *Oecologia* 52: 89-106.
- NRC (National Research Council). 1994. *Rangeland Health: New Methods to Classify, Inventory and Monitor Rangelands*. National Academy Press, Washington D.C. United States. 200 p.
- Newton, R. J., and J. R. Goodin. 1989. Moisture stress adaptation in shrubs. *In: The Biology and Utilization of Shrubs*. McKell, C. M. (ed.). Academic Press, Inc. San Diego, CA., United States. pp: 365–383.
- Paz F., M. A. Odi Cano, M. A. Bolaños, y A. Zarco. 2009. Equivalencia ambiental en la productividad de la vegetación. *Agrociencia* 43: 635-648.

- Rocchini, D. 2007. Effects of spatial and spectral resolution in estimating ecosystem α -diversity by satellite imagery. *Remote Sensing of Environment* 89: 76-82.
- Russel, G. 1989. Absorption of radiation by canopies and stand growth: Plant canopies: their growth, form and function. Cambridge, England. 39 p.
- Rzedowski, J. 1991. Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Acta Botánica Mexicana* 14: 21-37.
- SIMTOG (Sistema Nacional de Monitoreo Terrestre Orientado a la Ganadería). 2010. Manual de Campo para el Sistema Nacional de Monitoreo Terrestre Orientado a la Ganadería. SAGARPA. México. 133 p.
- Trejo, I., y J. Hernández 1996. Identificación de la selva baja caducifolia en el estado de Morelos, México, mediante imágenes de satélite. *Investigaciones Geográficas* 32: 67-76.
- Vega-López, E. 2008. Valor Económico Potencial de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México como Sumideros de Carbono. The Nature Conservancy-México. México. 104 p.
- Weisberg, S. 1985. Applied Linear Regression. Wiley. New York. 450 p.
- Wester, D., E. Sosebee, R. E. Zartman, E. B. Fish and J. Carlos Villalobos. 2003. Biosolids in a Chihuahuan desert ecosystem. *Rangelands* 25: 27-32.

5 APÉNDICES



Apéndice 1. Fotografía digital de una estación de muestreo circular de 1.6 metros de diámetro, sitio San Juan del Río en la época de lluvias.



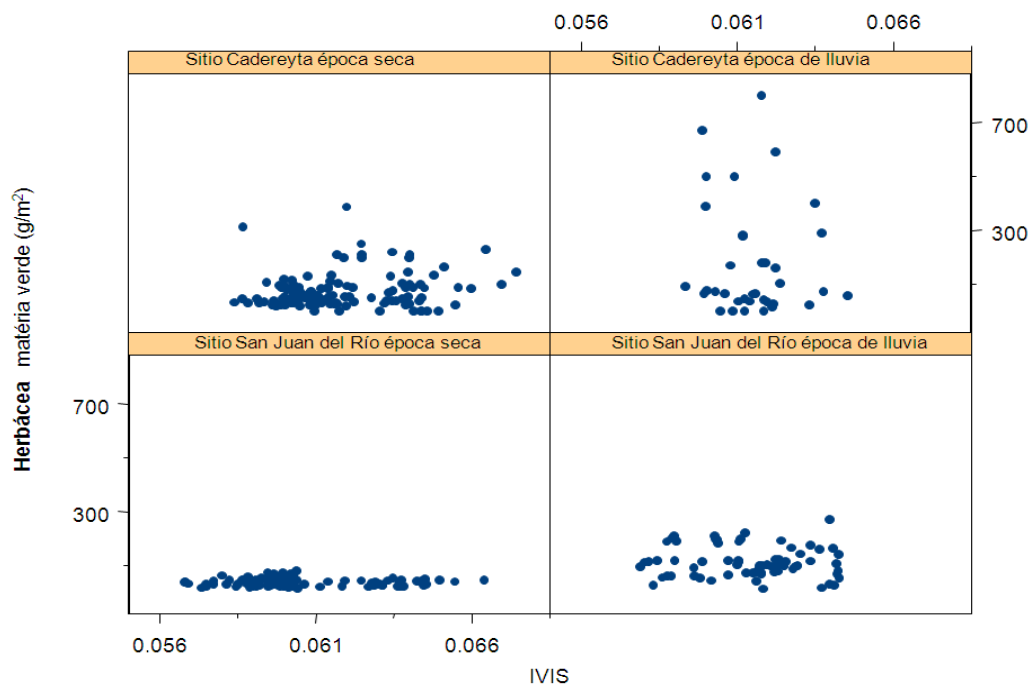
Apéndice 2. Fotografía digital de una estación de muestreo circular de 1.6 metros de diámetro, sitio San Juan del Río en la época seca.



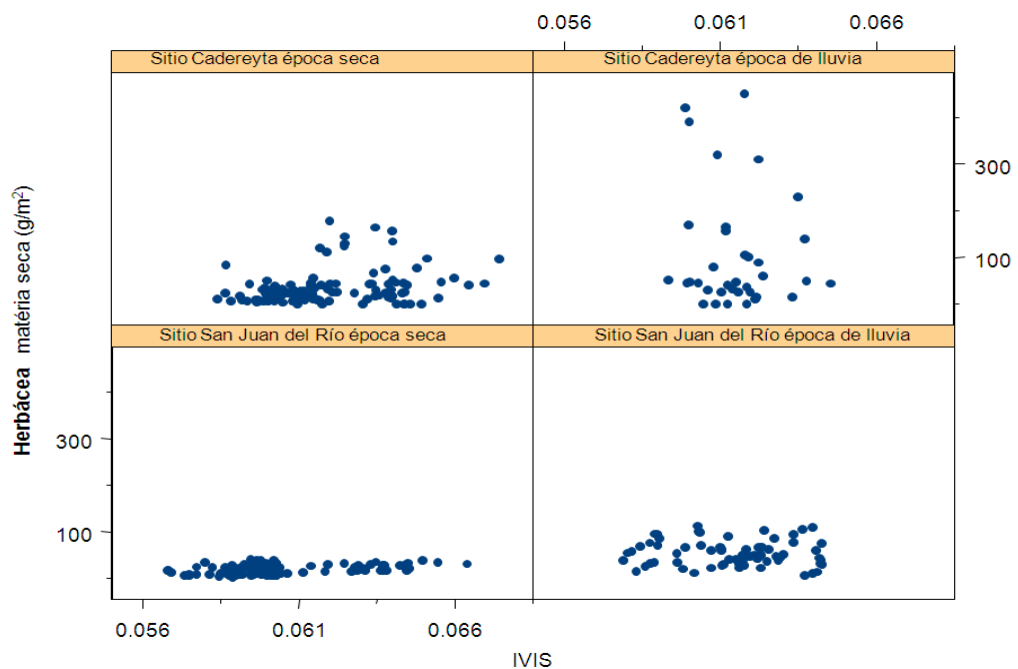
Apéndice 3. Fotografía digital de una estación de muestreo circular de 1.6 metros de diámetro, sitio Cadereyta en la época de lluvias.



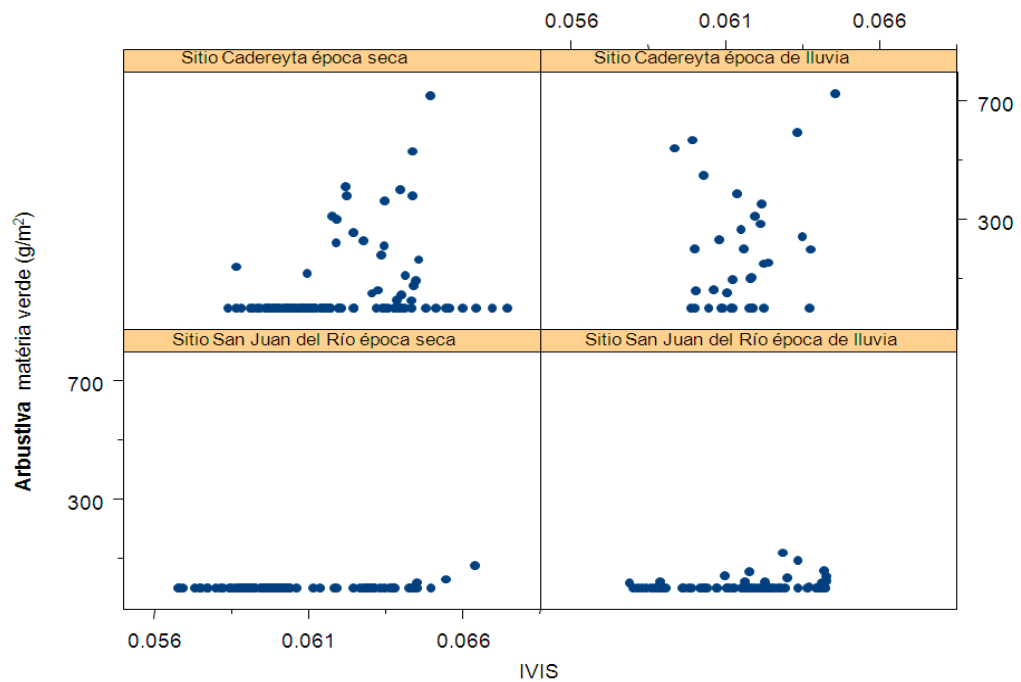
Apéndice 4. Fotografía digital de una estación de muestreo circular de 1.6 metros de diámetro, sitio Cadereyta en la época seca.



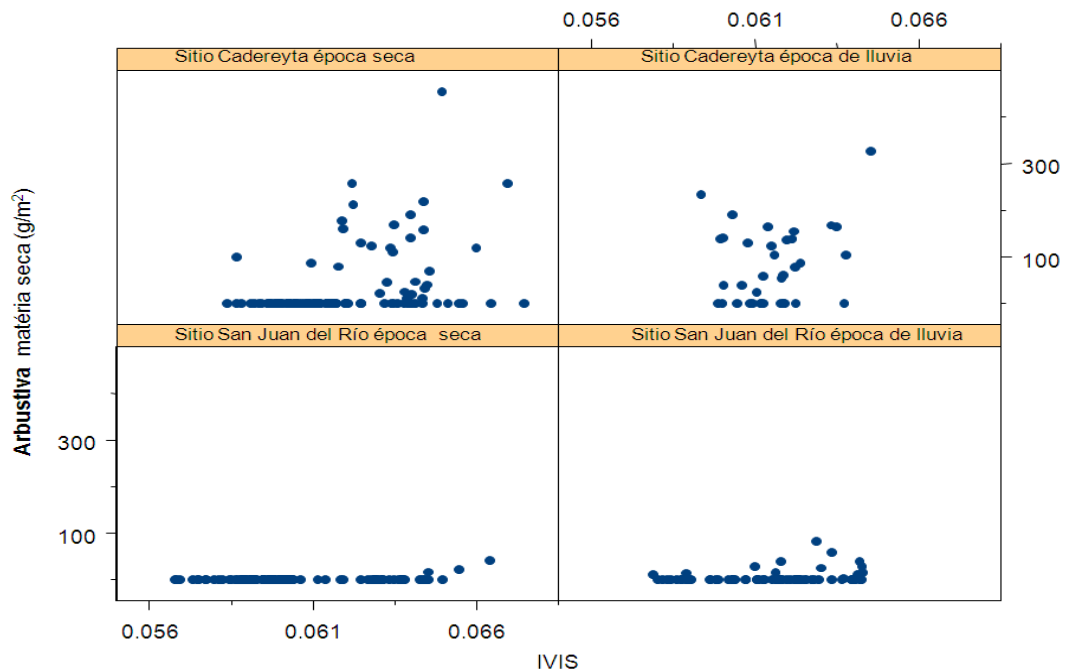
Apéndice 5. Dispersión de datos del forraje contenido (g m^{-2}) en el estrato herbáceo (materia verde) presente en relación a índice verde base iso-suelo (IVIS) en los sitios San Juan del Río y Cadereyta.



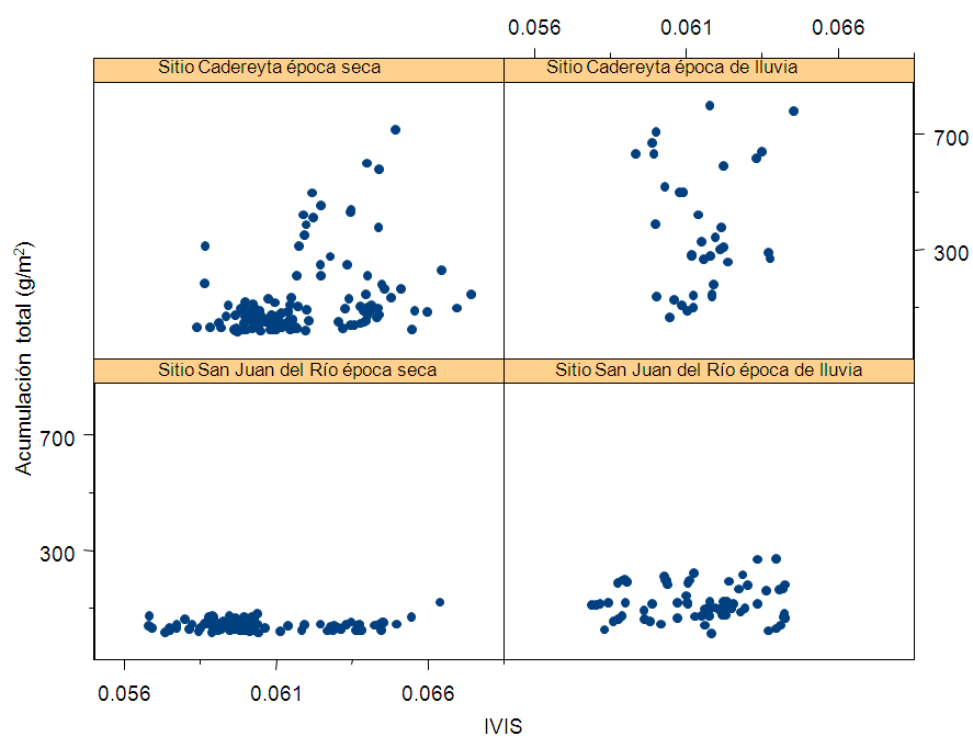
Apéndice 6. Dispersión de datos del forraje contenido (g m^{-2}) en el estrato herbáceo (materia seca) presente en relación a índice verde base iso-suelo (IVIS) en los sitios San Juan del Río y Cadereyta.



Apéndice 7. Dispersión de datos del forraje contenido (g m^{-2}) en el estrato arbustivo (materia verde) presente en relación a índice verde base iso-suelo (IVIS) en los sitios San Juan del Río y Cadereyta.



Apéndice 8. Dispersión de datos del forraje contenido (g m^{-2}) en el estrato arbustivo (materia seca) presente en relación a índice verde base iso-suelo (IVIS) en los sitios San Juan del Río y Cadereyta.



Apéndice 9. Dispersión de datos del forraje total (materia verde) presente (g m^{-2}) en relación a índice verde base iso-suelo (IVIS) en los sitios San Juan del Río y Cadereyta.