

Gabriela Martínez Motta



Tesis para la Licenciatura en Ciencias Biológicas
Facultad de Ciencias
Universidad de la República

**CARACTERIZACIÓN FUNCIONAL DE LOS ESTADOS DE
CONDICIÓN DE LAS COMUNIDADES VEGETALES DE LA
CUESTA BASÁLTICA**

Gabriela Martínez Motta

Tutor: MSc. Federico Gallego

Co-Tutora: Dra. Alice Altesor

Profundización en Ecología

Tribunal

MSc. Federico Gallego

MSc. Luis López

Dra. Claudia Rodríguez

Enero 2017

CONTENIDO

	Página
Resumen	1
Introducción	2
Dinámica de la vegetación: los Modelos de Estados y Transiciones	2
Atributos funcionales de los ecosistemas	3
Antecedentes de Modelos de Estados y Transiciones	4
Heterogeneidad de los Pastizales de Uruguay	5
Modelos de Estados y Transiciones en los Pastizales de Uruguay	6
Objetivo	7
Materiales y Métodos	7
Área de estudio	7
Dinámica funcional de las comunidades de pastizal	8
Caracterización funcional de los Estados del pastizal	8
Análisis estadísticos	10
Resultados	10
Dinámica funcional de las comunidades	10
Análisis funcional de los Estados de condición en Pastizales Ralos	11
Análisis funcional de los Estados de condición en Pastizales Densos	13
Discusión	15
Dinámica funcional de las comunidades	15
Análisis funcional de los Estados de condición en Pastizales Ralos	16
Análisis funcional de los Estados de condición en Pastizales Densos	17
Conclusiones	19
Agradecimientos	20
Bibliografía	21
Anexo 1	25

RESUMEN

La cobertura de pastizales en Uruguay ha cambiado significativamente en las últimas décadas asociado al avance de la frontera agrícola y forestal. Estos cambios generaron consecuencias importantes sobre el estado de condición de los pastizales. En este sentido, los Modelos de Estados Transiciones constituyen una poderosa herramienta que brinda la posibilidad de conocer y evaluar el estado de los pastizales a partir de atributos estructurales de la vegetación. Recientemente se han caracterizado los estados de condición del pastizal en las cuatro regiones geomorfológicas de Uruguay con mayor proporción de pastizales naturales. El objetivo del presente trabajo fue caracterizar funcionalmente los estados de condición de dos Comunidades de Pastizales (Ralos y Densos) de la región geomorfológica Cuesta Basáltica. Para ello se utilizaron datos provistos por sensores remotos. En particular se utilizó el Índice Verde Mejorado (IVM), para caracterizar la dinámica mensual y estimar 4 atributos del funcionamiento de los ecosistemas (Integral anual, Valores Máximos y Mínimos de IVM y Rango Relativo) para los estados identificados en los pastizales de la Cuesta Basáltica. Ambas comunidades de pastizales presentaron un pico de productividad en primavera-verano y una un descenso en el verano tardío. Los estados de condición de ambas comunidades de pastizales presentaron diferencias significativas en la dinámica estacional del IVM. Estas diferencias estuvieron concentradas fundamentalmente en los meses de abril a junio de 2015 (otoño). En lo que respecta a los atributos funcionales, los estados de la comunidad de Pastizales Densos mostraron diferencias significativas en tres de los cuatro atributos analizados (Integral anual, Valores Máximos y Mínimos de IVM). Por su parte los estados de la comunidad de Pastizales Ralos mostraron diferencias significativas únicamente en uno de ellos (Rango Relativo). Las diferencias entre los estados de vegetación detectadas, a partir de la caracterización funcional, podrían estar asociadas al manejo de los pastizales. Este trabajo evidenció cuáles son los Estados con mayor resiliencia frente a los eventos climáticos. La caracterización funcional y estructural de los pastizales es de suma importancia para la toma de decisiones con respecto al manejo de los mismos y a su conservación.

1. INTRODUCCIÓN

Uruguay al igual que Argentina y Brasil, se localiza dentro de los “Pastizales del Río de la Plata”. Esta zona de pastizales, determinada climáticamente, es una de las más extensas en Sudamérica (Soriano, 1992). A diferencia de Argentina y Brasil, Uruguay cuenta con la mayor parte de su superficie bajo pastizal natural (60% aproximadamente) destinado a la ganadería, actividad económicamente importante en Uruguay (DIEA-MGAP, 2011). Sin embargo, esta realidad no es estática y en las últimas décadas se está llevando a cabo un intenso proceso de transformación, donde el pastizal se ha visto amenazado por el incremento de las tierras destinadas a agricultura y forestación (DIEA-MGAP, 2011). Estudios en la región plantean que tanto la agricultura como la forestación se han transformado en negocios más redituables para los inversores ya que implican menos mano de obra que la ganadería y una menor inversión. (Navarrete et al. 2009).

La cobertura de pastizales en Uruguay ha cambiado significativamente, pasando de cubrir el 80% del territorio nacional (12.600.000 ha) en el 1999 al 64.3% (10.500.000 ha) en el 2011 (DIEA-MGAP, 1999-2011). Este cambio generó consecuencias importantes sobre el estado de condición de los pastizales ya que el área para la ganadería se vio disminuida, manteniendo el stock de ganado y por lo tanto se generó una sobre explotación del recurso (Ayala, 2011). Lograr un equilibrio entre la producción y la conservación de los pastizales naturales es un desafío que requiere conocer la estructura y el funcionamiento de los mismos, así como los principales factores de perturbación y estrés (el pastoreo por ganado doméstico y las condiciones climáticas) (López et al. 2009).

1.1 Dinámica de la vegetación: los Modelos de Estados y Transiciones

El pastoreo por ganado doméstico constituye una perturbación clave que determina la estructura y el funcionamiento de los pastizales (Altesor et al. 2005). Los cambios en la composición de especies promovidos por el pastoreo fueron explicados inicialmente por la teoría clásica de Clements (1916) que planteaba que a partir de una perturbación se producen cambios progresivos en las comunidades hasta llegar a un climax. Estas ideas fueron modificadas por Westoby et al. (1989) donde planteaban que la perturbación por pastoreo ocurre en dirección opuesta a la sucesión y plantean los Modelos de Estados y Transiciones (METs) que representan la dinámica de los ecosistemas cuyo comportamiento no se ajusta a

los modelos direccionales clásicos. En los METs se definen estados de vegetación y posibles transiciones (entre los estados) dentro de una comunidad de pastizal. Cada estado queda definido según las características de la vegetación y del suelo. La transición de un estado a otro ocurre muy rápidamente o durante un período extenso y depende de eventos naturales (precipitaciones, incendios, etc.) así como de acciones de manejo (cambio en la carga de ganado, destrucción o introducción de plantas, fertilización, etc.) o la combinación de ambas (Westoby et al. 1989). Las transiciones pueden ser positivas (de recuperación) o negativas (de deterioro) y el pasaje de un estado a otro no siempre es reversible (López et al. 2009).

Para poder implementar estos modelos es necesario reunir información suficiente para generar catálogos de posibles transiciones entre los estados definidos (Oesterheld y Sala, 1994). Los estados se consideran relativamente estables (Westoby et al. 1989) y para cambiar de estado se debe cruzar un umbral definido. La vegetación puede sufrir alteraciones, pero no ser considerados cambios de estado, sino como cambios de fase o dinámica de la comunidad de plantas, siempre dentro de un estado determinado (Stringham et al. 2001). El cambio de estado significa traspasar el umbral definido, produciendo una potencial comunidad vegetal distinta. Se define resiliencia como la capacidad de absorber las perturbaciones sin cambiar de estado (Holling, 1973). Este concepto se basa en definir cuán lejos un sistema puede ser desplazado del equilibrio antes que se impida el retorno al mismo. La capacidad de recuperación refiere al funcionamiento de los procesos ecológicos del sistema (Stringham et al. 2001). En este sentido, los METs son una poderosa herramienta que brinda la posibilidad de conocer y evaluar el estado de los pastizales a partir de atributos estructurales de la vegetación.

1.2 Atributos funcionales de los ecosistemas

La mayor parte de los trabajos que describen los estados de condición han sido realizados a partir de datos estructurales de la vegetación exclusivamente (por ejemplo: número de estratos, composición específica, fisonomía de la vegetación, etc.). En el presente estudio se incorpora la dimensión del funcionamiento de la vegetación. Los atributos funcionales de los ecosistemas refieren al intercambio de materia y energía entre la biota y el ambiente (por ejemplo: la productividad primaria neta, la evapotranspiración, el ciclado de nutrientes, etc.) (Chapin et al. 2002). Estos atributos presentan una serie de características que, en relación a los atributos estructurales, los hacen ventajosos. Por un lado, responden más rápido a los cambios en las condiciones ambientales que los atributos estructurales (Milchunas y Lauenroth, 1995).

A su vez la caracterización funcional permite cuantificar directamente los servicios ecosistémicos (Fisher et al. 2009). Finalmente, muchos de los atributos funcionales pueden ser evaluados utilizando la teledetección como una herramienta (Chuvieco, 2002).

Los sensores remotos proporcionan información sobre la superficie terrestre cubriendo amplias áreas en períodos de tiempo relativamente cortos (días). Los datos obtenidos de los sensores remotos corresponden a la reflectancia (cociente entre lo registrado por el sensor y la radiación incidente sobre la superficie) de las diferentes coberturas del suelo en las distintas porciones del espectro electromagnético. A partir de estas reflectancias diferenciales, se obtienen diversos índices o variables que se asocian a procesos biofísicos (Paruelo, 2008). El Índice de Vegetación Mejorado (IVM) es uno de los índices de vegetación más ampliamente utilizado para el estudio de la vegetación. El IVM es calculado a partir de la reflectancia en la porción del espectro electromagnético correspondiente al azul, rojo e infrarrojo:

$$[IVM=2.5x (IR-R) / (IR+C1 x R-C2 x A +L)]$$

Donde A, R e IR son las reflectancias corregidas atmosféricamente correspondientes a la porción del azul (459-479nm), del rojo (620-670 nm) y del infrarrojo (841-876 nm) cercano del espectro electromagnético. L es un ajuste de acuerdo al sustrato que tiene en cuenta la transferencia de la radiancia roja e infrarroja a través de la cubierta vegetal. C1 y C2 son coeficientes que tienen en cuenta la presencia de aerosoles y que usan la banda correspondiente al azul para corregir la reflectancia en la porción roja. Los coeficientes adoptados en el algoritmo del sensor MODIS son L = 1, C1 = 6 y C2 = 7.5 (Paruelo, 2008).

Este índice muestra una estrecha relación con la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (fRFA; Sellers et al. 1992) y por lo tanto con la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) (Prince, 1991; Running et al. 2000).

1.3 Antecedentes de Modelos de Estados y Transiciones en la región

En la región de los pastizales del Río de la Plata se han generado diversos METs, en especial en Argentina (Oesterheld y Sala, 1994; Pucheta et al. 1997; León y Burkart, 1998; Laterra et al. 1998). Oesterheld y Sala (1994) trabajaron en la Pampa Deprimida (Argentina) en donde a partir de METs analizaron los efectos del pastoreo y las grandes inundaciones. El modelo plantea 4 estados y 7 transiciones. El estudio se centró en la comparación de

ambientes pastoreados con ambientes clausurados. Laterra et al (1998) trabajaron en los pajonales de la Pampa Deprimida y analizaron los efectos de quema-pastoreo sobre a) la demografía de *Paspalum quadrifarium*, b) la dinámica de su comunidad acompañante, c) la productividad primaria y la calidad forrajera del pajonal, d) la dinámica poblacional de algunas especies invasoras y su impacto sobre la estructura del pajonal, e) algunas propiedades físico-químicas y biológicas del suelo, f) las comunidades de aves y mamíferos silvestres, g) la utilización ganadera y h) el mejoramiento del pajonal mediante intersembras. Plantearon 6 estados y 7 transiciones entre estos. Para definir los estados los autores se basaron en características estructurales de la comunidad vegetal y para definir las transiciones utilizaron conocimientos disponibles sobre el efecto del fuego sobre el pastoreo en la demografía de la especie dominante. León y Burkart (1998) también trabajaron en la Pampa Deprimida (Argentina) donde describieron 5 estados y 9 transiciones. Fueron utilizadas características estructurales (ejemplos: forma de vida dominante, cobertura de grupos funcionales, diversidad florística) y funcionales (ejemplos: productividad primaria, fenología y consumo por parte de vacunos) de los pastizales para describir los estados, así como características del suelo (ejemplo: salinidad, temperatura superficial y ritmo promedio de evaporación). De los 5 estados uno es hipotético ya que está basado en referencias históricas. Los otros 4 se basan en observaciones y experimentos en el pastizal considerando: i) cambios inducidos por exclusión de pastoreo, ii) reapertura al pastoreo de predios en clausura de diferentes edades, iii) inundaciones registradas en los últimos 28 años. En los pastizales de Uruguay el único antecedente es el MET propuesto por Pereira (2013) en la Colonia Juan Gutierrez, Paysandú. El modelo propuesto fue realizado a partir de muestreos de campo de un conjunto de variables como porcentaje de suelo desnudo, cobertura de malezas y cobertura de especies de alto valor forrajero.

1.4 Heterogeneidad de los pastizales de Uruguay

La heterogeneidad florística de los pastizales naturales de Uruguay ha sido descrita y cartografiada para las cuatro regiones geomorfológicas eminentemente ganaderas extensivas del país: Cuesta Basáltica, Región Centro Sur, Región Sierras del Este y Cuenca Sedimentaria del Noreste (Lezama et al. 2011; Baeza et al. 2011 a). La descripción florística se realizó a partir de muestreos de vegetación basados en el método fitosociológico denominado relevé. Una vez conocida la heterogeneidad de los pastizales, se cartografió la distribución espacial de los mismos a partir de clasificaciones supervisadas de imágenes satelitales (Baeza et al. 2011 a).

Particularmente en la Cuesta Basáltica se realizaron 80 censos de vegetación que permitieron identificar 3 unidades de pastizal: B-I, B-II y B-III. A partir de las imágenes satelitales se lograron cartografiar 2 grandes comunidades de pastizales, Pastizales Ralos y Pastizales Densos. Los Pastizales Ralos incluyen las unidades B-I y B-II correspondientes a pastizales de baja cobertura vegetal con especies mesoxerofíticas y se encuentran ubicados sobre suelos superficiales. Los Pastizales Densos incluyen a la unidad B-III, con alta cobertura vegetal y especies mesohidrofíticas y se ubican sobre suelos profundos (Lezama et al. 2011, Baeza et al. 2011b).

1.5 Modelos de Estados y Transiciones en los pastizales de Uruguay

Actualmente en Uruguay se está llevando a cabo el proyecto “Caracterización de los estados del campo natural en sistemas ganaderos de Uruguay: Definición y uso de indicadores de condición como herramientas de manejo” (2014-2017 INIA-FPTA 305). El objetivo de este proyecto es caracterizar los estados de condición del pastizal en las cuatro regiones geomorfológicas con mayor proporción de pastizales naturales. El muestreo de la vegetación, para determinar los estados, se realizó a partir de la selección aleatoria y anidada de cuadros de 10 x 10 Km, 5 celdas de 1x1 Km y 2 píxeles MODIS puros de 250x250 metros de cada una de las comunidades de pastizal: Pastizales Ralos y Pastizales Densos (Figura 1). Dentro de cada píxel de 250x250 metros seleccionado, se realizó una descripción cualitativa a nivel de paisaje. Luego se seleccionaron 3 parcelas de 5x5 metros donde se realizó un muestreo de los indicadores (ver Tabla 1, ANEXO I). Cada parcela muestreada fue georeferenciada y fotografiada.

En la Cuesta Basáltica se definieron dos modelos de estados, uno para Pastizales Ralos y otro para Pastizales Densos. Para ambas comunidades se caracterizaron 4 estados (A, B, C y D). Los estados definidos para los Pastizales Ralos, presentan un gradiente donde la altura del estrato basal de vegetación disminuye. Los estados A y B presentan dos estratos bien definidos y los estados C y D presentan solamente un estrato. La cobertura del estrato alto disminuye del estado A al D, mientras que el porcentaje de suelo desnudo aumenta del estado A al D, y el número de especies decrecientes bajo condiciones de pastoreo disminuye. En el caso del Pastizal Denso solamente los estados A y C presentan dos estratos de vegetación, los cuales se diferencian por la altura de los mismos, el porcentaje de suelo desnudo y el número de especies decrecientes. Los estados B y D presentan un solo estrato y se diferencian por la altura del

estrato basal, la cobertura vegetal, el porcentaje de suelo desnudo, porcentaje de gramíneas y el número de especies decrecientes (Informe FPTA-305; 2016).

1.6 Objetivo

El **objetivo general** del presente trabajo fue caracterizar funcionalmente los estados de condición de las Comunidades de Pastizales Ralos y Pastizales Densos de la región geomorfológica Cuesta Basáltica.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1 Área de estudio

El área de estudio considerada en este trabajo corresponde a la región geomorfológica Cuesta Basáltica (31° 35' y 32° 12' de latitud sur y los 56° 12' y 57° 20' de longitud oeste) (Panario et al. 1988). Esta región comprende los departamentos de Artigas, Salto, Paysandú, Este de Río Negro, Norte de Durazno y Suroeste de Tacuarembó, y ocupa aproximadamente 3,5 millones de hectáreas (21% del territorio nacional) (Figura 1). Presenta relieve que desciende desde la cuchilla de Haedo hasta el Río Uruguay. La precipitación media anual es de 1100 mm y la temperatura media es de 17 °C para el período 2000-2014 (GRAS-INIA, 2016)

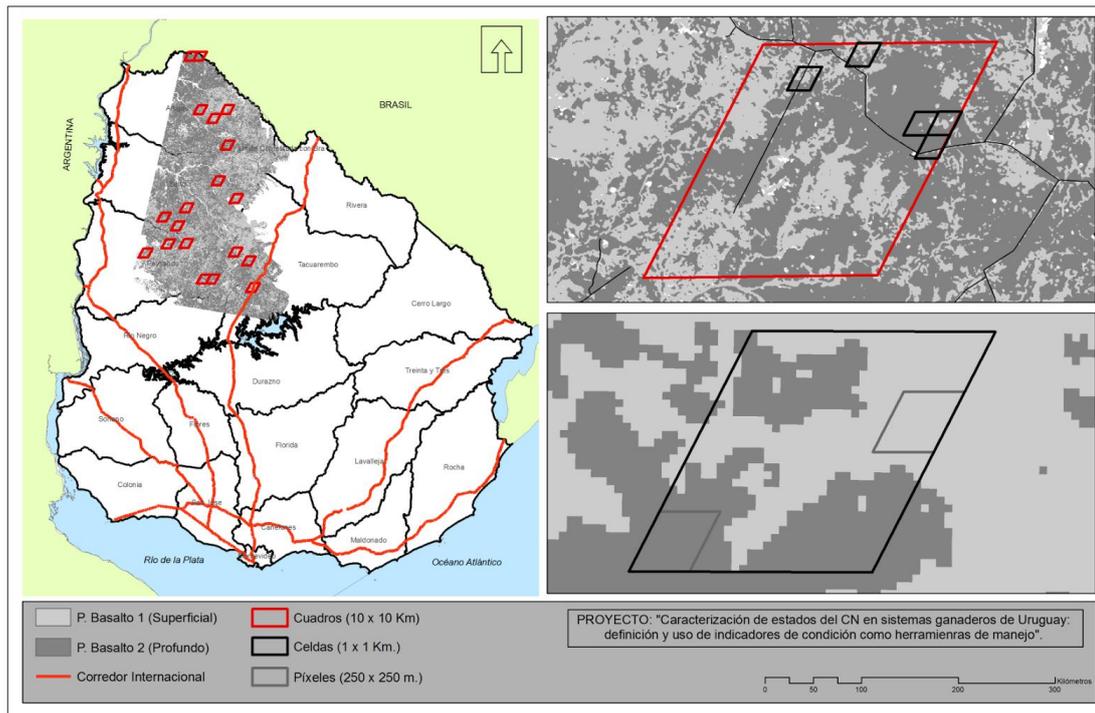


Figura 1: Ubicación en el territorio nacional de la cartografía de pastizales naturales de la Cuesta Basáltica y los cuadros (10x10 km), celdas (1x1 km) y píxeles (250x250 m) seleccionados para la medición de indicadores de condición de pastizal. En gris oscuro los pastizales densos (P. Basalto 2 (Profundo) y en gris claro los pastizales ralos (P. Basalto 1 (Superficiales)) (tomado del Informe FPTA 305, 2016).

2.2 Dinámica funcional de las comunidades de pastizal

Para cada comunidad de pastizal y considerando los píxeles obtenidos en el Proyecto FPTA 305, se caracterizó la dinámica funcional durante el período julio 2014 - junio 2015. La dinámica estacional de las comunidades de pastizal fue descrita en base al IVM.

2.3 Caracterización funcional de los estados del pastizal

A partir de los Modelos de Estados descritos en el marco del Proyecto FPTA 305, se caracterizaron funcionalmente el conjunto de píxeles que fueron asignados a cada estado dentro de cada comunidad vegetal. Para los Pastizales Ralos se consideraron los 4 estados

definidos, mientras que para los Pastizales Densos se consideraron únicamente 3 estados, quedando descartado el estado D por el bajo número de réplicas. La caracterización estuvo basada en la dinámica mensual del IVM y en 4 atributos del funcionamiento de los ecosistemas derivados del IVM (Tabla 2). Para ello se utilizaron los datos del satélite MODIS, que brinda una imagen cada 16 días con una resolución espacial de 250x250 metros. Para el análisis se consideró el período julio 2014 hasta junio 2015. El trabajo de campo para la identificación y descripción de los METs se realizó entre junio y diciembre de 2014.

Tabla 2: Atributos funcionales de los ecosistemas derivados del IVM, sus características y significado biológico (Tomada y modificada de Paruelo, 2008 - Pettorelli et al. 2005)

Atributo	Definición	Significado Biológico
IVM-I	Suma de valores positivos de IVM en un período de tiempo	Productividad anual de la vegetación
Máximo IVM	Máximo IVM en el año	Productividad máxima anual de la vegetación
Mínimo IVM	Mínimo IVM en el año	Productividad mínima anual de la vegetación
Rango relativo de IVM	$(\text{Máximo IVM} - \text{Mínimo IVM}) / \text{IVM-I}$	Permite comparaciones de estacionalidad

2.4 Análisis estadísticos

Se utilizaron análisis estadísticos no paramétricos debido a que los datos no cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza. Para comparar la dinámica estacional de las dos comunidades de pastizales se utilizó el test de Mann-Whitney. Se utilizó el Test de Kruskal-Wallis para analizar la dinámica estacional, integral anual del IVM, Máximo y Mínimo IVM, y Rango Relativo de cada estado para las dos comunidades de pastizal.

3. RESULTADOS

3.1 Dinámica funcional de las comunidades de pastizal

La dinámica mensual del IVM para los Pastizales Densos y Ralos mostró diferencias significativas en 7 de los 12 meses analizados (primavera-verano) ($U=445$, $p < 0.001$) (Figura 2), donde los Pastizales Densos mostraron mayor IVM que los Pastizales Ralos. Los Pastizales Densos presentaron mayor productividad a lo largo del período estudiado que los Pastizales Ralos. El pico de productividad, para ambos pastizales, se dio en primavera-verano, siendo enero el mes de mayor actividad fotosintética. Por su parte, el mes de menor productividad, para ambas comunidades, fue en el verano tardío (abril 2015).

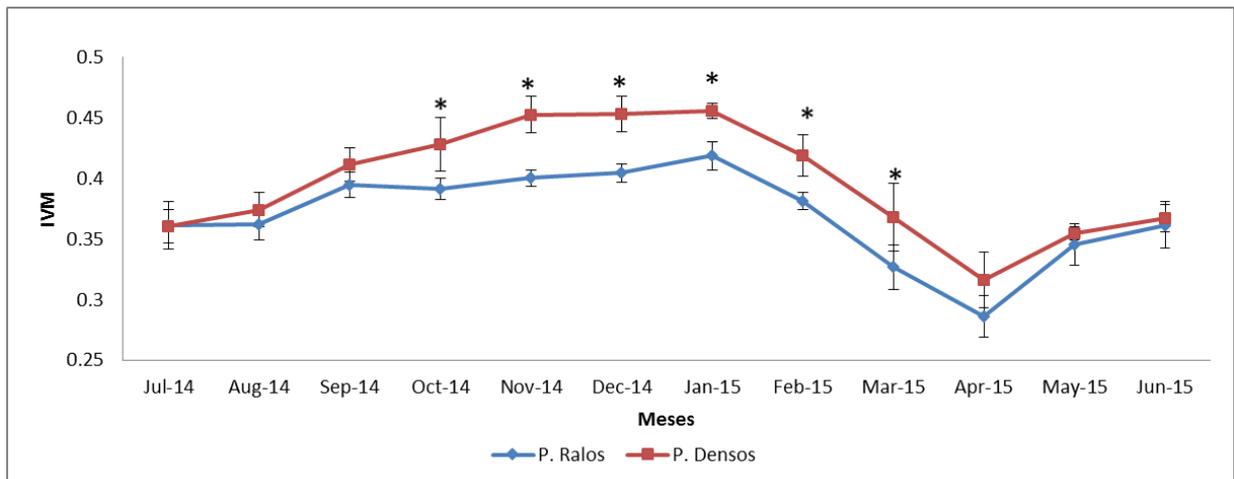


Figura 2: Dinámica mensual del Índice Verde Mejorado (IVM) para las comunidades de Pastizales Densos y Pastizales Ralos de la Cuesta Basáltica. Los asteriscos indican las diferencias significativas ($p < 0.05$) y las barras el error estándar.

3.2 Análisis funcional de los estados de condición en Pastizales Ralos

Las imágenes utilizadas permitieron caracterizar funcionalmente los estados de condición para la comunidad de Pastizales Ralos de la Cuesta Basáltica. La Figura 3 presenta los valores del IVM para los estados de condición del pastizal identificados. Los resultados mostraron diferencias significativas entre los estados ($H=5.21$, $p<0.05$). En todos los casos el pico de producción ocurrió en enero, mientras que la mínima se registró en abril 2015, a excepción del estado A que tuvo su menor valor en mayo de 2015. En promedio el estado D mostró valores de IVM superiores al resto de los estados (Figura 3). Los cuatro estados analizados mostraron una caída en los valores del IVM en abril de 2015, siendo ésta más pronunciada para los estados C y D. Las diferencias significativas entre estados se dieron en los meses de julio de 2014 y marzo, abril, mayo y junio de 2015 (Tabla 3)

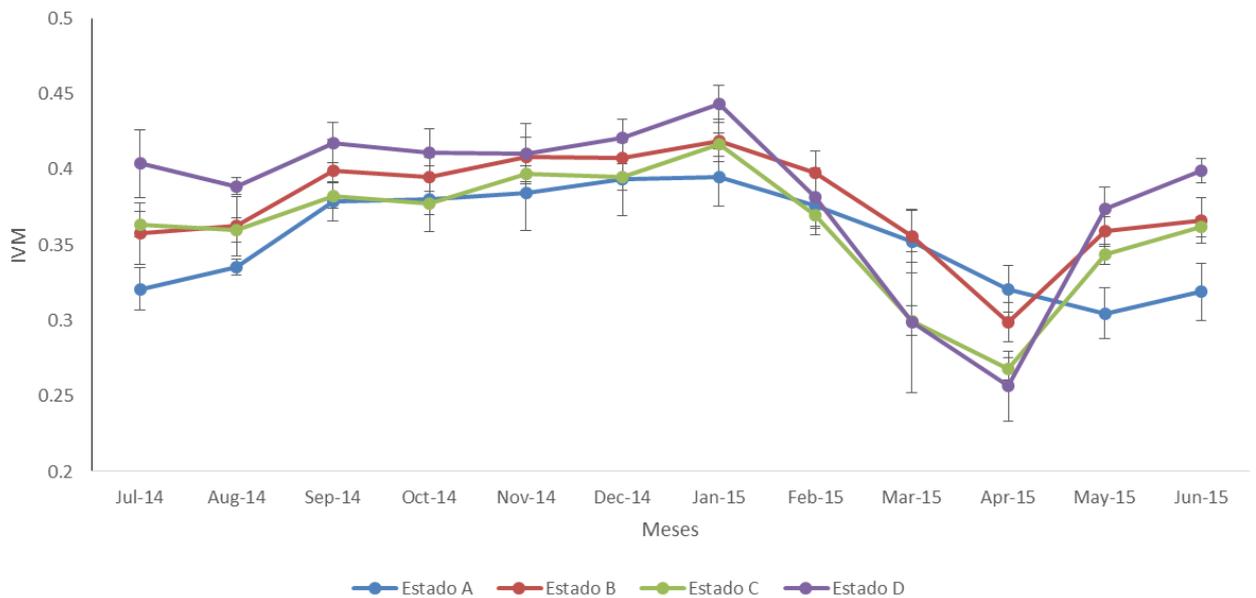


Figura 3: Dinámica mensual del IVM para los 4 Estados de condición de la comunidad de Pastizales Ralos de la Cuesta Basáltica. Las barras indican el error estándar.

Tabla 3: Comparación de los valores mensuales del Índice Verde Mejorado (IVM) correspondiente a los Estados de condición de la comunidad de Pastizales Ralos de la Cuesta Basáltica. Las letras diferentes significan diferencias significativas entre los Estados ($p < 0.05$).

Estados	jul-14	ago-14	set-14	oct-14	nov-14	dic-14	ene-15	feb-15	mar-15	abr-15	may-15	jun-15
A	a	a	a	a	a	a	a	a	ab	a	a	a
B	ab	a	a	a	a	a	a	a	a	ab	b	ab
C	ab	a	a	a	a	a	a	a	b	b	ab	ab
D	b	a	a	a	a	a	a	a	ab	ab	b	b

El análisis comparativo de los 4 atributos funcionales derivados del IVM para cada estado de condición se muestra en la Figura 4. No se encontraron diferencias significativas para la Integral Anual, el Valor de Máximo y Mínimo ($H_{IVM-I}=5.21301$, $p=0.1569$; $H_{Max}=2.60783$, $p=0.4561$; $H_{Min}=7.320246$, $p=0.0624$). Por el contrario, se encontraron diferencias significativas entre estados para el Rango Relativo ($H_{RR}=7.320246$, $p<0.05$) (Figura 4).

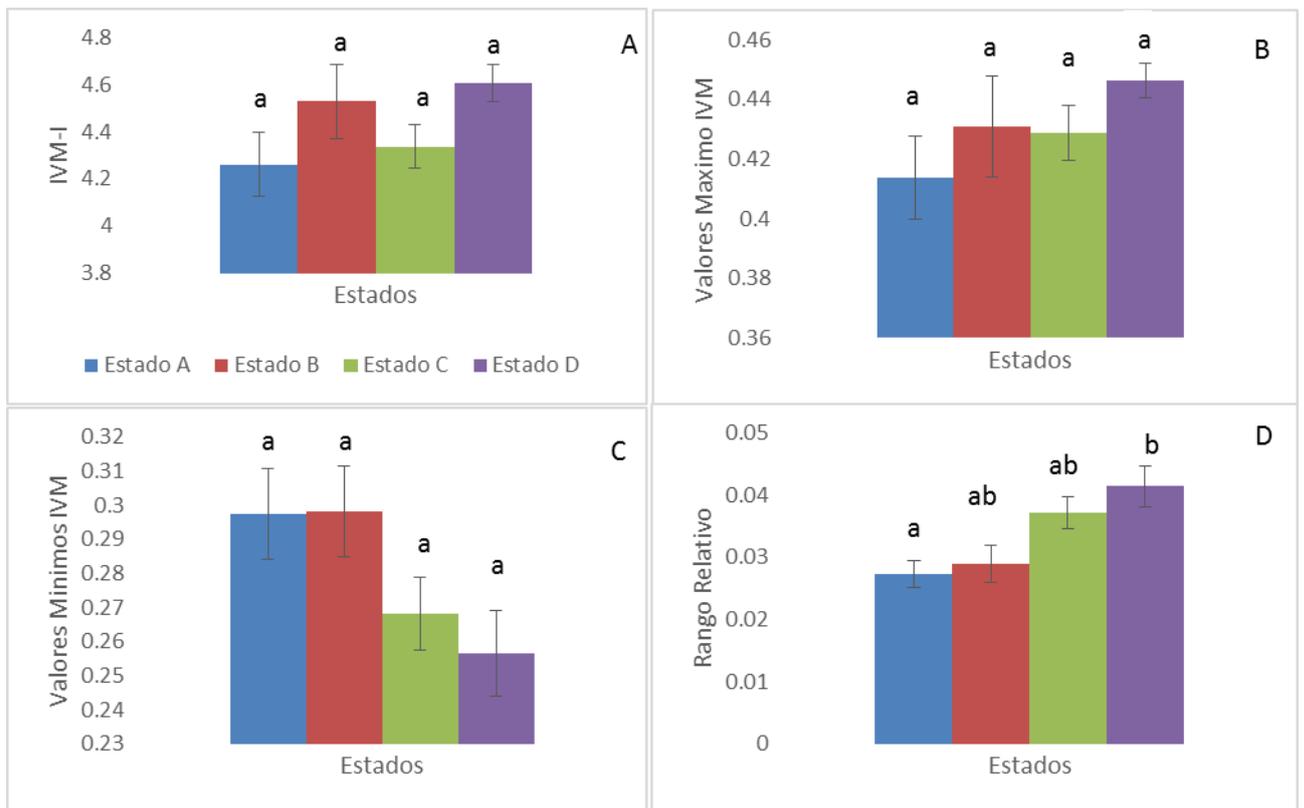


Figura 4: Atributos funcionales derivados de la dinámica mensual del IVM. A) Integral Anual; B) Valor Máximo del Índice Verde Mejorado, C) Valor Mínimo del Índice de Vegetación Mejorado y D) Rango Relativo, para los 4 Estados de condición definidos para la comunidad de Pastizales Ralos de la Cuesta

Basáltica. Las barras indican error estándar. Las letras (en minúscula) diferentes indican diferencias significativas entre los Estados ($p < 0.05$).

3.3 Análisis funcional de los estados de condición en Pastizales Densos

En lo que respecta a los Estados identificados en los Pastizales Densos, se encontraron diferencias significativas en la dinámica mensual del IVM ($H=10.20$, $p<0.001$). El Estado B presentó los mayores valores de IVM a lo largo del año en estudio, exceptuando el mes de junio de 2015, seguido del Estado A y C (Figura 5). Para los Estados A y C el pico de producción ocurrió en enero, mientras que para el Estado B ocurrió en diciembre. Los valores mínimos se registraron en abril 2015 y coincidió en los tres Estados. Los tres Estados analizados mostraron una caída en los valores del IVM en abril de 2015, siendo ésta más pronunciada para el estado C. Las diferencias significativas entre estados se dieron en todos los meses excepto en los meses de enero, mayo y junio de 2015 (Tabla 4).

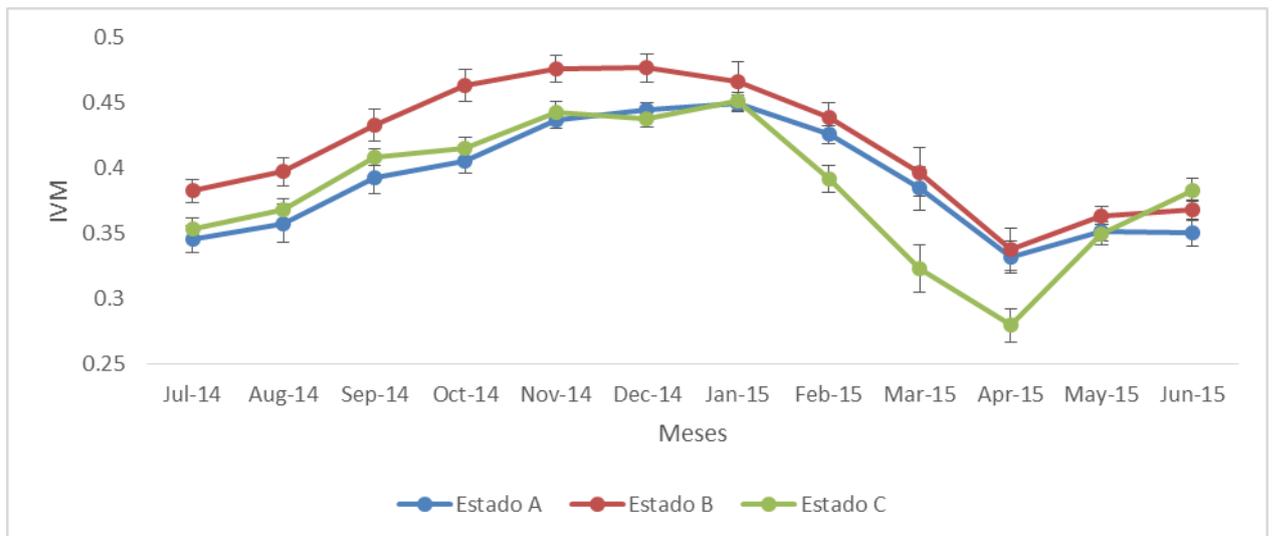


Figura 5: Dinámica mensual del Índice Verde Mejorado (IVM) para los 3 Estados de condición de la comunidad de Pastizales Densos de la Cuesta Basáltica. Las barras indican el error estándar.

Tabla 4: Comparación estadística entre Estados de condición de los valores mensuales del IVM para la comunidad de Pastizales Densos de la Cuesta Basáltica. Las letras diferentes significan diferencias significativas entre los Estados ($p < 0.05$).

Estados	jul-14	ago-14	set-14	oct-14	nov-14	dic-14	ene-15	feb-15	mar-15	abr-15	may-15	jun-15
A	a	a	a	a	a	a	a	a	ab	a	a	a
B	b	a	b	b	b	b	a	a	a	a	a	a
C	ab	ab	ab	a	ab	a	a	b	b	b	a	a

El análisis comparativo de los 4 atributos funcionales derivados del IVM para cada Estado de condición se muestra en la Figura 6. Se encontraron diferencias significativas para tres de los cuatro atributos considerados: IVN-I ($H_{IVM-I}=10.20202$, $p<0.001$), Valor Máximo ($H_{Max}=7.685325$, $p<0.05$) y Mínimo ($H_{Min}=9.820802$, $p<0.001$). No se encontraron diferencias significativas en el Rango Relativo ($H_{RR}=4.478195$, $p=0.1066$). El Estado B fue quien presentó los valores más elevados en la Integral Anual, Máximo y Mínimo IVM. Por otro lado, el Estado C es el que presenta el valor Mínimo en la Integral Anual presentando una diferencia significativa. En orden decreciente para los tres atributos se ubicaron los Estados A y C.

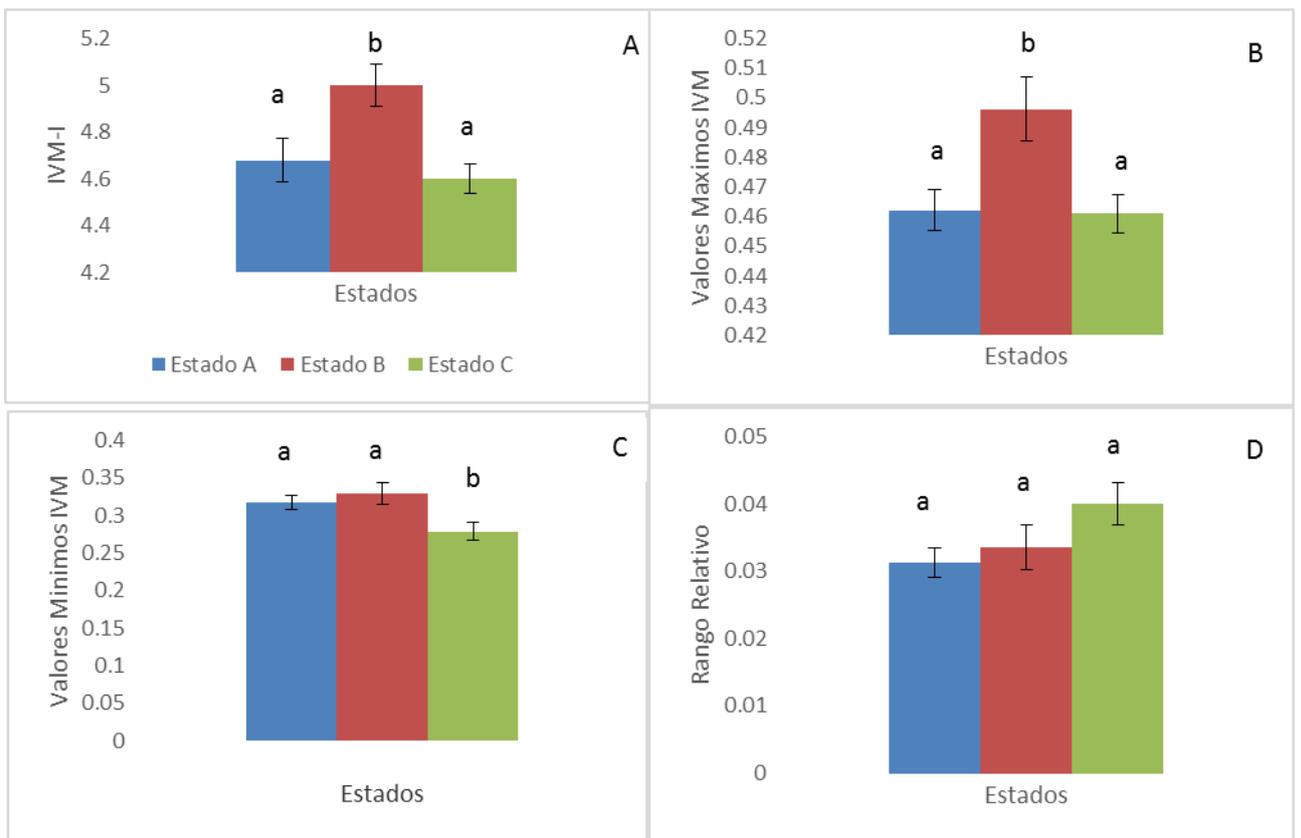


Figura 6: Atributos funcionales derivados de la dinámica mensual del IVM A) Integral Anual; B) Valor Máximo del Índice de Vegetación Mejorado, C) Valor Mínimo del Índice de Vegetación Mejorado y D) Rango Relativo, para los 3 Estados definidos para la comunidad de Pastizales Densos de la Cuesta

Basáltica. Las barras indican los errores estándar. Las letras (en minúscula) diferentes indican diferencias significativas entre los Estados ($p < 0.05$).

4. DISCUSIÓN

El presente trabajo caracteriza los Estados de condición de los pastizales de la Cuesta Basáltica, descritos a través de atributos estructurales de la vegetación, a través del análisis del funcionamiento ecosistémico. El uso de imágenes satelitales de alta resolución temporal permitió caracterizar el funcionamiento de los pastizales naturales y de los estados de condición identificados para cada comunidad en la Cuesta Basáltica. Los resultados mostraron cómo diferencias en el manejo pasado, dentro de cada comunidad de pastizal, puede traducirse en cambios importantes asociados a la dinámica estacional y anual en las ganancias de carbono, un atributo crítico y determinante de la provisión de servicios ecosistémicos como la disponibilidad de forraje y el secuestro de carbono (Paruelo y Lauenroth, 1995; Altesor et al. 2005; Paruelo et al. 2016).

4.1 Dinámica funcional de las comunidades de pastizal

El patrón observado a nivel mensual en el IVM para las dos comunidades de pastizal coincide, en términos generales, con los reportados por otros estudios realizados en la región Cuesta Basáltica (Baeza et al. 2010; Baeza et al. 2011 a). Los Pastizales Densos fueron más productivos que los Ralos durante 7 de los 12 meses analizados. El comportamiento estacional de las comunidades de pastizal mostró su pico de productividad en enero (inicio del verano). Esto pone en evidencia el comportamiento estival de los mismos, el cual concuerda con la dominancia de especies C_4 registrada para cada comunidad (Lezama et al. 2011). Por su parte, el menor crecimiento ocurrió en abril (otoño). Este resultado no coincide con lo reportado para la región, y se encuentra asociado a un evento climático que afectó durante el año de estudio la actividad fotosintética de estos pastizales. Durante los meses de marzo y abril de 2015 ocurrió un evento de sequía que afectó a la totalidad de territorio nacional. La disminución de agua en el suelo genera un gran impacto sobre la vegetación, disminuyendo sustancialmente la capacidad de intercambio gaseoso con la atmósfera y por tanto afectando la producción de forraje.

4.2 Análisis funcional de los estados de condición en Pastizales Ralos

A escala anual 3 de los 4 atributos descriptores del funcionamiento ecosistémico (productividad anual, los valores de Máximo y Mínimo IVM) analizados para los estados de condición en Pastizales Ralos no mostraron diferencias significativas, el único que presentó diferencias significativas fue el Rango Relativo. Frente a la sequía el Estado C se ve afectado, disminuyendo significativamente el IVM en los meses de febrero a abril, donde llega a su mínimo. Si bien los Estados B y D también se ven afectados por la sequía tienen mayor capacidad de recuperarse, mientras que el Estado C presenta una recuperación más lenta. A su vez, se detectaron diferencias cuando se analizó la trayectoria mensual del IVM. Las diferencias correspondieron a dos momentos particulares, el invierno (julio 2014) y el otoño (marzo-junio 2015). En el mes de julio 2014 el Estado D fue el estado con mayor actividad fotosintética. Este resultado puede estar asociado a ciertos atributos estructurales que los caracterizan. Por un lado, el estado D presenta un sólo estrato herbáceo de escasa altura (3-5 cm), asociado a una carga animal elevada (sobrepastoreo). Por otro lado, el estado A presenta dos estratos, uno herbáceo de 10 cm de altura y otro sub-arbustivo de 40 cm aproximadamente. La elevada intensidad de cosecha por parte del ganado genera que prácticamente no exista material senescente en el estado D, permitiendo que la totalidad de la energía incidente quede disponible para el material vegetal activo fotosintéticamente (Di Bella et al., 2004; Paruelo et al., 2008). Asimismo, las diferencias funcionales entre el estado A y D pueden deberse a la composición diferencial de los Tipos Funcionales de Plantas. El estado D presenta una mayor proporción de Gramíneas invernales anuales lo cual estaría aportando vegetación fotosintéticamente activa durante los meses de invierno.

Durante el otoño de 2015 ocurrió un evento de sequía que afectó el funcionamiento de los pastizales. Los datos colectados por la unidad GRAS del INIA mostraron que la precipitación efectiva en el verano de 2014-2015 y otoño de 2015 estuvieron 89 y 68% por debajo del promedio histórico (2010-2015) (GRAS-INIA, 2016). Durante estos meses los Estados A y B mantuvieron su productividad, siendo C y D los más afectados por este factor de estrés. Este comportamiento podría explicarse por la presencia en A y B de un segundo estrato más alto de vegetación subarbustiva que podría estar generando condiciones microclimáticas favorables como disminución de temperatura y de velocidad del viento, disminuyendo así la evaporación de agua. Asimismo, la mayor cobertura vegetal y la presencia

de subarbustos podrían favorecer una mayor exploración radicular y en consecuencia mayor acceso al agua (Anderson, 1983; Fernández et al. 2014). Este resultado indica que estos dos Estados presentan mayor resiliencia frente a la sequía.

4.3 Análisis funcional de los estados de condición de la comunidad de pastizales Densos

A diferencia de los Pastizales Ralos, los Estados correspondientes a los Pastizales Densos mostraron mayores diferencias en el comportamiento funcional. Las diferencias encontradas se presentan fundamentalmente entre el estado B y los estados A y C y estarían vinculadas, al igual que en el caso de los Pastizales Ralos, a características estructurales de la vegetación. El estado B presenta un sólo estrato herbáceo de 10 cm de altura, mientras que los estados A y C están caracterizados por la presencia de dos estratos, uno herbáceo de 5-10 cm y otro subarbusivo de 30-40 cm (informe FPTA 305, 2016). Estas diferencias estructurales estarían marcando una mayor acumulación de material senescente, el cual es fotosintéticamente inactivo, en los estados A y C, lo que estaría generando diferencias en el funcionamiento ecosistémico (Di Bella et al. 2004; Paruelo et al. 2008). Por otro lado, el estado C fue el más afectado por la sequía, lo cual se corresponde con el elevado porcentaje de suelo desnudo y la baja altura en el estrato herbáceo. Ambas condiciones generadas por una excesiva carga de ganado (Anderson, 1983)

Los descriptores del funcionamiento ecosistémico analizados mostraron diferencias significativas entre los estados de los pastizales para tres de los cuatro atributos analizados a escala anual. Las diferencias encontradas estarían asociadas fundamentalmente a características estructurales y a la abundancia de los TFP de cada estado. El estado B fue quien presentó mayor productividad anual y elevados Valores de Máximo y Mínimo en el IVM. La presencia de un solo estrato gramíneo de 10 cm de altura, con una elevada proporción de material verde (98% de cobertura vegetal) y un alto porcentaje de gramíneas estaría determinando la elevada actividad fotosintética durante el año analizado. Los estados A y C mostraron un comportamiento similar y con valores menores al estado B para los atributos analizados. Sin embargo, ante un evento de sequía, como el registrado en el verano-otoño de 2015, la mayor cobertura del segundo estrato y el menor porcentaje de suelo desnudo, permitió al estado A

tener valores más cercanos al estado B. Por su parte, el estado C se vio más afectado por este evento climático al tener menor cobertura del segundo estrato y mayor porcentaje de suelo desnudo. Si bien, los Estados A y C presentan dos estratos, la altura de estos para el Estado C es mucho menor (5 y 33 cm, respectivamente). A su vez, este Estado está caracterizado por la elevada proporción de suelo desnudo, lo que repercute de manera desfavorable en la respuesta ante un evento climático extremo. El Rango Relativo (estacionalidad de los ecosistemas) fue el único atributo para los tres estados que no presentó diferencias significativas. Como se menciona anteriormente, las características estructurales y la proporción relativa de TFP de cada estado estarían generando actividades fotosintéticas que varían a lo largo del año, lo que se traduce en una estacionalidad anual similar en cada estado.

Las diferencias en los atributos descriptores del funcionamiento ecosistémico, a escala anual, para los Pastizales Ralos y Densos mostraron un comportamiento diferencial, es decir, no siguieron el mismo patrón. Por un lado, los Pastizales Densos mostraron diferencias en la Integral Anual, Máximos y Mínimos del IVM, mientras que, por otro, los Pastizales Ralos mostraron diferencias significativas únicamente en el Rango Relativo. Esto podría estar relacionado con factores ambientales, tales como las características del suelo sobre la que se encuentran los pastizales. Los Pastizales Ralos se ubican preferentemente sobre suelos superficiales, donde la capacidad de retener el agua es menor por la presencia de rocosidad y pedregosidad. Esto estaría provocando que en períodos de escasez de agua (sequía) y de alta radiación incidente, la comunidad herbácea sea afectada drásticamente disminuyendo la actividad fotosintética. Este factor estaría generando diferencia en la estacionalidad (Rango Relativo). Por su parte, los Pastizales Densos se ubican sobre suelos profundos en donde existe una mayor capacidad de retención de agua. Por ello, durante las épocas de sequía, la vegetación herbácea no se verá tan afectada ya que las raíces pueden acceder al dicho recurso. Este hecho, asociado a las características estructurales de los estados definidos, estaría generando diferencias tanto en la productividad anual como en los valores de máxima y mínima actividad fotosintética.

5. CONCLUSIONES

La caracterización estructural y funcional de los estados de condición de los pastizales naturales es un paso fundamental para el manejo en sistemas ganaderos extensivos. Este trabajo permitió poner en evidencia que cambios sutiles en la estructura de la vegetación pueden repercutir en el funcionamiento de los ecosistemas, particularmente aquellos atributos relacionados a las ganancias de carbono.

La caracterización funcional de los pastizales mediante imágenes satelitales permitió detectar diferencias entre estados de la vegetación que son resultado de manejos diferenciales, carga, frecuencia de pastoreo y relación lanar/vacuno. Este análisis evidenció cuáles son los Estados con mayor resiliencia frente a los eventos climáticos. El uso de los índices de vegetación constituye una herramienta económica, tanto a nivel de costos como de tiempo, que brinda información sumamente importante para las decisiones de manejo. Poder combinar la caracterización funcional y estructural será de suma importancia para la toma de decisiones en el futuro.

6. AGRADECIMIENTOS

A Fede por apoyarme, guiarme y brindarme su tiempo y paciencia. Por su dedicación y calidez.

A Alice por abrirme las puertas y apoyarme en todo momento.

A los integrantes de Ecología de Pastizales por permitirme compartir con un grupo humano tan lindo.

A mis amigas y amigos que estuvieron al firme en estos años.

A mi familia por el apoyo incondicional y la motivación para que termine esta etapa.

A Jorge por estar a mi lado en todo momento, compartir mates y horas de estudio y por sobre todo ser mi compañero en este camino.

A mis padres que me apoyaron y estimularon para que lograra este objetivo

A mis hijos, Franco, Sofía y Luciano, que comprendieron la importancia que esto tenía para mí y respetaron mis tiempos de estudio y se preocuparon.

Al tribunal por leer el informe y por sus invalorable aportes.

A todos los que estuvieron a mi lado gracias

7. BIBLIOGRAFIA

- Altesor, A.; Oesterheld, M.; Leoni, E.; Lezama, F.; Rodríguez, C. 2005. Effect of grazing on community structure and productivity of a Uruguayan grassland. *Plant Ecology*. 179; 83-91.
- Anderson, D.L. 1983. Producción Animal, Buenos Aires, Argentina. 10; 3-22.
- Ayala, W. 2011. Los desafíos de la ganadería en los pastizales del Río de la Plata. En: Altesor A, Ayala W, Paruelo JM [Eds.]. Bases ecológicas y fisiológicas para el manejo de los pastizales naturales. Serie FPTA N°26, INIA, Montevideo. 26; 209-214.
- Baeza, S.; Gallego, F.; Lezama, F.; Altesor, A. y Paruelo, J.M. 2011 a. Cartografía de los pastizales naturales en las regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas, en: Bases ecológicas y fisiológicas para el manejo de los pastizales naturales. Eds. Altesor, A., Ayala W. y Paruelo, J.M. Serie FPTA N°26, INIA, Montevideo. 26; 33-54.
- Baeza, S.; Paruelo, J.M, y Lezama, F. 2011 b. Caracterización funcional en pastizales y sus aplicaciones en Uruguay, en: Bases ecológicas y fisiológicas para el manejo de los pastizales naturales. Eds. Altesor, A., Ayala W. y Paruelo, J.M. Serie FPTA N°26, INIA, Montevideo. 26; 163-182.
- Baeza, S.; Lezama F.; Piñeiro G.; Altesor A.; y Paruelo, J.M. 2010. Spatial variability of above-ground net primary production in Uruguayan grasslands: a remote sensing approach. *Applied Vegetation Science* 13; 72-85.
- Chapin, F.S.; Matson, P.A.; Vitousek P.M. 2002. Principles of terrestrial ecosystem ecology. *Springer*. New York.
- Chuvieco E. 2002. Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Editorial Ariel, Barcelona, España.
- Di Bella, C.M.; Paruelo, J.M.; Becerra, J.E.; Bacour, C.; Baret, F. 2004. Effect of senescent leaves on NDVI-based estimates of fAPAR: Experimental and modelling evidences. *International Journal of Remote Sensing*. 25; 5415-5427.
- DIEA-MGAP, 2000. Censo General Agropecuario Agropecuario 2000, DIEA, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, Uruguay.

DIEA-MGAP, 2011 Censo General Agropecuario 2011, DIEA, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, Uruguay.

Fernández, G; Texeira, M; Alterosr, A. 2014. The small scale spatial pattern of C3 and C4 grasses depends on shrub distribution. *Austral Ecology*, 39; 532-539.

Fisher, B.; Turner, R.K.; Morling, P. 2009. Defining and classifying ecosystem service for decision making. 8; 643-653.

GRAS-INIA, 2016. Agroclima y sistemas de información. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Estación experimental Tacuarembó.

Holling, C.S. 1973. Resilience and stability of ecological system. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 4; 1-23.

Informe INIA-FPTA 305 (2014-2017) Caracterización de estados del campo natural en sistemas ganaderos de Uruguay: Definición y uso de indicadores de condición como herramientas de manejo - Proyecto FPTA 305, Financiado por INIA.

INIA-FPTA 305 (2014-2017) Caracterización de estados del campo natural en sistemas ganaderos de Uruguay: Definición y uso de indicadores de condición como herramientas de manejo - Proyecto FPTA 305, Financiado por INIA.

Lattera, P.; Vignolio, O.R.; Hidalgo, L.G.; Fernández, O.N.; Cauhépé, M.A.; Maceira, N.O. 1998. Dinámica de pajonales de pajas colorada (*Paspalum* spp) manejados con fuego y pastoreo en la pampa deprimida Argentina. *Ecotropicos*. 11; 141-149.

León, R.J.C.; Burkart, S.E. 1998. El pastizal de la pampa deprimida: Estados Alternativos. *Ecotrópicos*. 11; 121-130.

Lezama, F.; Altesor, A.; León, R.J.; Paruelo, J.M. 2006. Heterogeneidad de la vegetación en pastizales naturales de la región basáltica de Uruguay. *Ecología Austral*. 16; 167-182.

Lezama, F.; Altesor, A.; Pereira, M. y Paruelo, J.M. 2011. Descripción de la heterogeneidad florística en los pastizales naturales de las principales regiones geomorfológicas de Uruguay, En: Altesor A, Ayala W, Paruelo JM [Eds.]. Bases ecológicas y fisiológicas para el manejo de los pastizales naturales. Serie FPTA N°26, INIA, Montevideo. 26; 15-32.

López, D.; Bran DE.; Siffredi G.L. 2009. Modelos de estados y transiciones: un enfoque para el manejo y recuperación de los pastizales naturales patagónicos. *Presencia*. 53; 21-25.

Milchunas, D.G.; Lauenroth, W.K.; 1995. Inertia in plant community structure: state changes after cessation of nutrient-enrichment stress. *Ecological Society of America*. 5; 452-458.

Navarrete, D. M.; Gallopín, G. C.; Blanco, M.; Díaz-Zorita, M.; Ferraro, D. O.; Herzer, H.; Littera, P.; Murmis, M.R.; Podestá, G.P.; Rabinovich, J.; Satorre, E.H.; Torres, F.; Viglizzo, E.F. 2009. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas. *Environ Dev Sustain*. 11; 621-638.

Oesterheld, M.; Salas O.E. 1994. Modelos ecológicos tradicionales y actuales para interpretar la dinámica de la vegetación. El caso del pastizal de la Pampa Deprimida. *Rev. Arg. Prod. Anim*. 14; 9-14.

Panario D. 1988. Geomorfología del Uruguay. Facultad de Humanidades y Ciencias, Uruguay. 44.

Paruelo, J.M.; Texeira, M.; Staiano, L.; Mastrángelo, M.; Amdam, L.; Gallego, F. 2016. An integrative index of ecosystem services provision based on remotely sensed data. *Ecological Indicators*. 71; 145-154.

Paruelo, J.M. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*. 17; 4-22.

Paruelo, J.M.; Putz, S; Weber, G; Bertiller, M; Golluscio, R.A; Aguiar, M.R; Wiengand, T. 2008. Long-term dynamics of a semiarid grass steppe under stochastic climate and different grazing regimes: A simulation analysis. *Journal of Arid Environments*. 72; 2211-2231.

Paruelo, J.M.; Lauenroth, W.K. 1995. Regional patterns of normalized difference vegetation index in North American shrubland and grasslands. *Ecology*. 76; 1888-1898.

Pereira, M. 2013. Using participatory research, remote sensing and field surveys to build a state and transition model for the native pastures of northern Uruguay, in 22nd International Grassland Congress, Sidney New South Wales Australia. Revitalising grasslands to sustain our communities. 22nd congress proceedings. DL Michalk, GD Millar, WB Badgery & KM Broadfoot (editors). 1084-1088.

- Prince, S.D. 1991. Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981-1988. *International Journal of Remote Sensing*. 12; 1301-1311.
- Pucheta, E.; Cabido, M.; Díaz, S. 1997. Modelo de estados y transiciones para los pastizales de altura de las sierras de Córdoba, Argentina. *Ecotropicos*. 10; 151-160.
- Running, S.W.; Thomson, P.E.; Nemani, R.R.; Glassy, J.M.; Sala, O.E.; Jackson, R.B.; Mooney, H.A.; Howarth, R.W. 2000. Global Terrestrial Gross and Net Primary Productivity from the Earth Observing System. *Methods in Ecosystem Science*, Springer-Verlag; New York, USA. 44-57.
- Sellers, P.J.; Berry, J.A.; Collatz, G.J.; Field, C.B. y Hall, F.G. 1992. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sensing of Environment*. 42; 187-216.
- Stringham, T. K.; Krueger, W. C.; Shaver, P. J. 2001. States, transitions, and thresholds: Further refinement for rangeland applications. *Agricultural Experimental Station Oregon State University, Special Report 1024*.
- Soriano, A. 1992. Río de la Plata Grasslands. *Coupland R.T.*, ed., Natural Grasslands. Introduction and Western Hemisphere. Elsevier, Amsterdam, NL. 367-407.
- Westoby, M.; Walker, B.; Noy-Meir, I. 1989. Opportunistic management for rangelands not at equilibrium. *Journal of Range Management*. 42; 266-274.

ANEXO 1**Listado indicadores estructurales**

Tabla 1: Indicadores estructurales obtenidos en Caracterización de estados del campo natural en sistemas ganaderos de Uruguay: Definición y uso de indicadores como herramientas de manejo (tomado del Informe I FPTA 305).

Nº	Indicador estructural
1	% de suelo desnudo
2	% de cobertura de especies anuales
3	% de cobertura de especies invasoras (lista de especies exóticas consideradas amenazas debido a su potencial de invasión)
4	Índice obtenido a partir de la relación entre el % de cobertura de graminoides (gramíneas, cyperáceas y juncáceas) y de hierbas
5	Número de estratos de la vegetación
6	Altura de cada estrato
7	Cobertura de cada estrato
8	Especies dominantes de cada estrato (especies cuyas coberturas superan el 50% de la cobertura total)
9	Presencia de especies decrecientes frente al pastoreo (especies de plantas de pastizal cuya frecuencia disminuye de manera significativa en régimen de pastoreo por ganado doméstico)