

Caracterización funcional de la Estepa Magallánica y su transición a Matorral de Mata Negra (Patagonia Austral) a partir de imágenes de resolución espacial intermedia

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,
Área Recursos Naturales*

Paula Paredes

Ingeniera en Recursos Naturales Renovables -
Universidad Nacional de la Patagonia Austral - 2001

Lugar de trabajo: INTA- EEA Santa Cruz



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Carlos Di Bella

Ingeniero Agrónomo (UBA)

Doctor del Institut National Agronomique Paris-Grignon (Paris-Francia)

Consejero de Estudios

Ariela Cesa

Ingeniera Agrónoma (UBA)

Magister de la UBA (área recursos naturales)

Gabriel Oliva

Lic. en Ciencias Biológicas (UBA)

Dr. en Ciencias Biológicas (UBA)

JURADO DE TESIS

Director de tesis

Carlos Di Bella

Ingeniero Agrónomo (UBA)

Doctor del Institut National Agronomique Paris-Grignon (Paris-Francia)

JURADO

Héctor Francisco del Valle

Ing. Agr. (Universidad Nacional del Sur)

Dr. en Agr. (Universidad Nacional del Sur)

JURADO

Néstor Ignacio Gasparri

Ing. Ftal. (Universidad Nacional de La Plata)

Doctor en Biología (UNT)

Fecha de defensa de la tesis: 15 de AGOSTO de 2011

Declaración

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

Paula Paredes

Agradecimientos

Al INTA, institución que financió esta capacitación.

A mi Director y consejeros, por la eterna paciencia en mostrarme el camino que concluyó en esta tesis.

A Liliana y Pablo, por hacerme más aliviado el trabajo diario y alentarme siempre en avanzar.

A la gente que me acompañó a las salidas de campo, en “horas eternas” de medición y corte de “pasto”: Ariela, Daniela, Liliana, Gabriel, Gervasio, Emilio, Pablo y Diego.

A los productores, quienes pusieron su campo a disposición para el muestreo.

A mis amigos por estar *ahí*.

A mis compañeros por las tomadas de mate para poder arrancar el día.

A mi familia por *ser y estar*.

Y a todos quienes de alguna manera estuvieron involucrados.

A todos ellos....*GRACIAS... TOTALES!*

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-------------|
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xiii |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | xvi |
| Lista de abreviaturas y siglas..... | xvii |
| Resumen..... | xix |
| Abstract..... | xx |
| Capítulo 1. Introducción General..... | 1 |
| <i>Introducción General.....</i> | <i>3</i> |
| <i>Objetivos y organización de la tesis.....</i> | <i>7</i> |
| Capítulo 2. Caracterización estructural de la vegetación | 9 |
| <i>Introducción.....</i> | <i>11</i> |
| <i>Materiales y métodos.....</i> | <i>14</i> |
| Descripción del área de estudio | 14 |
| Muestreo de la vegetación | 15 |
| Análisis de datos | 20 |
| <i>Biomasa.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Cobertura.....</i> | <i>21</i> |
| <i>Riqueza, Diversidad y Equitatividad</i> | <i>21</i> |
| <i>Determinación de comunidades.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Resultados.....</i> | <i>23</i> |
| Biomasa..... | 23 |
| Cobertura..... | 24 |
| Riqueza, Diversidad y Equitatividad | 27 |
| Determinación de comunidades | 28 |
| <i>Discusión.....</i> | <i>34</i> |
| Capítulo 3. Caracterización espectral de las áreas ecológicas Estepa Magallánica Seca y la transición a Matorral de Mata Negra | 37 |
| <i>Introducción.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Materiales y métodos.....</i> | <i>41</i> |
| Selección y tratamiento de las imágenes | 41 |
| Análisis de la variación espacio temporal de la información espectral..... | 43 |
| <i>Resultados.....</i> | <i>46</i> |
| 1. Dinámica funcional de la EMS y MMN | 48 |
| 2. Determinación de la estación de crecimiento | 55 |
| <i>Discusión.....</i> | <i>59</i> |
| Capítulo 4. Relación entre los diferentes índices espectrales y la vegetación..... | 63 |
| <i>Introducción.....</i> | <i>65</i> |
| <i>Materiales y métodos.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Resultados.....</i> | <i>69</i> |

| | |
|--|------------|
| <i>Discusión</i> | 74 |
| Capítulo 5. Discusión final | 83 |
| Bibliografía | 89 |
| ANEXO | 101 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. 1. Comportamiento espectral de una cobertura vegetal sana (Chuvieco, 1995). | 5 |
| Figura 1. 2. Carga animal de ovinos por área ecológica de la provincia de Santa Cruz. (RG= Región del Golfo, MMN= Matorral de Mata Negra, DCP= Distrito Central Patagónico, SMO= Sierras y Mesetas Occidentales, PS= Pastizales Subandinos, CA= Complejo Andino, EMS= Estepa Magallánica Seca y EMH= Estepa Magallánica Húmeda). (Fuente: (Borrelli et al., 1997). | 7 |
| Figura 2.1. a) Mapa de Regiones Ecológicas Homogéneas (Fuente (INTA, En Prensa)) y b) de Distribución de los puntos de muestreo en las dos áreas ecológicas bajo estudio. | 12 |
| Figura 2. 2 Estratificación de la vegetación en las áreas ecológicas al sur de la provincia de Santa Cruz. | 13 |
| Figura 2. 3 a) Esquema de muestreo para la determinación de biomasa en el área de Estepa Magallánica y b) muestreo en el área de ecotono a Matorral de Mata Negra. Tamaño de marco: 0,2m ² . | 19 |
| Figura 2.4. Cobertura vegetal (■), de suelo desnudo (□) y de mantillo (▣) de los sitios muestreados en a) Estepa Magallánica Seca y b) Matorral de Mata Negra. La línea horizontal indica el promedio de cobertura vegetal de cada área ecológica. | 25 |
| Figura 2. 5. Cobertura vegetal relativa, por forma de vida: intercoironal (▣), coirones (■), subarbustos (▣) y arbustos (□), para las dos áreas ecológicas estudiadas a) EMS y b) MMN. La línea horizontal indica el promedio de cobertura vegetal del estrato dominante en cada área ecológica, es decir, en a) es la cobertura promedio del estrato intercoironal y en b) la cobertura promedio del arbustivo. | 26 |
| Figura 2. 6. Diámetro (barras) y altura (línea) promedio de los sitios de MMN, empleando Canfield. | 27 |
| Figura 2.7. Índice de diversidad de Shannon (H) (barras grises) y Equitatividad (J) (línea) para los sitios de a) Estepa Magallánica Seca y b) Matorral de Mata Negra. | 28 |
| Figura 2.8. Dendrogramas del análisis de agrupamiento de la matriz de cobertura por especie, para el área de a) EMS y b) MMN. | 30 |
| Figura 2.9. Ordenación los dos primeros ejes de la matriz de especies por sitios de a) EMS y b) MMN. RIQ= riqueza. Cobertura: MAN= Mantillo, SUD= Suelo desnudo, VEG= Vegetal, H= Hierbas, P= pastos, C= coirones, S= subarbustos, A= arbustos, L= líquenes. Biomasa: I=Intercoironal, C= Coironal, S= Subarbustivo, A= Arbustivo; fracciones: (v)= verde, (s)= seco. Variables ambientales: msnm= altura sobre el nivel del mar, mm= precipitación media anual, Distmar= distancia al mar. | 32 |
| Figura 3.1. Esquemización de los atributos estudiados en la curva de Índices de Vegetación, donde el área sombreada corresponde a la Integral Anual de IV y MMax= Momento del valor Máximo y RRel= Rango Relativo. | 43 |
| Figura 3. 2. Atributos de los Índices de Vegetación (NDVI y EVI), empleados en la caracterización de las áreas ecológicas. Las barras grises corresponden a EMS y las | |

negras a MMN. RREL= Rango Relativo. Las barras corresponden a un error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$), entre tipos de vegetación. 48

Figura 3. 3. Relación entre Rango Relativo (RREL) e Integral (I) de a) NDVI y b) EVI. Puntos grises corresponden a sitios de EMS y puntos negros a sitios de MMN. 49

Figura 3.4. Variación dentro de cada área ecológica del promedio anual (Integral Anual General) de los índices de vegetación en a) Estepa Magallánica Seca y en b) Matorral de Mata Negra. Las barras verticales corresponden a un error estándar. 50

Figura 3. 5. Serie temporal de valores promedios mensuales de a) NDVI, b) EVI, para las temporadas de crecimiento analizadas. La línea de color gris corresponde a EMS y la negra a MMN. La línea horizontal representa la integral promedio general para cada área ecológica. 52

Figura 3. 6. Comportamiento anual de a) NDVI y b) EVI para EMS (gris) y MMN (negro). Nótese el comportamiento bimodal de NDVI. En gris EMS y en negro MMN. Asteriscos indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tipos de vegetación. 54

Figura 3. 7. Variación relativa mensual (entre años) de la dinámica anual de a) NDVI y b) EVI para EMS (gris) y MMN (negro). 55

Figura 3. 8. Inicio y Finalización de la estación de crecimiento estimada de acuerdo a White et al. (1997) para a) NDVI y b) EVI en EMS (gris) y MMN (negro). MI= Momento de Inicio y MF= Momento de Finalización. Las líneas horizontales corresponden al umbral (calculado como $\text{Umbral} = (\text{máximo}_{\text{anual}} + \text{mínimo}_{\text{anual}})/2$). 56

Figura 3. 9. Inicio y Finalización de la estación de crecimiento calculado de acuerdo a Jóbbagy et al.(2002) para a) NDVI y b) EVI en EMS (gris) y MMN (negro). MI= Momento de Inicio y MF= Momento de Finalización. Las líneas horizontales corresponden a umbral (calculado como $\text{Umbral} = (\text{máximo}_{\text{anual}} - \text{mínimo}_{\text{anual}}) * 0.25$). . 58

Figura 3. 10. Evolución anual de tres variables relacionadas con el comportamiento vegetal en la Estepa Magallánica Seca: Temperatura Superficial (TS), NDVI y NDWI. Valores promedio de la serie 2003-2010. La línea horizontal corresponde al umbral para establecer el crecimiento (White et al., 1997). 61

Figura 4.1. Regresiones lineales simples al analizar EMS y MMN en conjunto. 71

Figura 4.2. Regresiones lineales simples entre NDVI y biomasa y cobertura vegetal en a, b, c, d y e) EMS y f) MMN 72

Figura 4. 3. Estimación para el mes de diciembre del 2010 de la Biomasa Total [KgMS/Ha] en la Estepa Magallánica Seca. Modelo aplicado: $\text{Biomasa total} = -939,24 + 5636,59 \text{ NDVI}$. $R^2 = 0,52$ 75

Figura 4. 4. Estimación para el mes de diciembre del 2010 de la Biomasa del estrato Intercoironal Verde [KgMS/Ha] en la Estepa Magallánica Seca. Modelo aplicado: $\text{Biomasa Intercoironal Verde} = -97,52 + 519,21 \text{ NDVI}$. $R^2 = 0,19$ 77

Figura 4. 5. Receptividad estimada (en EOP) para el mes de diciembre del 2010, en la Estepa Magallánica Seca, utilizando como base el mapa de biomasa total para el mismo mes. 79

Figura 4. 6. Receptividad estimada (en EOP) para el mes de diciembre del 2010, en la Estepa Magallánica Seca, utilizando como base el mapa de biomasa verde del estrato intercoironal para el mismo mes. 80

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1. Ubicación y principales características de los sitios de muestreo | 17 |
| Tabla 2.2. Biomasa promedio (KgMS/ha) por estrato, para cada área ecológica, separada en material verde y seco. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$)..... | 24 |
| Tabla 2.3. Coeficientes de correlación de Pearson, para el análisis de correspondencia y la matriz secundaria (cobertura y biomasa por forma de vida y variables ambientales). s/d= variables no corresponden al área ecológica..... | 33 |
| Tabla 3.1. Principales índices de vegetación citados en la literatura (modificada de Wan (1999) y Gilabert et al. (2002))..... | 42 |
| Tabla 3.2. Coeficientes de correlación de Pearson entre los diferentes índices y bandas en a) EMS y b) MMN. | 47 |
| Tabla 3.3. Momento de máximo y mínimo para todas las temporadas (2003-2010) | 52 |
| Tabla 3.4. Integral Anual y los 3 valores máximos y mínimos (y momento de ocurrencia) de NDVI y EVI para la serie analizada (2003-2010). | 53 |
| Tabla 4.1. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de vegetación e información espectral (bandas e índices calculados) considerando ambos ambientes en conjunto (EMS y MMN) y analizando solo EMS. | 70 |

Lista de abreviaturas y siglas

AC: Análisis de Correspondencia
ANOVA: Análisis de Varianza (Analysis of Variance)
ds: Desvío Estándar
EMS: Estepa Magallánica Seca
EVI: Enhanced Vegetation Index
IAF: Índice de Área Foliar
IPVI: Infrared Percentage Vegetation Index
IRC: Infrarrojo Cercano
IRM: Infrarrojo Medio
IV's: índices de vegetación
Ln: Logaritmo natural
MMN: Matorral de Mata Negra
MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSAVI: Modified SAVI
NDVI: Normalized Difference Vegetation Index
NDWI: Normalized Difference Water Index
NOAA/AVHRR: National Oceanic and Atmospheric Administration/Advanced Very
High Resolution Radiometer
OSAVI: Optimized SAVI
PCA: Análisis de Componentes Principales
PPNA: Productividad Primaria Neta Aérea
RVI: Ratio Vegetation Index
SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index
TFP: Tipo Funcional de Plantas
TS: temperatura superficial

Resumen

La PPNA es indicadora de la biomasa disponible y se relaciona con la capacidad de carga de los sistemas pastoriles extensivos. Es posible estimarla a partir de índices de vegetación obtenidos de sensores remotos. El objetivo de esta tesis fue caracterizar funcional y estructuralmente una estepa gramínea (Estepa Magallánica Seca-EMS) y una arbustiva (Matorral de Mata Negra-MMN) de la Patagonia Austral. En 18 sitios se midió cobertura vegetal (2004 y 2010) y biomasa por estratos (2004 y 2005). Se obtuvieron 8 índices de vegetación a partir de imágenes MODIS (resolución 16 días, 250m, 2003-2010). Se caracterizaron las comunidades vegetales (PCA). Se extrajeron los índices en áreas de 3x3 píxeles y correlacionaron con la biomasa y cobertura medidas a campo. Ambas áreas están dominadas por especies perennes con una cobertura de 66%. En MMN la mitad de este valor corresponde a arbustos. La biomasa aérea total fue de aproximadamente 1000 Kg MS/ha en EMS y el triple en MMN, en ambos casos un 33% corresponde a material verde. Los índices presentan patrones temporales similares entre áreas, con un máximo a fines de octubre, aunque NDVI y RVI mostraron un segundo pico en abril. El MMN posee mayor biomasa pero los índices fueron 20% menores que EMS. El NDVI caracterizó mejor la vegetación de la EMS, con correlaciones de 0,69, 0,43 y 0,48 con la fracción verde de biomasa total, intercoironal y coironal, respectivamente. Reflejó además el crecimiento otoñal característico de ambientes con régimen isohigro, limitados por temperatura y humedad. Por el contrario, en el MMN, los índices espectrales y los indicadores de biomasa no correlacionaron. Los valores de regresión obtenidos indican que la evaluación de biomasa disponible a partir de sensores remotos es solo posible en uno de los ecosistemas y muestran que para estimar la receptividad, sería necesaria una calibración local de los índices, dado que la estructura de la vegetación modifica los valores espectrales.

Palabras claves: PPNA; índices de vegetación; MODIS; estructura de la vegetación

Abstract

The ANNPP is an indicator of the available biomass and is related to the carrying capacity of extensive production systems. It is possible to estimate it using vegetation indexes drawn from remote sensors. The objective of this thesis was to characterize function and structure of two vegetation units of south Patagonia: A grass steppe (Dry Magellan Steppe EMS) and a shrub-steppe (Mata Negra Shrubland MMN). In 18 sites vegetation cover (2004 and 2010) and biomass (2004 and 2005) was estimated. Eight vegetation indexes were calculated using MODIS images (resolution 16 days, 250 m, between 2003-2010). Vegetation communities were analyzed using PCA. Index values were extracted for 3x3 pixel windows and correlated with biomass and cover estimated in the field. Both areas are dominated by perennial species with a similar cover of 66%. In MMN, shrubs represent half of this cover. Aerial biomass was about 1000 Kg MS/ha in EMS, and three times higher in MMN. The proportion of green biomass was 33% in both cases. Indexes presented similar temporal patterns, with a maximum in late October, although NDVI and RVI showed a second peak in April. Although MMN had greater aerial biomass, index values were about 20% lower than EMS. The NDVI was the index that better described the vegetation of EMS, with correlation coefficients of 0.69, 0.43 y 0.48 with green fractions of total, short grasses, and tussock biomass respectively. It reflected also the autumn growth that is characteristic of climates with evenly distributed rainfall and limited by temperature and humidity. The regression values indicate that it is possible to evaluate the biomass availability from remote sensors is only possible in one of the ecosystems and that carrying capacity estimations need local adjustments because the structure of the vegetation modified the spectral values.

Keywords : ANPP, vegetation indexes, MODIS; vegetation structure

Capítulo 1. Introducción General

Introducción General

La Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) es uno de los flujos energéticos más importantes en todo ecosistema, ya que establece la entrada de energía disponible para los otros niveles tróficos (Odum, 1971), y determina aspectos funcionales del sistema (Mc Naughton et al., 1989). En el caso de los sistemas extensivos de pastoreo, la estimación de la disponibilidad forrajera es un factor determinante para una correcta evaluación de la capacidad de carga de los campos (Oosterheld *et al.*, 1992). La PPNA es una indicadora de la disponibilidad forrajera. Una estimación de la productividad facilita la determinación de la cantidad de animales que es capaz de sustentar el ecosistema, especialmente en zonas áridas o semiáridas en donde los pastizales son fuente casi exclusiva de alimento (Soriano, 1956).

La PPNA de los pastizales y su variación interanual se encuentran íntimamente ligadas a la cantidad y distribución de las precipitaciones anuales (Lauenroth, 1979). La precipitación junto con otros elementos del clima determinan la distribución regional de tipos de pastizales, la composición de especies (Odum, 1971), las formas de vida de la vegetación y la variación interanual de la PPNA (Hill et al., 2004; Sala et al., 1997; Solbrig et al., 1977). El estudio de las bases de datos climáticos y la estimación de productividad primaria mediante cortes, han permitido establecer relaciones generales entre estas variables a lo largo de un gradiente de precipitación (Sala et al., 1988). Sin embargo, estudios posteriores muestran que el análisis temporal de la productividad primaria resulta impreciso, ya que puede sobre o subestimar la productividad anual calculada a partir de las precipitaciones medias (Lauenroth *et al.*, 1992). En ambientes áridos y semiáridos, como se dijo anteriormente, la variabilidad en la precipitación media es mayor que en ambientes húmedos (Noy-Meir, 1973; Paruelo *et al.*, 1998b). Por otra parte, la variación en la PPNA puede responder adicionalmente a la temperatura y su interacción con las precipitaciones (Jobbagy *et al.*, 2000) han mostrado, para el Distrito Occidental de Patagonia, que existen diferencias en la variación de la PPNA en respuesta a la precipitación, según se trate de pastos o arbustos. La temperatura es considerada como variable explicatoria si en lugar del análisis anual se realiza uno estacional. Estudios equivalentes a los realizados por estos autores, para la zona sur de Patagonia, encuentran algunas limitantes en el número y distribución de las estaciones meteorológicas y registros de datos climáticos por largos periodos (Paruelo *et al.*, 1998b).

La fuente primaria de información sobre la PPNA de un sitio se basa en la aplicación de técnicas directas como el corte de biomasa, que ha sido empleada para establecer productividades en relación con factores abióticos descriptas anteriormente (Lauenroth *et al.*, 1986; Sala *et al.*, 2000; Sala *et al.*, 1981; Singh *et al.*, 1975). Esta técnica aporta un alto nivel de detalle a escala cuadro o establecimiento, pero dado su elevado requerimiento en tiempo y costo, su aplicación a escala regional es necesariamente reducida. Los métodos de estimación de biomasa forrajera en Patagonia Sur hasta el momento se basan en muestras cortadas en sitios previamente seleccionados que reflejan la variabilidad ambiental del establecimiento, y son representativos de la producción de los distintos ambientes (Borrelli *et al.*, 2001c). Sin embargo, esta información se ha restringido a un único estrato vegetal (hierbas y pastos cortos que constituyen el estrato “intercoironal”), que es la principal fuente forrajera

para la zona, convirtiéndose así, este estrato, en el determinante principal de la asignación animal del campo (Cibils, 1993b). De estos muestreos quedan excluidos los estratos arbustivo, subarbustivo y “coironal” (dominado por gramíneas medianas como *Festuca gracillima*). Para analizar la productividad vegetal total del ambiente, a escala de paisaje y regional se requiere de estudios a campo que incluyan la totalidad de los estratos.

El estudio de las variaciones espaciales y temporales de la estructura y funcionamiento de ecosistemas ha sido abordado mediante otras aproximaciones basadas en el empleo de sensores remotos (Paruelo *et al.*, 1998d; Paruelo *et al.*, 2000; Pickup *et al.*, 1993; Soriano *et al.*, 1992). El principio de funcionamiento de estos instrumentos se sustenta en la física óptica, se establece una relación entre los objetos a ser estudiados y una fuente de energía (Chuvienco, 1995). Los distintos tipos de coberturas de la superficie terrestre (agua, suelo, vegetación, etc.) interactúan con la energía lumínica de tres maneras: reflejándola, transmitiéndola o absorbiéndola. La energía captada por los satélites corresponde a la fracción reflejada, y cada tipo de cobertura terrestre responde en forma diferencial a las distintas longitudes de onda del espectro electromagnético. La cobertura vegetal sana refleja muy poca energía en la banda del rojo (la clorofila absorbe en este rango del espectro, y mucha en la porción del Infrarrojo cercano del espectro electromagnético (relacionada con la estructura interna de la hoja) (Figura 1.1). Esta característica ha sido empleada para generar distintos índices de vegetación que representan el estado de la vegetación en estudio. Los sensores remotos permiten registrar la energía reflejada en las distintas longitudes de onda, y cubren grandes áreas y con alta resolución temporal. Las imágenes satelitales constituyen así una herramienta adecuada para abordar en forma integral una gran superficie de muestreo, y aportan información de base para el diseño del muestreo a campo del chequeo de pastizales en una primera instancia, o incluso llegar a estimaciones de PPNA (Golluscio *et al.*, 1998b; Paruelo *et al.*, 2000). Las imágenes satelitales permiten además realizar un monitoreo de la evolución temporal de los pastizales, y analizar el efecto del pastoreo en el espacio, ya que la herbivoría genera degradación diferencial en las grandes superficies dedicadas al pastoreo extensivo (Borrelli *et al.*, 1984; León *et al.*, 1985; Paruelo *et al.*, 1993; Paruelo *et al.*, 1992; Soriano *et al.*, 1986). Para el monitoreo del funcionamiento de los pastizales se deben definir atributos de las imágenes satelitales que reflejen y se ajusten a la dinámica de la PPNA. Estos parámetros han sido estudiados a escala global y en distintas zonas de Argentina (Alcaraz *et al.*, 2006; Fabricante, 2005; Irisarri, 2008; Paruelo *et al.*, 1998b).

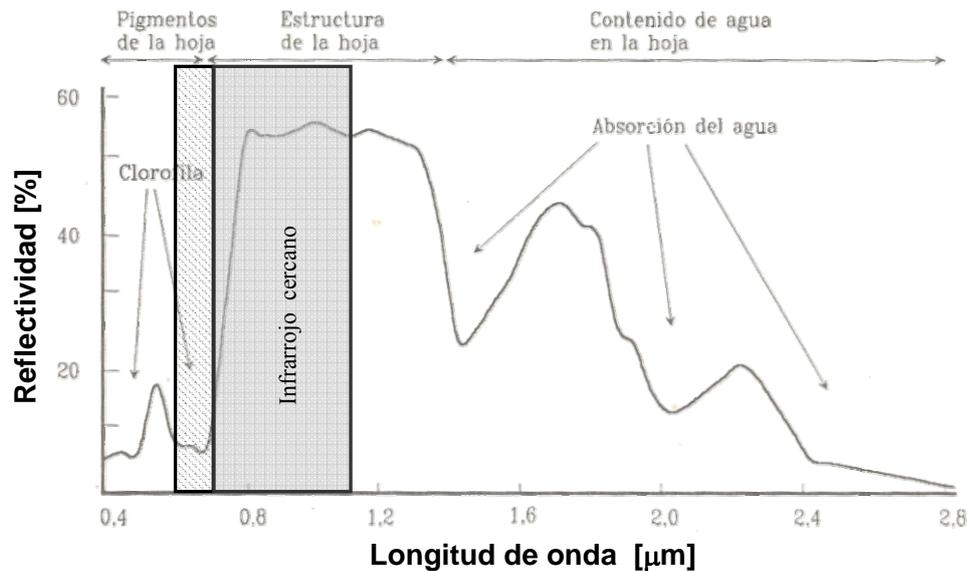


Figura 1. 1. Comportamiento espectral de una cobertura vegetal sana (Chuvieco, 1995).

Para evaluar a través de imágenes satelitales las características de un sitio es necesario conocer la firma espectral (reflectancia en las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético) de los distintos tipos de cobertura presentes en el lugar. Los índices espectrales pueden ser utilizados para estas descripciones porque resumen la información relevante. Un índice espectral de vegetación, por ejemplo, puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, que es particularmente sensible a la cobertura vegetal, insensible al brillo y color del suelo y poco afectado por las perturbaciones atmosféricas, los factores medioambientales y las geometrías de la iluminación y de la observación (Gilabert *et al.*, 1997). Uno de los índices de vegetación más empleados como estimadores de productividad primaria es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), que se encuentra íntimamente asociado a la cobertura vegetal y a la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación (Goward *et al.*, 1994; Monteith, 1994). La dinámica estacional de NDVI se ha utilizado como descriptor del funcionamiento del ecosistema (Puelo *et al.*, 2001b). Si bien este índice ha sido empleado como estimador de la PPNA, presenta algunas limitaciones. En áreas con cobertura vegetal menor al 30%, la correlación del NDVI con PPNA y con disponibilidad forrajera total puede presentar valores anómalos (del Valle, 1999) por las variaciones de la reflectancia del suelo. Además del porcentaje de suelo desnudo, los valores de NDVI pueden ser alterados por el estado sanitario y/o fenológico de la vegetación, que pueden generar interferencias en la señal recibida por el satélite, principalmente en ecosistemas con crecimiento continuo y de zonas áridas frías, donde la descomposición del material muerto es relativamente lenta, como por ejemplo los pastizales del sur de la Patagonia. En este sentido (Di Bella *et al.*, 2004a) demostraron que la acumulación de biomasa muerta reduce el valor de NDVI. Este aspecto resulta importante en Patagonia, dado que en los pastizales de la región, las gramíneas se caracterizan por acumular una importante proporción de material muerto en pie (Soriano, 1959). Considerando esta característica y la presencia de ambientes con alto

porcentaje de suelo desnudo, es necesario explorar otros índices que permitan reducir estas interferencias.

La importancia de la estimación de la PPNA se magnifica al considerar que ambientes áridos y semiáridos presentan una alta variabilidad temporal en respuesta a las variaciones climáticas (Oesterheld *et al.*, 1998; Paruelo *et al.*, 1998d). La vegetación patagónica, como en todo ecosistema árido-semiárido, presenta alta variabilidad espacio temporal, lo que constituye un problema para los sistemas ganaderos que dependen exclusivamente de esta fuente forrajera. En estos ambientes la vegetación muestra cuatro estratos principales: dos gramíneos (coironal e intercoironal) y dos leñosos (subarbustivo y arbustivo). De estos estratos el ganado ovino consume preferencialmente el estrato intercoironal (Somlo, 1997). En función de esto, lo considerado como biomasa forrajera disponible es en general una porción reducida de la biomasa total (Oliva *et al.*, 1999). La determinación de la proporción de los diferentes estratos de la vegetación, principalmente el intercoironal, resulta entonces importante para un manejo adecuado dentro de los sistemas ganaderos extensivos de la zona.

Para la zona sur de Patagonia se ha observado una relación positiva entre la disponibilidad del estrato intercoironal y la productividad secundaria (Cibils, 1993a), medida por ejemplo en el porcentaje de señalada. Dada esta relación y la existente entre NDVI y PPNA, sería esperable encontrar una asociación entre NDVI y productividad secundaria. Sin embargo, Posse *et al.* (2004), no encontraron una relación significativa entre NDVI-I (Integral NDVI) e índices de productividad secundaria para ambientes de Tierra del Fuego. Esta poca correlación podría estar explicada por una falta de ajuste entre NDVI y productividad forrajera, dado que los sensores remotos permiten estimaciones globales de PPNA, que no diferencian cada estrato de la vegetación. Para resolver estos inconvenientes es importante considerar en el análisis la variación espacial y estructural de la vegetación.

El pastoreo causa cambios en atributos vegetales como cobertura, productividad y cambios en la proporción de especies (Milchunas *et al.*, 1993). Desde principios del siglo pasado la Patagonia ha sido pastoreada por ganado ovino, siendo su hábito selectivo de alimentación la principal causa de la degradación de los pastizales (Golluscio *et al.*, 1998a). Actualmente la actividad productiva agropecuaria más importante de la provincia de Santa Cruz sigue siendo la ganadería, principalmente la ovina (INDEC, 2008), concentrada fundamentalmente en las áreas ecológicas del sur de la provincia (Figura 1.2).

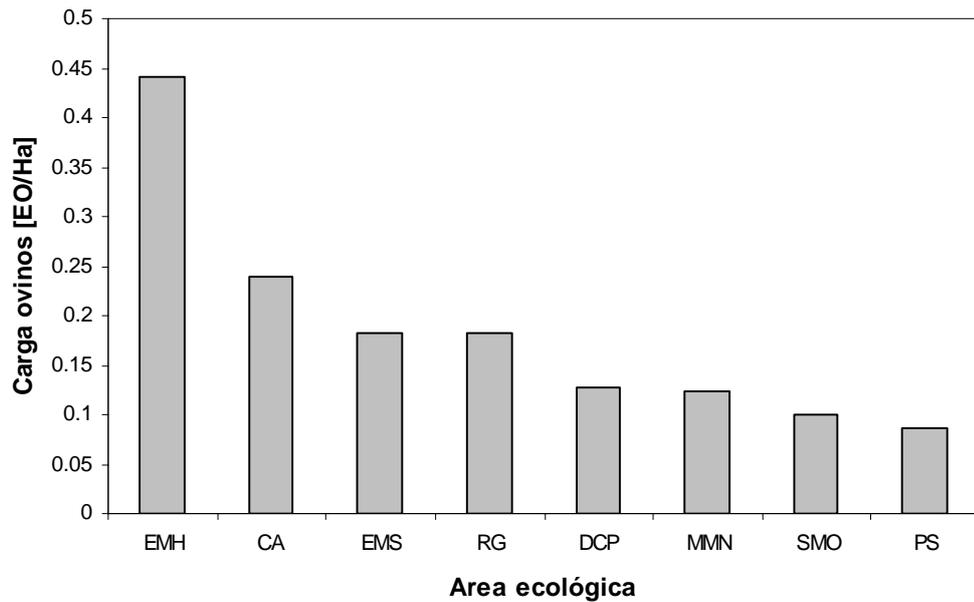


Figura 1. 2. Carga animal de ovinos por área ecológica de la provincia de Santa Cruz. (RG= Región del Golfo, MMN= Matorral de Mata Negra, DCP= Distrito Central Patagónico, SMO= Sierras y Mesetas Occidentales, PS= Pastizales Subandinos, CA= Complejo Andino, EMS= Estepa Magallánica Seca y EMH= Estepa Magallánica Húmeda). (Fuente: (Borrelli et al., 1997).

Objetivos y organización de la tesis

Con esta tesis se pretende lograr una descripción del comportamiento espacio temporal de dos áreas ecológicas del sur de la Patagonia: Estepa Magallánica Seca y Matorral de Mata Negra, utilizando índices espectrales obtenidos de imágenes de resolución espacial y temporal intermedias. La información obtenida permitirá mejorar algunas prácticas de manejo de los sistemas ganaderos de la región en estudio, como el ajuste de la carga animal a la oferta estacional de forraje.

Los objetivos específicos de la presente tesis son:

1. Caracterizar la vegetación de las dos áreas ecológicas a través de las variables medidas a campo.
2. Caracterizar la variación espacial y temporal de los atributos espectrales de los índices de vegetación en la Estepa Magallánica y Matorral de Mata Negra.
3. Describir la dinámica espacio temporal (intra e interanual) de los índices espectrales por tipo de vegetación.
4. Estimar la biomasa y cobertura vegetal a partir de índices de vegetación provenientes de imágenes satelitales.

En los resultados del Capítulo 2 (*Caracterización estructural de la vegetación*) se describe con datos de campo la vegetación de la Estepa Magallánica Seca (EMS) y

Matorral de Mata Negra (MMN) (Objetivo 1), con muestreos de cobertura específica y cosechas de biomasa en diferentes años en 11 sitios de la EMS y 7 del MMN. En el Capítulo 3 (*Caracterización espectral de las áreas ecológicas Estepa Magallánica Seca y Matorral de Mata Negra*) se abordan los objetivos 2 y 3, con el uso de los índices de vegetación NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y EVI (Enhanced Vegetation Index) obtenidos de imágenes satelitales. El Capítulo 4 (*Relación entre los diferentes índices espectrales y la vegetación*), vinculado al objetivo 4, estudia, a partir de correlaciones y regresiones, los datos del Capítulo 2 con los del Capítulo 3. Mientras que en el Capítulo 5 (*Discusión general*) se repasan los resultados más importantes, las posibles aplicaciones para el manejo de los recursos naturales y las implicancia en futuros estudios de la zona.

Capítulo 2. Caracterización estructural de la vegetación

Introducción

La vegetación de la Patagonia Austral ha sido estudiada por diversos autores, tanto a nivel regional como predial (León *et al.*, 1998; Movia *et al.*, 1987; Paruelo *et al.*, 1998c; Soriano, 1956). León y colaboradores (1998) redefinieron en la Patagonia extra-andina 16 unidades fisonómicas florísticas, distribuidas en las provincias fitogeográficas del Monte (2), Patagónica (12) y ecotono del Monte (2). Dentro de la Provincia Fitogeográfica Patagónica, para la provincia de Santa Cruz, Oliva *et al.* (2001a) establecieron *áreas ecológicas* en función de las características combinadas de vegetación, clima y suelo (Figura 2.1.a). Estas están incluidas dentro de la descripción de León *et al.* (1998), aunque con límites levemente diferentes para algunas áreas. Los nombres de las áreas ecológicas de Oliva y sus correspondientes en las unidades fisonómicas florísticas de León son las siguientes: Estepa arbustiva del Golfo San Jorge (Distrito del Golfo San Jorge- Estepa arbustiva con *Chuquiraga avellanadae*), Estepa magallánica húmeda (Distrito Magallánico- estepa gramínea húmeda), Estepa magallánica seca (Distrito Magallánico- estepa gramínea xérica), Matorral de mata negra (Distrito Central- Estepa arbustiva baja con *Junellia tridens*), Meseta central (Distrito Central- Erial), Pastizal subandino (Distrito subandino- estepa gramínea), Sierras y mesetas occidentales (Distrito occidental- Estepa arbustiva gramínea) y Complejo andino.

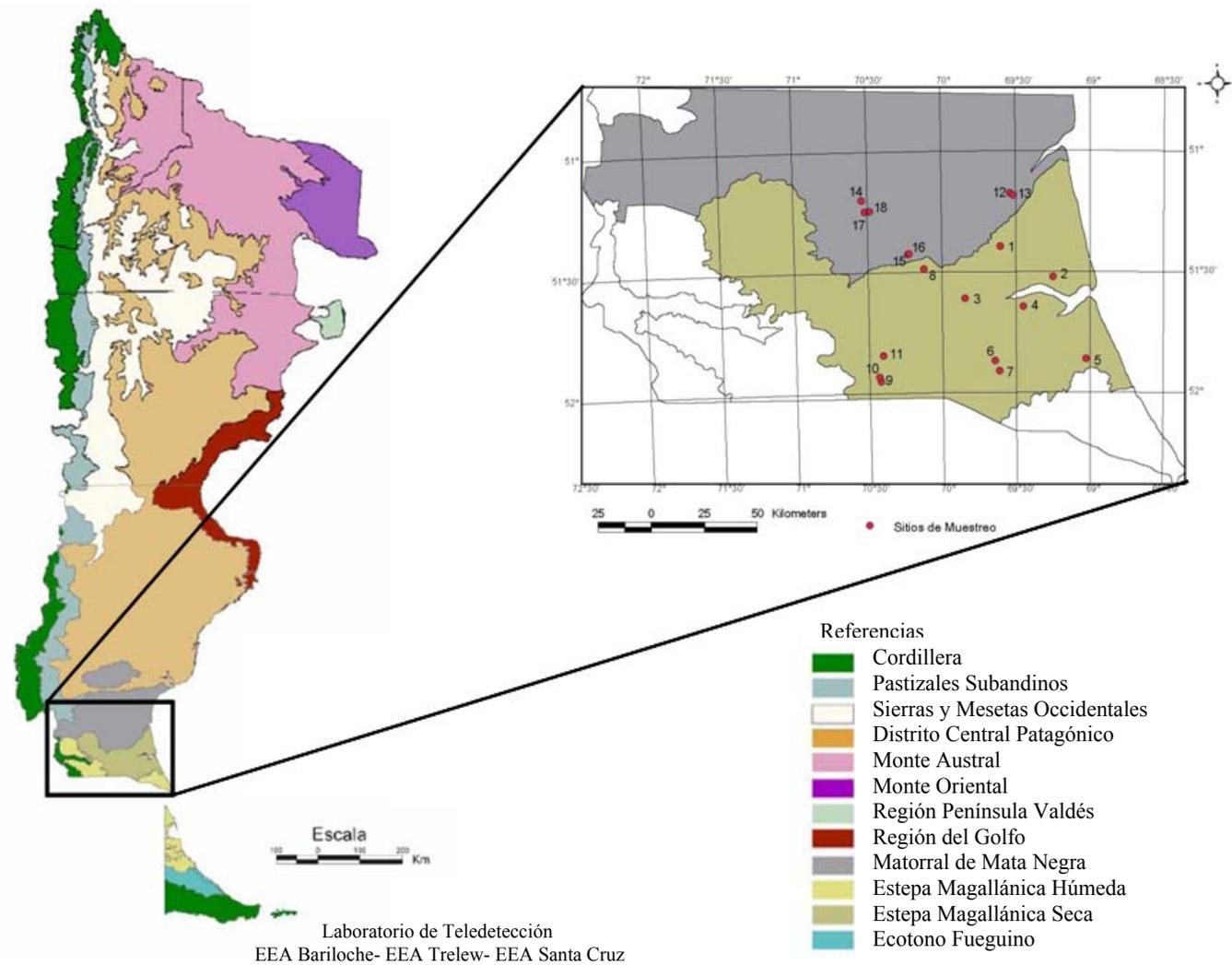


Figura 2.1. a) Mapa de Regiones Ecológicas Homogéneas (Fuente (INTA, En Prensa)) y b) de Distribución de los puntos de muestreo en las dos áreas ecológicas bajo estudio.

Para el presente estudio se seleccionaron sitios dentro de dos de las áreas ecológicas ubicadas al sur de la provincia de Santa Cruz: Estepa Magallánica Seca y Matorral de Mata Negra. La vegetación se divide aquí en cuatro estratos (Figura 2.2): Coironal, Intercoironal, Subarbustivo y Arbustivo. El estrato “coironal” está formado principalmente por gramíneas medianas dominadas por *Festuca gracillima*, encontrándose también *Stipa chrysophylla*; el “intercoironal”, por pastos cortos y herbáceas, donde *Poa*, *Carex* y *Bromus* son géneros comunes, que se encuentran entre los parches del estrato anterior; el “subarbustivo”, integrado por especies leñosas rastreras, dominando *Nardophyllum brioides*, *Satureja darwinii* y *Verbena odonelli*; y el “arbustivo” principalmente leñosas del género *Junellia*. Las gramíneas y arbustos son dominantes en la Estepa Patagónica, contribuyendo con el 96 % de la producción primaria neta total, con el 97 % a la cobertura y 59% del número total de especies (Golluscio *et al.*, 1993).

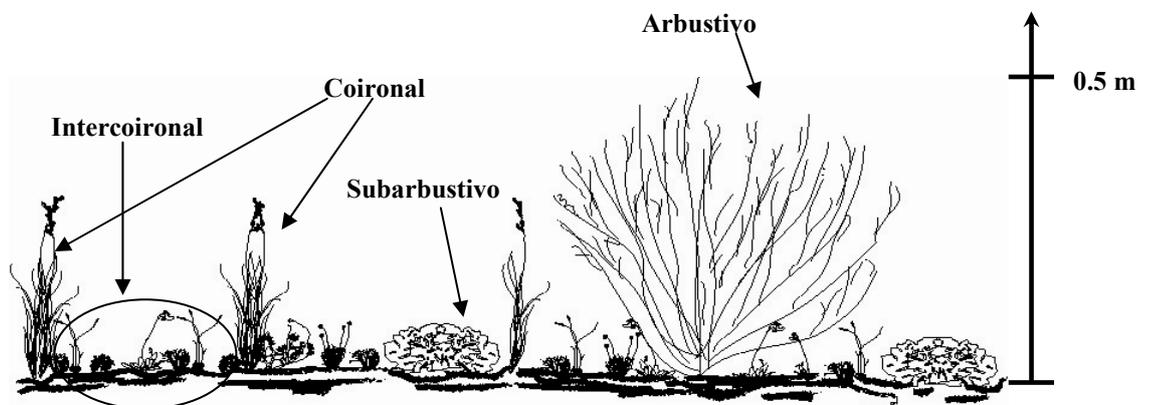


Figura 2. 2 Estratificación de la vegetación en las áreas ecológicas al sur de la provincia de Santa Cruz.

El uso sustentable de los ambientes debería estar estrictamente basado en el conocimiento de su estructura y funcionamiento. Las características funcionales y estructurales de la vegetación pueden ser medidas o estimadas a través de diferentes metodologías. Entre los atributos que permiten caracterizar aspectos estructurales de la vegetación de un área determinada se encuentran: la biomasa, la cobertura vegetal (total o por especie), la forma de vida (hierba, pasto, coirón, subarbusto, o arbusto), la riqueza, la diversidad, la equitatividad y la altura. Entre los atributos funcionales los más relevantes son la biomasa (total y la relación verde/muerto) y la Productividad Primaria Neta. La *diversidad* es indicadora de un conjunto de aspectos funcionales de los ecosistemas, tales como la cantidad e intensidad de las interacciones poblacionales que tienen lugar al interior del sistema (Margalef, 1978) o la calidad y cantidad del flujo energético disponible (Odum, 1980). El estudio de la diversidad puede realizarse a diferentes niveles (Magurran, 2004). La diversidad *alfa* (α) es la diversidad de una comunidad particular considerada homogénea, que se puede medir en proporciones. La diversidad *beta* (β) mide el cambio en la composición de especies entre dos comunidades. Por último, la diversidad *gamma* (γ) representa la heterogeneidad del conjunto de comunidades que integran un paisaje midiéndose en abundancia relativa de individuos de cada especie. Otra forma de estudiar la diversidad de un ecosistema, es a través de unidades funcionales, las más empleadas habitualmente son los Tipos Funcionales de Plantas (TFP), definidos como grupos de especies que responden de

manera similar al ambiente (Golluscio, 2005; Smith *et al.*, 1993), y tienen efectos similares sobre el funcionamiento del ecosistema (Gitay *et al.*, 1997). La equitatividad es un atributo que considera la importancia relativa de cada especie para comparar sitios. La *altura* de los diferentes estratos permite describir la distribución vertical de la biomasa. La *biomasa*, cantidad de material vegetal en un área, permite determinar, por cosechas repetidas, la Productividad Primaria Neta. La estimación de estos atributos de la vegetación en el espacio permite determinar cuán heterogéneo es el ambiente. Su estudio en el tiempo se puede relacionar con procesos de cambios (generalmente degradación). La variación en el tiempo de la cobertura vegetal total y específica son los atributos más estudiados en este sentido, cambios ocasionados principalmente por pastoreo (Bastin *et al.*, 1993; Bertiller *et al.*, 2001; Bisigato *et al.*, 2005; Oliva *et al.*, 1998). Por ejemplo analizar la vegetación por TFP permite para estudiar la respuesta del ecosistema a disturbios (Epstein *et al.*, 1997), y conocer el estado del ecosistema (Paruelo *et al.*, 1998d). Este comportamiento dinámico que poseen los sistemas puede ser explicado utilizando los modelos de Estados y Transiciones, propuesto por Westoby *et al.* (1989), como alternativa al modelo clásico de Clements. La heterogeneidad espacial y temporal de la vegetación hace que estas mediciones demanden tiempo y alto costo. Sin embargo su estimación a través de sensores remotos fue realizada con éxito en diferentes trabajos (Di Bella *et al.*, 2004b; Paruelo *et al.*, 1997a; Paruelo *et al.*, 2004) y resulta de costo muy reducido.

Como se mencionó en párrafos anteriores, la base para un manejo adecuado de los sistemas naturales radica en realizar una buena caracterización de los atributos funcionales y estructurales. En la Patagonia Austral existen pocos trabajos que analicen esta información, en algunos se estudia el comportamiento temporal solo para algunos sitios en particular (Ferrante, no publicado). Sin embargo hasta ahora no existían en la zona estudios que aporten información con el detalle, fisonómico florístico y con una amplia distribución espacial de las muestras, como el que se presenta en esta tesis, por lo que los resultados se esperan logren complementar y aumentar la información hasta ahora generada.

El objetivo del presente capítulo es realizar una descripción de la Estepa Magallánica Seca y Matorral de Mata Negra, a partir de la cobertura (específica y por forma de vida) y biomasa (total, seca y verde por forma de vida).

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

El área de estudio pertenece fitogeográficamente al Dominio Extra-andino, Provincia Patagónica, caracterizado por estepas herbáceas, arbustivas y semidesiertos (Cabrera, 1976) y abarca los Distritos Central (Estepa arbustiva baja con *Junellia tridens*) y Magallánico (Estepa gramínea xérica) (Soriano, 1956). Específicamente el área de estudio abarcó la Estepa Magallánica Seca y su transición a Matorral de Mata Negra (Figura 2.1. b).

Estepa Magallánica seca (EMS)

Este distrito está caracterizado por un extenso pastizal cuya cobertura vegetal oscila entre 50-70% (Oliva *et al.*, 2001a). La especie dominante es allí el coirón fueguino (*Festuca gracillima*), que alcanza en algunos sitios el 40% de cobertura (León *et al.*, 1998). Entre los parches de coirón suele encontrarse un estrato de gramíneas cortas, graminoides y hierbas (estrato intercoironal), que presenta como especies más comunes a *Poa duseinii*, *Bromus setifolius*, *Rytidosperma virescens*, *Carex andina*, *Viola maculata*, *Calceolaria uniflora* y *Azorella fuegiana*. Puede presentar algunos arbustos aislados de calafate (*Berberis sp*) o mata negra (*Junellia tridens*), y un estrato subarbustivo (principalmente *Nardophyllum bryoides* y *Nassauvia ulicina*). El porcentaje de cobertura relativa de cada uno de los grupos de plantas mencionados (Gramíneas altas, gramíneas cortas, hierbas, subarbustos y graminoides) varía en función de la condición del pastizal (relación del estado actual del pastizal con el potencial del sitio) (Borrelli *et al.*, 1988; Borrelli *et al.*, 1984; Roig *et al.*, 1985).

Este área presenta precipitaciones medias anuales de entre 250 y 180 mm distribuidas a lo largo de todo el año con un máximo estival. El promedio anual de temperatura varía entre 6 y 7° C. En el paisaje dominan los niveles aterrizados, formados por mesetas sedimentarias del período terciario y planicies glacifluviales cuaternarias (Rial, 2001). Los suelos pertenecen a los ordenes molisol y aridisol, con textura franco arenosa a franco arcillo arenosa (Salazar Lea Plaza *et al.*, 1990).

Matorral de Mata Negra (MMN)

El área del Matorral de Mata Negra se caracteriza por arbustos medios de unos 70 cm. (0,5 a 1 m), y está dominada en un 60 - 70% por mata negra (*Junellia tridens*), en algunos casos en forma continua y en otros en forma de mosaicos de estepa graminosa de coirones amargos (*Stipa speciosa*) o coirón blanco (*Festuca pallescens*). Presenta precipitaciones anuales promedio de entre 170 y 150 mm y temperaturas promedio de alrededor de los 9°C (De Fina *et al.*, 1968). El paisaje dominante es de mesetas sedimentarias con pendientes suaves, con alturas entre 300 y 500 msnm (Movia *et al.*, 1987), de edad terciaria y origen marino, cubiertas de rodados patagónicos. También existen derrames basálticos terciarios o cuaternarios, áreas de niveles aterrizados fluviales de la cuenca del Río Coyle hacia el sur y planicies glacifluviales cerca de la zona cordillerana (Rial, 2001). Los tipos de suelo predominantes son entisoles y molisoles de textura arenosa a franco arenosa (Salazar Lea Plaza *et al.*, 1990). Cabe mencionar que a pesar de que el área ecológica es llamada Matorral de Mata Negra, en realidad se trata, considerando el porcentaje de cobertura, de una estepa arbustiva, como es mencionada en Movia *et al.* (1987).

Muestreo de la vegetación

Se muestreó un total de 18 sitios, 11 en la zona de Estepa Magallánica y 7 en la transición a Matorral de Mata Negra (Figura 2.1. b) que abarcan un gradiente de vegetación (desde estepa graminosa a matorral de *Mata Negra*) y geográfico (Tabla 2.1). La cosecha de biomasa se realizó entre febrero - marzo de 2004, entre febrero-marzo 2005 y octubre de 2005 (ésta última sólo se realizó para algunos sitios), mientras

que las mediciones de cobertura vegetal fueron entre febrero - marzo de 2004 (cobertura específica) y entre enero- febrero de 2010 (cobertura por forma de vida).

Se consideró para este relevamiento el comportamiento temporal de vegetación de la región, esto es, la dinámica anual, que presenta un crecimiento en primavera tardía, con un pico en octubre- noviembre y un nuevo rebrote (de menor magnitud) en otoño.

Tabla 2.1. Ubicación y principales características de los sitios de muestreo

| ID | Campo | Ambiente | Latitud | Longitud | Estado | Altura [msnm] | Dist. al mar [km] | Precipitación annual [mm]* |
|----|---|----------|----------------|----------------|--------|------------------|----------------------|----------------------------------|
| 1 | Ea. Moy Aike | EM | -51° 24' 18,4" | -69° 37' 53,5" | V | 140 | 40,1 | 182 (c) |
| 2 | Ea. Los Pozos | EM | -51° 32' 45,0" | -69° 15' 22,3" | III | 160 | 19,3 | 212 (a) |
| 3 | Ea. Laguna Colorada | EM | -51° 37' 27,9" | -69° 51' 31,3" | V | 60 | 60,3 | 229 (b) |
| 4 | Ea. Kilik Aike | EM | -51° 39' 18,0" | -69° 27' 5,9" | V | 30 | 34,9 | 253 (c) |
| 5 | Ea. Punta Loyola | EM | -51° 52' 18,3" | -69° 2' 40,0" | II | 60 | 14,8 | 262 (a) |
| 6 | Ea. Markatch Aike (1) | EM | -51° 53' 55,2" | -69° 39' 39,3" | IV | 90 | 53,5 | 224 (c) |
| 7 | Ea. Markatch Aike (2) | EM | -51° 55' 23,3" | -69° 37' 16,0" | V | 110 | 55,0 | 224 (c) |
| 8 | Ea. La Regalona | EM | -51° 30' 52,0" | -70° 8' 44,0" | V | 130 | 76,5 | 183 (c) |
| 9 | Campo Experimental Potrok Aike (Willy) | EM | -51° 57' 0,7" | -70° 26' 46,2" | III | 180 | 107,3 | 217 (c) |
| 10 | Campo Experimental Potrok Aike (Perro) | EM | -51° 56' 2,0" | -70° 26' 8,6" | III | 140 | 107,4 | 217 (c) |
| 11 | Ea. La Carlota | EM | -51° 51' 18,4" | -70° 25' 55,1" | VI | 110 | 103,0 | 211 (c) |
| 12 | Ea. Coy aike (1) | MMN | -51° 11' 34,7" | -69° 33' 55,0" | - | 50 | 28,4 | 168 (b) |
| 13 | Ea. Coy Aike (2) | MMN | -51° 12' 56,0" | -69° 31' 7,9" | - | 70 | 27,8 | 168 (b) |
| 14 | Ea. SilviAike | MMN | -51° 13' 55,9" | -70° 32' 1,5" | - | 170 | 97,3 | 172 (c) |
| 15 | Ea. Las Horquetas (1) | MMN | -51° 26' 33,0" | -70° 14' 26,2" | - | 130 | 83,4 | 165 (c) |
| 16 | Ea. Las Horquetas (2) | MMN | -51° 26' 41,1" | -70° 14' 59,4" | - | 130 | 82,5 | 165 (c) |
| 17 | Ea. La Pequeñita (1) | MMN | -51° 15' 6,0" | -70° 31' 12,3" | - | 170 | 97,2 | 172 (c) |
| 18 | Ea. La Pequeñita (2) | MMN | -51° 15' 19,0" | -70° 29' 6,2" | - | 160 | 94,7 | 172 (c) |

EM= Estepa Magallánica. MMN= Matorral de Mata Negra. * Los valores de precipitación promedio de (a) datos de De Fina (De Fina *et al.*, 1968), Soto (Soto *et al.*, 2000) y de Estancias de la zona (INTA, 2008), (b) de De Fina y datos inéditos de Estancias y (c) datos de De Fina.

Para caracterizar estructural y florísticamente la vegetación se realizaron dos tipos de muestreo en función del tipo fisonómico del sitio:

1) En la Estepa Magallánica se emplearon 2 transectas dispuestas perpendicularmente (Figura 2.3 a) de 150 m cada una, que abarcaron una superficie cercana a la de un píxel de las imágenes empleadas (MODIS 250 m de resolución espacial). Sobre cada línea se colocaron transversalmente marcos rectangulares de $0,2 \text{ m}^2$ (1 m x 0,2 m) cada 15 m. Se cosechó cada forma de vida (coironal, intercoironal y subarbusivo) (Figura 2.2) por separado. Se estimó la frecuencia y cobertura específica empleando el método de puntos (Levy *et al.*, 1933), sobre una transecta de 50 m de longitud que fue muestreada con agujas cada 10 cm para anotar especie, suelo desnudo, pavimento de erosión o mantillo.

2) En la Transición a Matorral de Mata Negra se realizaron dos transectas perpendiculares de 62 m cada una. En este ambiente, se dispusieron parcelas de $0,6 \text{ m}^2$ (3 marcos de $0,2 \text{ m}^2$, ubicados sobre la transecta de forma consecutiva y longitudinal), con el objetivo de capturar mayor información por el tipo de fisonomía de la vegetación. Estas parcelas se dispusieron cada 20 m (Figura 2. 3 b). Se cosechó todo el material vegetal presente correspondiente a las cuatro formas de vida, por separado. La estimación de la frecuencia y cobertura vegetal específica se realizó, al igual que en la Estepa Magallánica, a través del método de puntos. Adicionalmente, y con el objeto de caracterizar la estructura del estrato arbustivo, sobre una transecta perpendicular a la primera, una evaluación de la vegetación por el método de intercepción (Canfield, 1941; Mueller-Dombois *et al.*, 1974), midiendo además la altura y diámetros opuestos de cada mata.

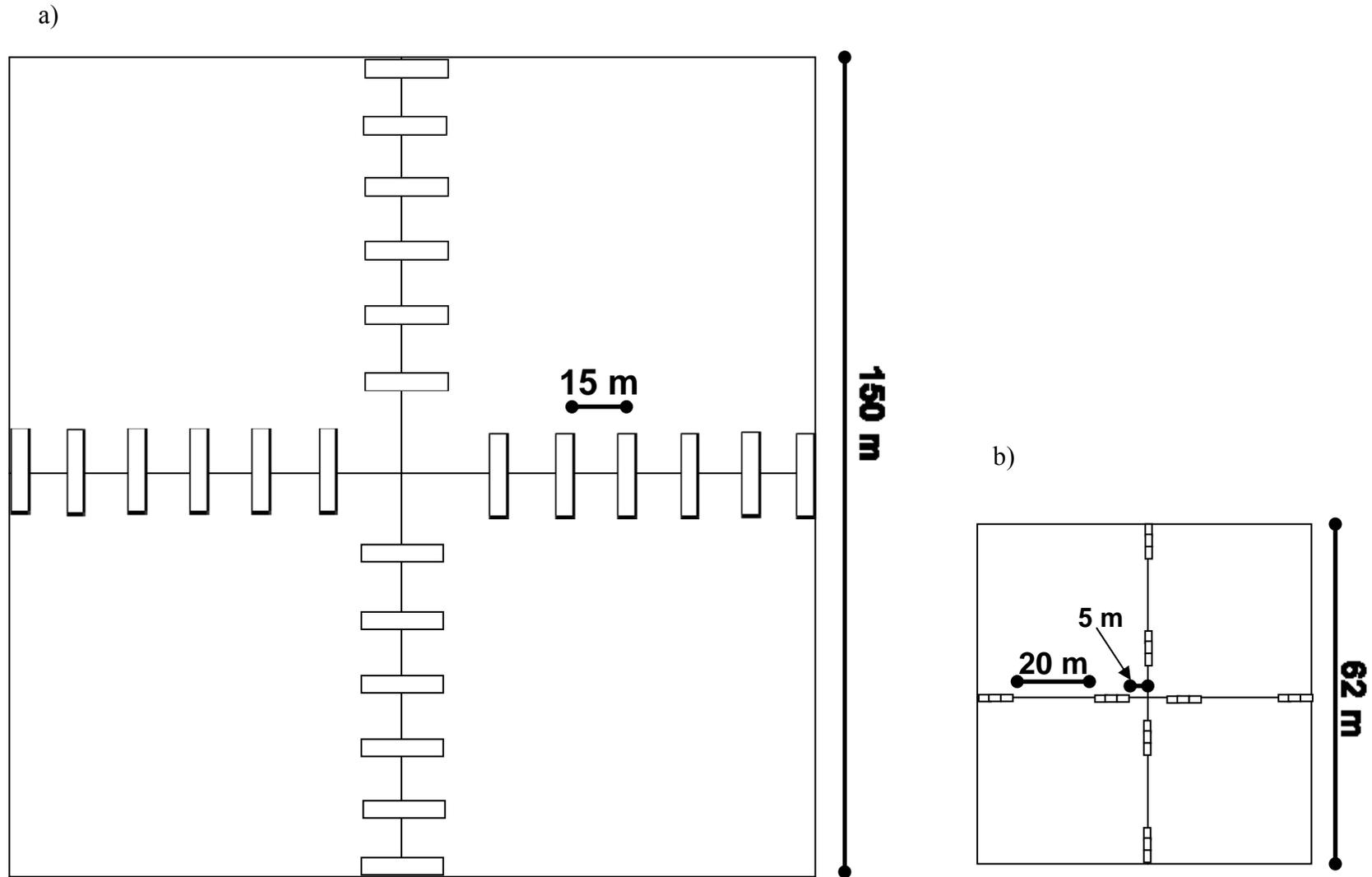


Figura 2. 3 a) Esquema de muestreo para la determinación de biomasa en el área de Estepa Magallánica y b) muestreo en el área de ecotono a Matorral de Mata Negra. Tamaño de marco: $0,2\text{m}^2$.

El total de muestras de material vegetal fue secado a 60°C hasta peso constante. Las muestras fueron separadas en material verde y seco; y en el caso de la mata negra la porción verde de los microblastos y los brotes del año (Foto 2.1).



Foto 2.1. Separación del material seco y verde del estrato arbustivo (*Junellia tridens*), donde a) material sin separar, b) porción de rama después de extraer material verde, c) porción verde (microblastos y brotes del año)

A cada sitio de muestreo de la EMS, se le asignó un Estado, del catálogo de Estados y Transiciones existente para la zona (Borrelli *et al.*, 2001a). No existe aún un catálogo similar para el área de MMN.

Análisis de datos

Biomasa

Con los datos de separación del material vegetal cosechado, se construyó una tabla con los datos de biomasa verde y seca (o muerta) y total (suma de las dos fracciones anteriores) por sitio y fecha. Las muestras recolectadas por sitio en una misma fecha fueron promediadas por estrato.

Se realizó un Test de "T", con una significancia de 0,05, para determinar diferencias significativas entre las biomásas de los sitios de MMN y EMS. Para dicho análisis se empleó el programa SPSS 15.0.

Cobertura

A partir de los toques realizados sobre la transecta, se construyó una tabla que lista el total de especies (filas) e indica para cada una el número de toques correspondientes en los distintos sitios (columnas). Dichas especies fueron identificadas además con su forma de vida correspondiente (Pastos, Hierbas, Coirones, Subarbustos y Arbustos) (Tabla 1. Anexo). Se relativizó al total de toques de toda la transecta (500 puntos), obteniendo así la cobertura por especies y por forma de vida. Para calcular la cobertura vegetal total por sitio, se sumó la cobertura del total de especies por sitio, eliminando la de líquenes. Adicionalmente con los datos obtenidos por el método Canfield se calculó el tamaño promedio de las matas por sitio, a partir del dato de la cobertura lineal de cada individuo más el dato de los diámetros opuesto y la altura máxima de la mata interceptada.

Se realizó un ANOVA de un factor para determinar si las medias de la cobertura arbustiva (método Canfield, método de puntos año 04-05 y método de puntos año 2010) presentaron diferencias significativas, previa comprobación de supuestos de homocedasticidad y normalidad. Un Test de “T” se realizó para establecer diferencias entre las medias de las coberturas relativas por forma de vida entre los ambiente, y otro, para comparar las medias entre fechas. Ambos análisis se realizaron empleando el programa estadístico SPSS.

Riqueza, Diversidad y Equitatividad

Para caracterizar la diversidad de cada sitio se calculó la diversidad Alfa, α , a través de la Riqueza de especies (S_S) y el índice de Shannon-Weaver (H') (Magurran, 2004). S_S es el número total de especies presentes en cada sitio, y solo puede emplearse para comparar sitios, sin considerar la importancia (cobertura o dominancia) de cada especie. Sin embargo ésta es considerada por el índice de Shannon- Weaver (H'), que mide diversidad y equitatividad de especies presentes. Para todas las especies presentes se calculó la cobertura relativa $p_i = \text{Cobertura absoluta } sp_i / \text{Sumatoria de la cobertura de todas las especies}$. Luego se calculó para cada especie el logaritmo natural de la cobertura relativa: $\ln(p_i)$, y por último se realizó la sumatoria del producto de estos factores para obtener el índice H'

$$H' = - \sum_{i=1}^{S_S} p_i \ln p_i$$

para todas las especies de 1 hasta S_S .

La equitatividad de Shannon (E_H) se calculó realizando el cociente entre H' y H_{\max} ,

$$E_H = H' / H_{\max} = H' / \ln S_S$$

donde $H_{\max} = \ln S_S$. Los valores de E_H varían entre 0 y 1, siendo 1 situaciones en las que todas las especies se encuentran en igualdad de abundancia.

La diversidad beta, β , que representa el grado de cambio o reemplazo en la composición de especies entre diferentes comunidades en un paisaje, fue calculado empleando la siguiente ecuación:

$$\beta_w = \frac{S_e}{\alpha}$$

donde S_e es el número total de especies registradas en el sistema (área ecológica) (es decir, diversidad, γ) y α es la diversidad promedio de las muestras (sitios) dentro de cada una de éstas áreas.

La diversidad gamma, γ , riqueza de especies del conjunto de comunidades que integran el paisaje, es el resultado tanto de las diversidades alfa como beta (Whittaker, 1972), y se calculó como la simple suma del total de especies de cada ambiente.

Determinación de comunidades

En una primera instancia se construyó una tabla fitosociológica para determinar la existencia de comunidades entre los sitios. Para tal fin, se empleó una tabla de cobertura por especies, considerando sólo aquellas especies cuya constancia fue superior al 5%. La eliminación de las especies con una frecuencia menor al 5% produjo una disminución de 18 especies en la matriz con el total de sitios (EMS y MMN), 11 especies en la matriz de EMS y 22 en la de MMN. Los datos fueron agrupados de acuerdo a la escala ordinal de Braun-Blanquet (Braun Blanquet, 1932).

Como técnica complementaria se realizaron análisis multivariados para establecer el agrupamiento de los sitios:

- un Análisis de Componentes Principales (ACP) se realizó con la tabla de cobertura por especies, con los sitios de EMS y MMN. Se utilizó el índice de Sorensen como medida de distancia de similaridad y el vecino más lejano como método de ligamiento.

- un Análisis de Correspondencia (AC), para lo cual se empleó como matriz principal la tabla de cobertura específica, y como matriz secundaria, una tabla conformada por: cobertura y biomasa por forma de vida y datos promedio de precipitación media anual, distancia al mar y altura sobre el nivel del mar (Tabla 2.1).

En la tabla de cobertura específica utilizada en los Análisis Multivariados, las especies con una frecuencia de aparición en el total de censos menor al 5% fueron eliminadas (Gauch, 1982), para prescindir de la interdependencia de los datos. En la matriz secundaria del Análisis de Correspondencia se descartaron los datos de cobertura del tipo funcional menos representado. Estos análisis se realizaron con el programa PC-Ord (McCune *et al.*, 1999).

Resultados

Biomasa

La biomasa vegetal total promedio de los sitios de EMS fue de 997,2 Kg MS/ha (Tabla 2.2). Un 47% correspondió al estrato coironal, el 26 % al intercoironal y el 27% al subarbustivo. En general, considerando los dos años de muestreo, el valor más elevado de biomasa total lo presentó Los Pozos (1291,2 KgMS/ha). El mayor valor de biomasa verde fue observado en Potrok Aike Willy (477,3 KgMS/ha) y el de biomasa seca en Markatch Aike (2) (1005,2 KgMS/ha). Los resultados de la separación en material verde y seco mostraron que, del total de biomasa por estrato, el componente verde representó un porcentaje relativamente más alto en el estrato subarbustivo e intercoironal (43 y 36 % respectivamente), mientras que el coironal no superó el 27 %.

La biomasa vegetal total promedio de los sitios de MMN fue de 2821.9 Kg MS/ha (Tabla 2.2), de la cual el 7 % al estrato intercoironal, el 3.9% correspondió al coironal, el 7% al subarbustivo y el 82 % al arbustivo. Del total de biomasa por estratos el material verde representó el 38% en el estrato intercoironal 24 % en el coironal, 36% en el subarbustivo y 32% en el arbustivo. El sitio que presentó mayor biomasa total fue Las Horquetas (1) con 4485 KgMS/ha. Mientras que el sitio con menor biomasa total fue Silvi Aike con 1270 KgMS/ha.

La composición verde/ seco de cada estrato resultó ser diferente en ambas áreas ecológicas (Tabla 2.2). Como se mencionó en párrafos anteriores, la biomasa total del Matorral fue mayor que en Estepa. De este total, el Matorral de Mata Negra presentó significativamente menor cantidad promedio de biomasa en coironal total y mayor en el estrato arbustivo que la Estepa Magallánica. Por el contrario, la biomasa total de los estratos intercoironal y subarbustivo no presentó diferencias significativas entre los ambientes estudiados.

Tabla 2.2. Biomasa promedio (KgMS/ha) por estrato, para cada área ecológica, separada en material verde y seco. Letras distintas indican diferencias significativas ($p<0.05$).

| | Estrato | EMS | MMN |
|-----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Intercoironal | Verde | 91,0 ^a | 84,3 ^a |
| | Seco | 165,6 ^a | 139,6 ^a |
| | Total | 256,6 ^a | 223,8 ^a |
| | Material verde [%] | 35,5 | 37,6 |
| Coironal | Verde | 125,6 ^a | 28,4 ^b |
| | Seco | 339,2 ^a | 90,8 ^b |
| | Total | 469,9 ^a | 119,1 ^b |
| | Material verde [%] | 27,0 | 23,8 |
| Subarbustivo | Verde | 119,7 ^a | 87,6 ^a |
| | Seco | 156,1 ^a | 176,9 ^a |
| | Total | 275,8 ^a | 264,4 ^a |
| | Material verde [%] | 43,3 | 33,1 |
| Arbustivo | Verde | 0,0 ^a | 698,4 ^b |
| | Seco | 0,0 ^a | 1565,1 ^b |
| | Total | 0,0 ^a | 2263,5 ^b |
| | Material verde [%] | 0,0 | 30,9 |
| Total Kg MS/ha | Verde | 336,3 ^a | 882,61 ^b |
| | Seco | 660,9 ^a | 1936,3 ^b |
| | Total | 997,2 ^a | 2821,9 ^b |
| | Material verde [%] | 33,7 | 31,3 |

Cobertura

El tipo fisonómico dominante en todos los sitios de EMS fue la Estepa Graminosa, que presenta una cobertura vegetal promedio de 66,1% (variando entre 59,5 - 78,6 %; CV= 11%), 20,1% (4 - 34,3%; CV= 44,6%) de suelo desnudo y 13,8% (6 - 20,1%; CV= 29,5%) de mantillo (Figura 2.4 a). El estrato dominante fue el intercoironal, con 36,3% (26,9 - 53,8%; CV=19,4%; 5,8% de dicotiledóneas herbáceas), seguido por el coironal con 18,2 %, el subarbustivo con 11 % y el arbustivo con apenas el 0,5 % (Figura 2. 5. a). Los sitios con mayor cobertura vegetal resultaron ser Punta Loyola y Markatch Aike (2), con 78,6 y 76,6% respectivamente. Moy Aike presentó el valor más bajo de cobertura vegetal (53%) y el más alto en suelo desnudo (34,3%) (Figura 2. 4. a).

En el MMN se analizaron 7 sitios. El tipo fisonómico corresponde en todos los casos a una Estepa Arbustiva de *Junellia tridens* (Mata Negra). Presentaron una cobertura vegetal promedio de 66,5% (53,8 - 74%; CV=8%), con un 22,2% (4,1 - 34,3%; CV=15,7%) de suelo desnudo y 11,1 % (5,36 - 18,8%; CV=38,6%) de mantillo (Figura 2.4 b). La cobertura vegetal está compuesta por el 35,1 % de arbustos, variando de 18 a 46,8% (CV=28%), 18,6 % de hierbas y pastos, 8,6% de subarbustos y 4 % de coirones (Figura 2. 5. b). Coy Aike (2) presentó la mayor cobertura vegetal (74 %), y menor porcentaje de suelo desnudo (16,8%), mientras que los valores más bajos fueron observados en Las Horquetas (2) (59,5 %) (Figura 2.4.b). Los sitios que presentaron

mayor porcentaje de suelo desnudo fueron La Pequeñita (2) (27,5%) y Coy Aike (1) (25%).

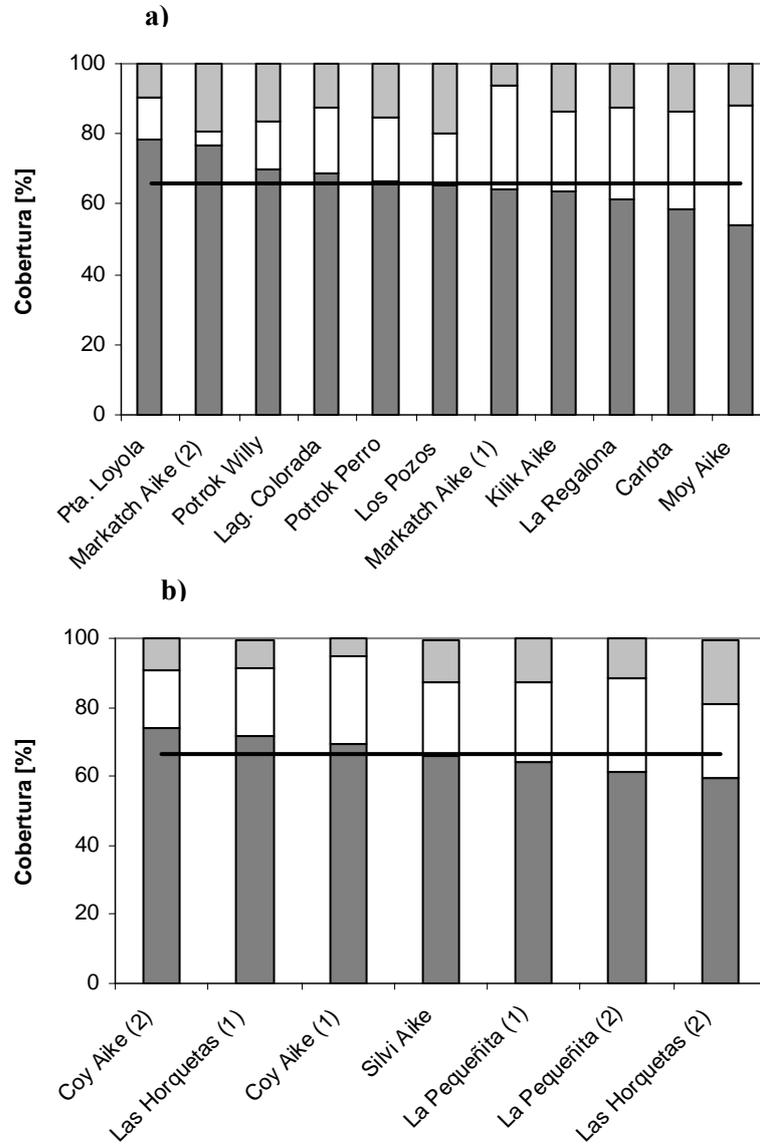


Figura 2.4. Cobertura vegetal (■), de suelo desnudo (□) y de mantillo (▒) de los sitios muestreados en a) Estepa Magallánica Seca y b) Matorral de Mata Negra. La línea horizontal indica el promedio de cobertura vegetal de cada área ecológica.

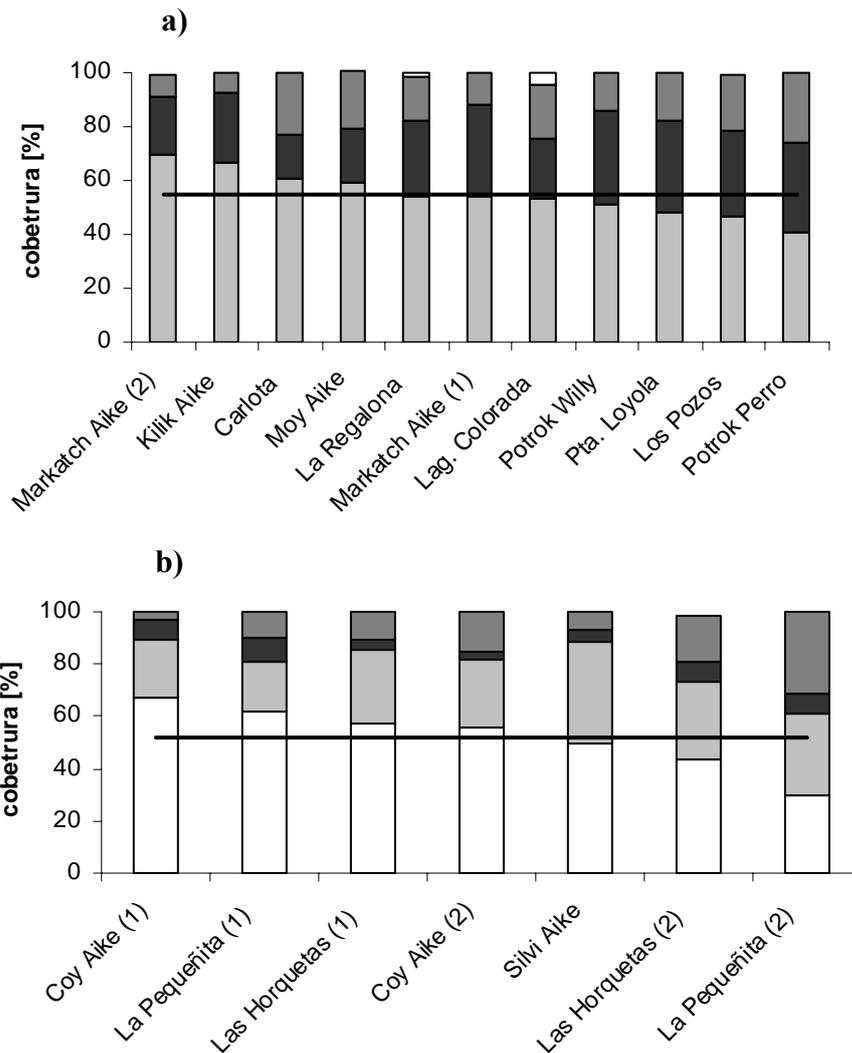


Figura 2. 5. Cobertura vegetal relativa, por forma de vida: intercoironal (■), coirones (■), subarbustos (■) y arbustos (□), para las dos áreas ecológicas estudiadas a) EMS y b) MMN. La línea horizontal indica el promedio de cobertura vegetal del estrato dominante en cada área ecológica, es decir, en a) es la cobertura promedio del estrato intercoironal y en b) la cobertura promedio del arbustivo.

En el MMN la cobertura vegetal media del estrato arbustivo, medida con el método Canfield, fue de 40,4 %. La altura promedio de los arbustos resultó ser de 43,4 cm ($ds=9,8$). El sitio Las Horquetas (2) presentó los arbustos de mayor porte (55 cm en promedio), mientras que los de menor porte se encontraron en La Pequeñita (1) (31,5 cm). Sin embargo no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre las medias de las coberturas con ambos métodos (método de puntos y Canfield). Los sitios de MMN presentaron diferencias en cuanto a la estructura de tamaño de los arbustos. Los arbustos de mayor porte, fueron registrados en un sitio de baja cobertura arbustiva total como Las Horquetas (2), y los de menor tamaño en Silvi Aike y La Pequeñita (1) (Figura 2.6).

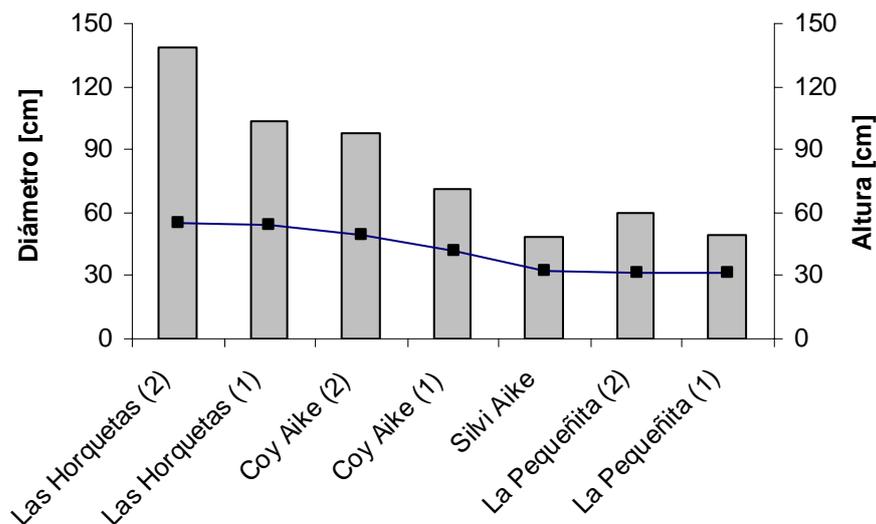


Figura 2. 6. Diámetro (barras) y altura (línea) promedio de los sitios de MMN, empleando Canfield.

Las coberturas de algunas formas de vida presentaron diferencias significativas entre las áreas ecológicas. La cobertura de arbustos, intercoironal, coironal, hierbas y pastos fueron diferentes con $p=0,05$ entre MMN y EMS. La única forma de vida que no presentó diferencias fue la subarborescente.

Riqueza, Diversidad y Equitatividad

En la EMS, considerando los 11 sitios, la riqueza, medida como el número promedio de especies por sitios muestreados fue de 21,8 ($\pm 2,71$ desvío estándar), con un total de especies presentes de 48, comprendida por un 39 géneros y 20 familias. Las especies presentes en todos los sitios de la EMS fueron *Festuca gracillima*, *Poa dusenii*, *Bromus setifolius*, *Carex andina*, *Festuca magellanica*, *Acaena poeppigiana* y *Cerastium arvense*. El índice de diversidad de Shannon fue de 2,9, y la equitatividad calculada fue de 0,7. En este área ecológica, el sitio que presentó mayor Shannon fue La Regalona (2,6) y el de menor valor fue Kilik Aike y Los Pozos (1,9) (Figura 2.7. a). Los valores de equitatividad indican que las especies están representadas de manera relativamente uniforme en todos los sitios.

Los sitios del MMN presentaron una riqueza promedio similar a la anterior, de 22,4 especies ($\pm 3,15$ ds). El número total de especies presentes en esta comunidad es de 54, que representan un total de 33 géneros y 19 familias. Las especies dominantes fueron *Junellia tridens* y *Poa lanuginosa*. El índice de diversidad de Shannon y el de equitatividad promedio, fueron 2,1 y 0,6 respectivamente. Los valores extremos del índice de Shannon se encontraron en los sitios Las Horquetas (2) (2,4) y Coy Aike (1) (1,4) (Figura 2. 7. b). Los valores de equitatividad indicarían que en algunos sitios del área MMN existen algunas especies dominantes, por ejemplo los sitios Las Horquetas (1), Las Horquetas (2) y La Pequeñita (2) presentan dominancia de algunas especies subarborescentes (*Nassauvia ulicina* y *Verbena odonelli*).

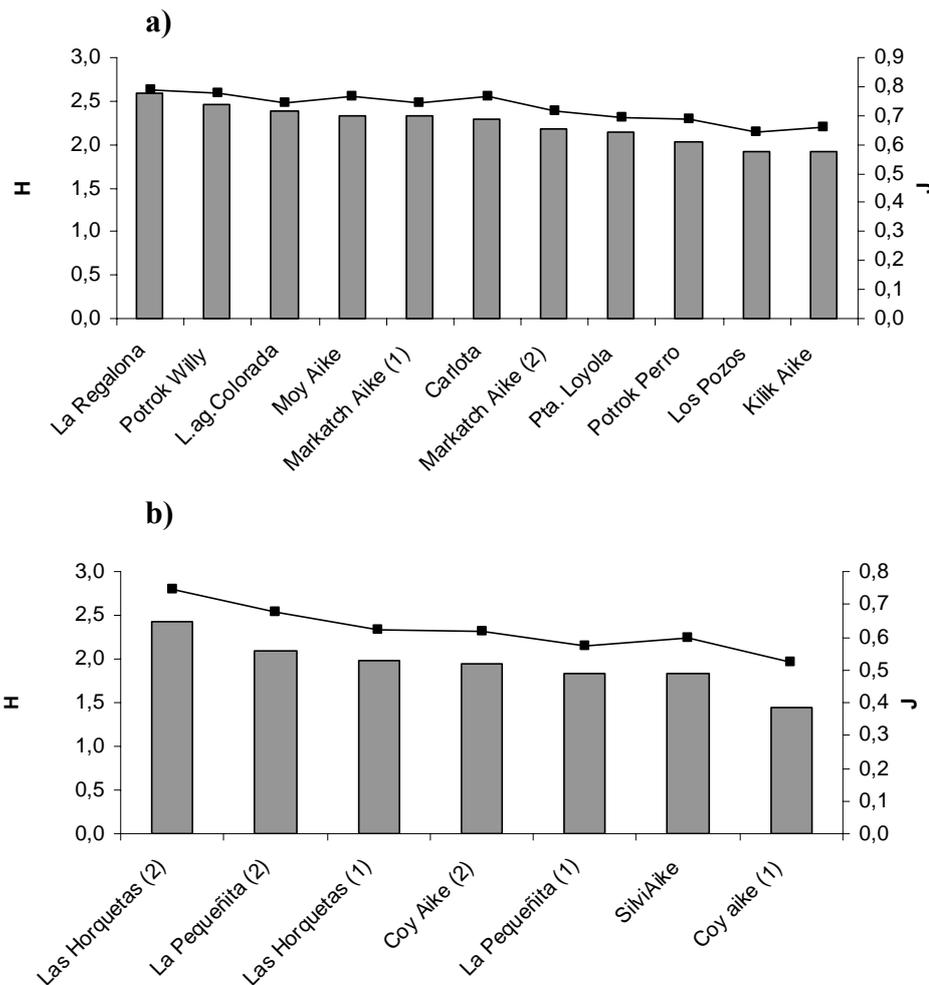


Figura 2.7. Índice de diversidad de Shannon (H) (barras grises) y Equitatividad (J) (línea) para los sitios de a) Estepa Magallánica Seca y b) Matorral de Mata Negra.

Un total de 69 especies fueron encontradas en los 18 censos realizados. De las 23 familias presentes, las más representadas fueron Poáceas (16 especies), seguida por las Asteráceas (11 especies). En el segundo relevamiento (octubre del 2005) se encontraron especies no registradas el año anterior, posiblemente asociadas al momento del año, como *Phaiophleps biflora*, *Hamadryas delfinii*, *Plantago sp* y *Taraxacum sp*. El 44 % de los sitios presentó musgos y el 77 % presentó líquenes. La diversidad alfa fue de 22.8 ($ds=2.71$) en EMS y 21.4 ($ds=3.15$) en MMN. Existieron en los censos, especies solo presentes en una de las dos áreas ambientales, por ejemplo dentro de EMS se encontraron individuos de *Azorella monanthos*, *Calceolaria uniflora*, *Hypochoeris incana*, no observados en MMN, mientras que especies como *Junellia tridens*, *Nassauvia ulicina*, *Poa lanuginosa*, *Senecio magellanicum* y *Stipa neaei* se encontraron solo en MMN (Tabla 1. ANEXO). La diversidad β resultó similar entre áreas ecológicas $\beta_{EMS}= 2,22$ y $\beta_{MMN}= 2,41$.

Determinación de comunidades

El análisis de componentes principales y la tabla fitosociológica permitieron diferenciar claramente los sitios de EMS y MMN. Existieron especies exclusivas de cada área (Tabla 1 y 2 ANEXO). En MMN además de *Junellia tridens* se presentaron

individuos de *Nassauvia ulicina*, entre las de carácter leñoso, y algunas especies del género *Stipa*. En EMS, por su parte, se encontraron ejemplares de algunas gramíneas cortas (*Agrostis spp.*, *Deschampsia flexuosa*) y algunas hierbas (género *Hypochoeris*, *Viola*).

La existencia de diferentes comunidades quedó evidenciada tanto en la tabla fitosociológica como en el análisis de agrupamiento. Cuatro grupos, florísticamente diferentes se encontraron en el área de estepa (Figura 2.8 a) y tres en el de matorral (Figura 2.8 b). Claramente el sitio Carlota (EMS) se separó de los otros grupos.

El patrón de asociación de los sitios de EMS establecido a partir del análisis del dendrograma (Figura 2.8) y de la tabla fitosociológica (Tabla 2. ANEXO), permitió identificar unidades de vegetación considerando los Estados y Transiciones determinados para este ambiente. Así, por ejemplo, los sitios con mayor cobertura de coirones (Estado II y III), quedaron agrupados (EMS 1), mientras que el único sitio con importante grado de degradación (Estado VI), presentando una elevada cobertura de subarbustos (Borrelli *et al.*, 2001a), quedó individualizado (EMS 4). (Figura 2. 5 a).

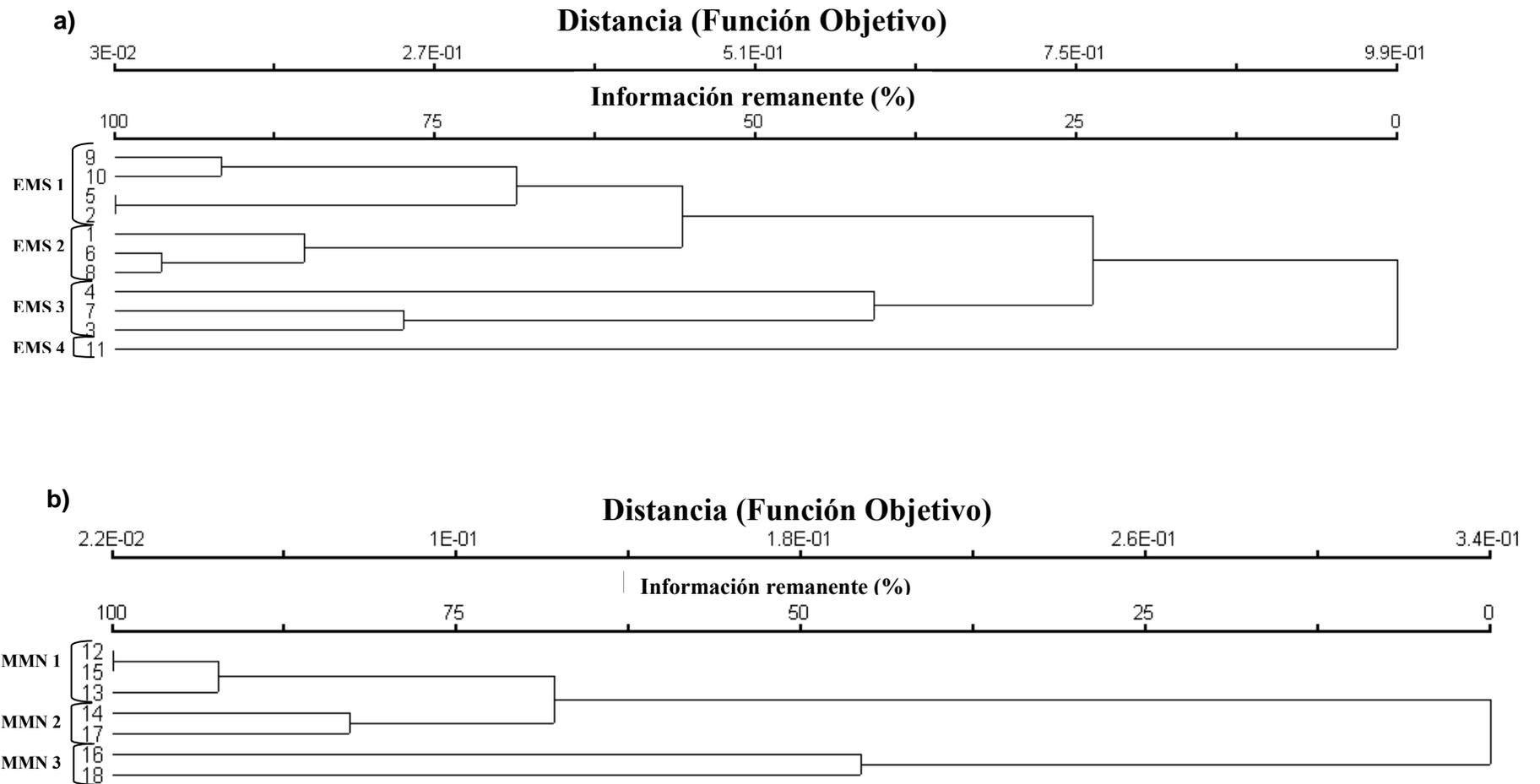


Figura 2.8. Dendrogramas del análisis de agrupamiento de la matriz de cobertura por especie, para el área de a) EMS y b) MMN.

En el Análisis de Componentes principales de EMS el 60% de la variabilidad de los datos fue explicada por los dos primeros Componentes (Eje I 36% y Eje II 24%) (Tabla 3. ANEXO). La variación total acumulada y explicada por los tres primeros ejes alcanzó el 75.5%. Las especies positivamente asociadas con el Componente I fueron *Poa duseonii*, *Stipa ibari* y *S. chrysophylla*, mientras que *Festuca gracillima* lo hizo en sentido inverso. Se relacionaron con el Componente II *Carex andina*, y *Stipa ibari* y *Nardophyllum brioides*, de manera positiva y *Poa duseonii* en el otro extremo. En el ambiente de MMN el primer componente del PCA explicó el 73% de la variabilidad de los datos (Tabla 4. ANEXO), mientras que el Componente II solo lo hizo en un 11%. Un subarbusto indeterminado (perteneciente a la familia *asteraceaes*) y *Poa duseonii* fueron relacionadas positivamente con el Eje I, y de manera negativa, lo hicieron *Junellia tridens* y *Stipa chrysophylla*. La ordenación de los sitios sobre el Eje II, estuvo dada por la asociación positiva con subarbusto indeterminado, *Junellia tridens* y *Poa duseonii*, y negativa con *Nassauvia ulicina*, *Nardophyllum brioides* y *Satureja darwinii*.

En EMS el primer eje del análisis de correspondencia de la matriz de especies por censo explicó el 58% de la variación de los datos, mientras que el Eje II solo explicó el 2%. (Figura 2.9 a). En el caso del MMN, el Eje I de la ordenación explicó el 88% de la variación, mientras el Eje II, solo el 0,05% (Figura 2.9. b).

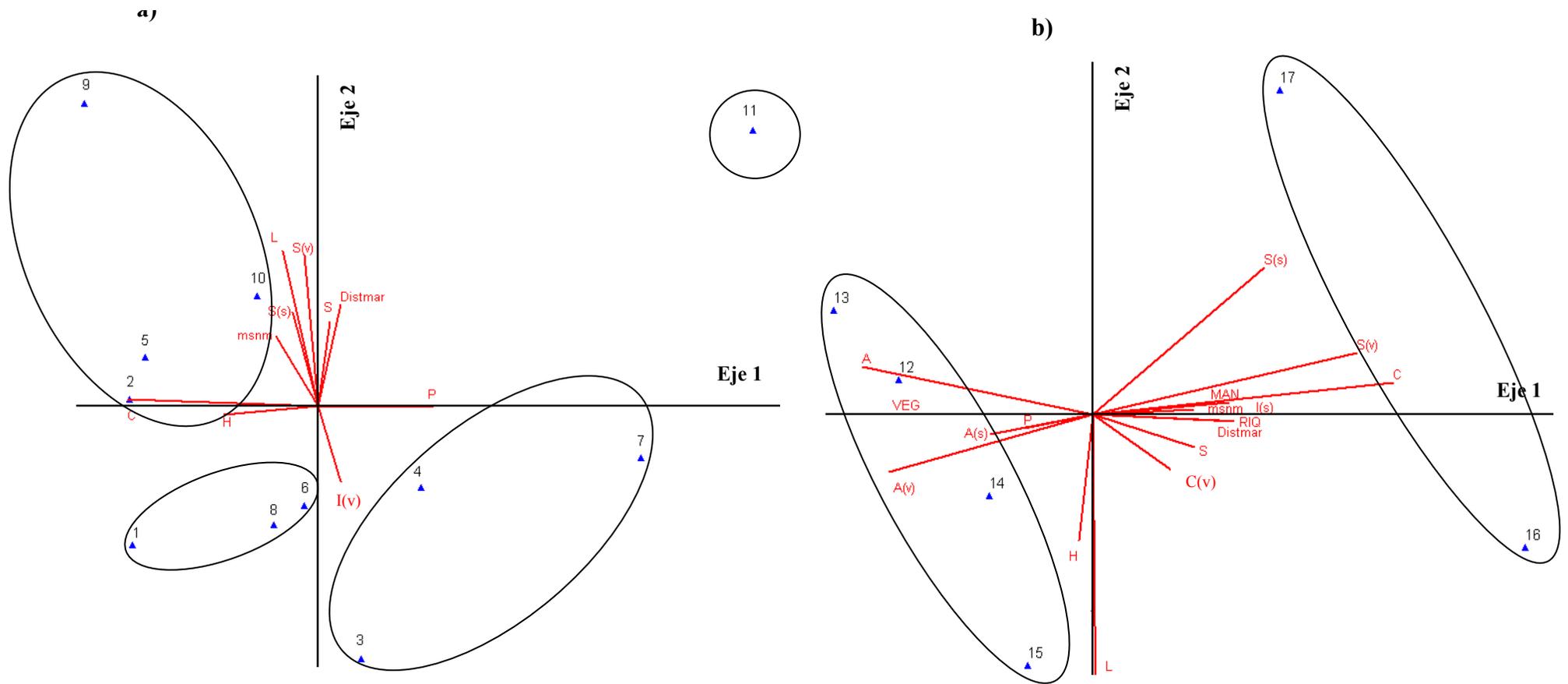


Figura 2.9. Ordenación los dos primeros ejes de la matriz de especies por sitios de a) EMS y b) MMN. RIQ= riqueza. Cobertura: MAN= Mantillo, SUD= Suelo desnudo, VEG= Vegetal, H= Hierbas, P= pastos, C= coirones, S= subarbustos, A= arbustos, L= líquenes. Biomasa: I=Intercoironal, C= Coironal, S= Subarbusivo, A= Arbustivo; fracciones: (v)= verde, (s)= seco. Variables ambientales: *msnm*= altura sobre el nivel del mar, *mm*= precipitación media anual, *Distmar*= distancia al mar.

El Análisis de correspondencia, en EMS, evidenció una correlación positiva del Eje I con cobertura de pastos, y de manera negativa se relacionó, principalmente con cobertura de coirones, mientras que el Eje II positivamente con cobertura de líquenes, distancia al mar y altura sobre el nivel del mar, y negativamente con biomasa de intercoironal verde y seca (Tabla 2.3). En MMN, el primer eje, correlacionó de forma positiva con cobertura de coirones y biomasa de subarbustos, y de manera negativa con cobertura de arbustos y biomasa de arbustos, mientras que Eje II con cobertura de subarbustos (positivamente) y con biomasa de arbustos (negativamente).

Tabla 2.3. Coeficientes de correlación de Pearson, para el análisis de correspondencia y la matriz secundaria (cobertura y biomasa por forma de vida y variables ambientales).
s/d= variables no corresponden al área ecológica.

| Variable | | EMS | | | MMN | | | |
|---------------------------|-------------------------------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|
| | | Eje I | Eje II | Eje III | Eje I | Eje II | Eje III | |
| Riqueza | | -0,274 | -0,204 | 0,144 | 0,638 | -0,14 | 0,227 | |
| Cobertura | Mantillo | 0,203 | 0,095 | 0,456 | 0,54 | 0,117 | 0,235 | |
| | Suelo desnudo | 0,059 | -0,311 | -0,29 | 0,22 | -0,068 | -0,468 | |
| | Vegetal | -0,110 | 0,181 | 0,108 | -0,76 | 0,044 | 0,177 | |
| | Hierbas | -0,53 | -0,164 | -0,12 | -0,199 | -0,602 | 0,692 | |
| | Pastos | 0,586 | -0,057 | -0,01 | -0,448 | -0,203 | -0,435 | |
| | Coirones | -0,755 | 0,146 | 0,282 | 0,932 | 0,304 | 0,139 | |
| | Subarbustos | 0,189 | 0,51 | -0,23 | 0,542 | -0,307 | 0,526 | |
| | Arbustos | s/d | s/d | s/d | -0,816 | 0,371 | -0,198 | |
| | Líquenes | -0,325 | 0,691 | 0,058 | -0,05 | -0,751 | -0,29 | |
| Biomasa | Intercoironal | verde | 0,287 | -0,532 | -0,16 | 0,093 | -0,184 | -0,307 |
| | | seca | 0,057 | -0,438 | -0,63 | -0,008 | -0,149 | -0,372 |
| | Coironal | verde | 0,198 | -0,286 | 0,568 | 0,489 | -0,409 | 0,087 |
| | | seca | 0,145 | -0,214 | 0,415 | 0,627 | 0,188 | -0,115 |
| | Subarbustivo | verde | -0,206 | 0,682 | -0,13 | 0,874 | 0,419 | -0,003 |
| | | seca | -0,274 | 0,538 | -0,08 | 0,704 | 0,649 | -0,167 |
| | Arbustivo | verde | s/d | s/d | s/d | -0,768 | -0,407 | 0,042 |
| | | seca | s/d | s/d | s/d | -0,544 | -0,238 | 0,448 |
| | Altura sobre el nivel del mar | | -0,355 | 0,463 | 0,355 | 0,524 | 0,396 | 0,524 |
| | Distancia al mar | | 0,262 | 0,559 | -0,06 | 0,605 | 0,517 | 0,605 |
| Precipitación Media Anual | | 0,091 | 0,053 | -0,11 | 0,085 | 0,424 | 0,085 | |

Discusión

En el presente capítulo se describieron algunos atributos estructurales de la vegetación de las áreas ecológicas Estepa Magallánica Seca y Matorral de Mata Negra que permiten su caracterización. El amplia área geográfica abarcada con los sitios de muestreo, permitieron lograr un detalle no desarrollado hasta el momento por otros trabajos en esta zona.

En términos generales los resultados de este capítulo permitieron establecer que existen diferencias significativas en la biomasa (total y algunas de las formas de vida) entre EMS y MMN. Claramente la biomasa del estrato coironal fue superior en EMS y la del arbustivo mayor en MMN, sin embargo no se encontraron diferencias en el intercoironal y subarbustivo. Los valores de biomasa encontrados en EMS (997 Kg MS/Ha) son similares a los reportados en la bibliografía (Cibils *et al.*, 2005; Fernandez *et al.*, 1991; Sala *et al.*, 1988). De acuerdo al modelo propuesto por Sala (Sala *et al.*, 1988) para pastizales naturales, lo esperado en la EMS, donde la precipitación acumulada anual promedio es de 219 mm anuales, corresponde una PPNA de 981 kg MS/Ha. Para otras estepas patagónicas (Distrito Occidental), Fernández y otros (1991) encontraron una PPNA total de 790 KgMS/Ha, esta menor productividad puede deberse a una menor precipitación. Cibils y colaboradores (2005) para un sitio de la EMS, Potrok Aike (también estudiado en esta tesis), midieron 939 KgMS/Ha (promedio de dos años). En EMS la biomasa del estrato intercoironal representa en promedio el 26% (18- 48%) de la biomasa total. Datos similares fueron hallados en la zona donde el 29% de la productividad total correspondió a pastos cortos y hierbas, el 33% a coirones y el 38% a subarbustos (Cibils *et al.*, 2005). En la zona las especies del estrato intercoironal son cosechadas para estimar la disponibilidad forrajera de los campos, y así poder asignar la carga animal adecuada, por lo que resulta de interés su estimación a partir de imágenes satelitales, uno de los objetivos de esta tesis.

No existieron diferencias estadísticamente significativas en relación a la cobertura vegetal total entre las áreas ecológicas EMS y MMN, pero sí en cuanto a la cobertura por formas de vida. Las diferencias entre áreas encontradas en esta tesis están dadas básicamente por la cobertura de arbustos, intercoironal, coironal y hierbas y pastos, pero no en a cobertura de subarbustos. Los sitios de ambos ambientes mostraron valores de cobertura total cercanos al 60% y similares a lo citado en bibliografía para cada área ecológica (Borrelli *et al.*, 1984; Humano *et al.*, 2005; León *et al.*, 1998; Movia *et al.*, 1987; Oliva *et al.*, 2001a). Humano y colaboradores (2005) midieron a través de 73 censos en el Campo Experimental Potrok Aike una cobertura total de 61% (32% intercoironal, 16% coironal y 13% subarbustos), similares a los encontrados en este trabajo. Conocer los datos de cobertura (total y por forma de vida) y biomasa (total y sus fracciones verde y seco/muerto) y su dinámica en el tiempo son de importancia al afectar la dinámica de nutrientes y agua del sistema y el reestablecimiento de la vegetación (Bahamonde *et al.*, 2005; Bertiller *et al.*, 2001; Ferrante, no publicado; Mazzarino *et al.*, 1998).

Los sitios de la Estepa Magallánica Seca presentaron características similares en cuanto a composición de especies y representatividad de cada una de ellas. En cambio, los sitios del MMN tienen una mayor variabilidad en estos atributos. Sin embargo este agrupamiento de los sitios en función de su composición florística no necesariamente es coincidente a los formados cuando se emplean variables de síntesis. Existieron especies

con alta frecuencia de aparición en los sitios pero no contribuyen demasiado a la biomasa total como *Cerastium arvense*, *Colobanthus subulatus* y *Festuca pyrogea*.

Las interacciones entre las actividades humanas (producción ganadera) y el pastizal tuvieron probablemente consecuencias sobre las variaciones en la estructura de la vegetación, que se manifiestan principalmente en la cobertura y en la diversidad de especies. La presencia y cobertura de determinadas especies es un indicador de la condición en la cual se encuentra el pastizal (Borrelli *et al.*, 1988; Borrelli *et al.*, 2001a; Oliva *et al.*, 1998). Así por ejemplo *Rytidosperma virescens*, *Deschampsia flexuosa* y *Bromus setifolius* son especies decrecientes en condiciones de pastoreo moderado a intenso, siendo *Luzula chilensis* la más sensible en estas situaciones. Basándose en estos autores y en los análisis de componentes principales y de correspondencia de esta tesis, los sitios que fueron catalogados como Estado II y III, se encuentran claramente bajo esta condición. Los subarbustos, principalmente *Nardophyllum briodes*, se presentaron con mayor cobertura en los sitios de estado de degradación más avanzado. La misma inferencia no pudo ser realizada para los sitios del MMN, por la inexistencia aún de un catálogo similar.

La tabla fitosociológica, el dendograma, PCA y AC permitieron establecer diferentes comunidades o grupos florísticos. El Eje I del PCA estableció la separación de los sitios de Estado más degradado (Ea. Carlota) de los menos degradados (Potrok Aike, Ea. Loyola y Ea. Los Pozos), en función de la correlación de este eje con la cobertura de coirones. Mientras que los sitios con mayor cantidad de biomasa de palatables (intercoironal) se separaron de en el Eje II de los sitios antes mencionados.

En función de las diferencias encontradas en este capítulo entre ambas áreas ecológicas, en cuanto a sus características estructurales, y considerando que diferentes índices espectrales de vegetación son empleados exitosamente en diferentes ambientes para describir la dinámica de tipos funcionales de ecosistemas, sería esperable también encontrar diferencias entre EMS y MMN con el uso de estos índices (Capítulo 3 y 4 de esta tesis).

**Capítulo 3. Caracterización espectral de las áreas ecológicas Estepa Magallánica
Seca y la transición a Matorral de Mata Negra**

Introducción

El uso de los índices de vegetación (IV's) como estimadores de características o condiciones de la vegetación, en diferentes biomas o regiones del mundo, es ampliamente conocido. En diversos estudios se ha encontrado una relación significativamente positiva entre los IV's con PPNA, biomasa, IAF, cobertura vegetal o evapotranspiración (Di Bella *et al.*, 2000; Fabricante, 2005; Goward *et al.*, 1985; Irisarri, 2008; Paruelo *et al.*, 1997a; Paruelo *et al.*, 2001a; Paruelo *et al.*, 2004) o variables climáticas como precipitación y temperatura (Anyamba *et al.*, 2005; Jobbágy *et al.*, 2002). Estas relaciones permiten estudiar temporal y espacialmente la fenología y dinámica de la cobertura vegetal (Chen *et al.*, 2001; Ebata *et al.*, 2001; Kaurivi *et al.*, 2003; Paruelo *et al.*, 2001a; Piñeiro *et al.*, 2006; White *et al.*, 1997; Zhang *et al.*, 2003), permitiendo discriminar diferentes coberturas, y en algunos casos estudiar efectos antrópicos como el pastoreo (Kawamura *et al.*, 2005; Oesterheld *et al.*, 1998; Oliva *et al.*, 1995), y en otros, analizar eventos climáticos como por ejemplo sequías (Guo *et al.*, 2004) o fenómenos como El Niño (Anyamba *et al.*, 2005).

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes índices espectrales de vegetación (Tabla 3.1). El Índice de Vegetación Normalizado (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index), que relaciona la fracción de rojo e infrarrojo cercano del espectro electromagnético, ha sido empleado desde hace más de 20 años a través de la serie NOAA-AVHRR. Las series temporales de este índice se ha aplicado con éxito en el monitoreo espacial y temporal de la actividad fotosintética en diferentes ecosistemas (Reed *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, 2003). La elección de un índice que evalúe el estado de la vegetación a partir de información espectral debe hacerse a partir de las potencialidades y limitaciones de la amplia variedad de índices mencionados anteriormente. El Índice de Vegetación Normalizado, puede por ejemplo, presentar saturación bajo situaciones de elevada cobertura vegetal, mostrando así una relación no lineal con el índice de área foliar (Giltelson *et al.*, 1996), o presentar interferencias frente a elevados porcentajes de suelo desnudo o vegetación senescente (Di Bella *et al.*, 2004a). Existen índices alternativos que solucionan este último inconveniente al considerar características ópticas del suelo, cuya determinación es empírica. Dentro de este grupo se encuentra el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI, Soil Adjusted Vegetation Index), y otros de características similares pertenecientes a la denominada familia SAVI (MSAVI, OSAVI). El índice EVI (Enhanced Vegetation Index) incorpora la reflectancia en la banda del azul y parámetros de correcciones atmosféricas, logrando una menor interferencia del suelo y de la atmósfera sobre la señal.

La posibilidad que brindan los sensores remotos de contar con imágenes repetidas de un mismo área en forma quincenal o mensual y la posibilidad de extraer información respecto de índices vinculados al comportamiento vegetal, permite comparar la evolución de diversas áreas naturales, describir su dinámica y establecer en forma más efectiva la productividad total y la forma de la curva de producción. El perfil temporal de los Índices de Vegetación ha sido empleado, por ejemplo, para el monitoreo de la cobertura vegetal verde y actividad fotosintética (Huete *et al.*, 1999). Así, por ejemplo, se han logrado identificar, describir y monitorear Tipos Funcionales de Ecosistemas en la Península Ibérica (Alcaraz *et al.*, 2006), Patagonia y otras zonas de América del Sur (Paruelo *et al.*, 2001a; Paruelo *et al.*, 1998c). El análisis de los atributos de las curvas de los índices de vegetación, entre los que se encuentran la *Integral Anual*, el *Momento del Máximo* y el *Rango Relativo*, son empleados con éxito

para tal fin. Paruelo y otros (Paruelo *et al.*, 1998c) lograron identificar “biozonas” en la Patagonia, con el uso de los atributos de los índices de vegetación.

En la provincia de Santa Cruz existen algunos trabajos que emplearon índices de vegetación como estimador de variables productivas. Oliva y otros (Oliva *et al.*, 1999; Oliva *et al.*, 1995) encontraron relaciones entre NDVI y disponibilidad forrajera en algunos establecimientos ganaderos dentro del área de Meseta Central. En otras zonas de la provincia no se obtuvieron similares resultados debido a la interferencia del suelo desnudo y tipo fisonómico en los valores de NDVI. Dada la importancia de realizar estimaciones del estado de la vegetación y la productividad en estas grandes áreas de pastoreo extensivo, el análisis de las diversas opciones de índices espectrales resulta relevante.

El contenido hídrico de la vegetación varía en función de su evolución fenológica, siendo afectado ésta por la temperatura, dentro de otras variables. Las plantas cuyas hojas se presenten turgentes, tendrán mayor reflectancia en la zona del IRC y menor en IRM, y viceversa, es decir, en momentos en que la vegetación presente estrés hídrico, disminuirá la reflectancia en la banda del IRC y aumentará en IRM. Existen índices espectrales que permiten obtener información de esta variable (contenido hídrico), al incorporar en su cálculo la banda del IRM. Uno de éstos es NDWI (Normalized Difference Water Index) (Hunt *et al.*, 1989) (Tabla 3.1). En la literatura se encuentra el uso de NDWI, también llamado NDII (Normalized Difference Infrared Index) ó SWVI (Short Wave Vegetation Index), con tres valores de IRM: 1,24 μm (Gao, 1996), 1,64 μm (Di Bella *et al.*, 2004b; Hunt *et al.*, 2007; Jackson *et al.*, 2004) y 2,13 μm (Gu *et al.*, 2007). Una disminución en la Temperatura Superficial (TS) del canopeo se observa a medida que la vegetación disminuye su contenido hídrico, por un decremento en la transpiración (estrategia para mantener su balance hídrico). Es decir que la TS, obtenida de imágenes satelitales, también permite inferir, al igual que los índices que emplean IRM, la cantidad de agua disponible y de esta manera determinar el comportamiento de la vegetación y las condiciones de humedad del suelo (Sandholt *et al.*, 2002).

En este capítulo se realiza la descripción espectral de la vegetación de la Estepa Magallánica Seca y el Matorral de Mata Negra, a través de los diferentes índices obtenidos y calculados a partir de las imágenes MODIS. Se analiza la variación de los índices a través del tiempo, para determinar cuál de ellos permite caracterizar de manera más adecuada el comportamiento de la vegetación y establecer los patrones fenológicos de las dos áreas ecológicas bajo análisis. Se espera que los índices que no son afectados por el suelo desnudo representen en mejor medida la dinámica vegetal de la zona y permitan observar un comportamiento diferencial en la dinámica del tipo de vegetación involucrado en cada área ecológica (EMS y MMN). En el presente capítulo se pretende realizar solo una descripción de la dinámica temporal y espacial de la vegetación con el uso de la información espectral, mientras que en el capítulo siguiente se relacionarán los índices más importantes presentados aquí con la información de campo (capítulo 2).

Materiales y métodos

Selección y tratamiento de las imágenes

Se emplearon imágenes correspondientes al sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) que se encuentra montado sobre la plataforma Terra. Las imágenes analizadas correspondieron a los productos *MOD13Q1 - Gridded Vegetation Indices* (MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid) y el producto *MOD11 - Land Surface Temperature & Emissivity* (MODIS/Terra land surface/emissivity 8-day L3 global 1Km SIN grid V005). Las primeras proveen información espacial y temporal de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), EVI (enhanced vegetation index), y reflectancias en las bandas del Rojo (620 - 670 nm), Infrarrojo Cercano (NIR -841- 876 nm), Azul (459 - 479 nm) e Infrarrojo Medio (MIR - 2105- 2155 nm). Son producto de una composición de 16 días y con una resolución espacial de 250 x 250 m por píxel. Las imágenes del producto *MOD11* contienen información acerca de la emisividad de los píxeles y temperatura de superficie (TS), son resultado de un compuesto de 8 días y poseen una resolución espacial de 1 km². De estas imágenes se seleccionó la capa de Temperatura Superficial (Ts). Estos valores se transformaron en grados centígrados utilizando el algoritmo: valor banda *0.02- 273.15 (Wan, 1999). Para ello se utilizó Model maker (©Erdas imagine 9.1). Los valores fueron extraídos para el píxel que contiene las áreas de muestreo a campo.

Las imágenes fueron obtenidas de EOS (Earth Observing System) LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) (<ftp://e4ftl01u.ecs.nasa.gov/MOLT/MOD13Q1.005/> y <ftp://e4ftl01u.ecs.nasa.gov/MOLT/MOD11A2.005/>, respectivamente) dependiente de NASA (National Aeronautics and Space Administration, EEUU). La escena que cubre la zona de trabajo es h13v14. Un total de 151 imágenes MOD13Q1 y 302 imágenes MOD11, correspondientes al período agosto 2003 a febrero 2010, incluyendo las 4 estaciones del año, fueron analizadas. Estos productos contienen correcciones geométricas y atmosféricas (Huete *et al.*, 1999), que reducen las distorsiones en las reflectancias debido a aerosoles, ozono y dispersión molecular.

A partir del formato original (extensión *HDF*- Hierarchical Data Format), las imágenes fueron transformadas a formatos compatibles con el software ERDAS. En un primer paso se transformaron de formato hdf a Geotiff, empleando para ello ENVI 3.5, y luego a extensión *img*, con el uso de *ERDAS imagine 9.1*. Cada imagen se reproyectó a Geographic (lat/ lon) Clarke 1866, para emplear información cartográfica de base ya existente, y se le asignó el día juliano correspondiente a la fecha de inicio de toma. Se generaron Áreas de Interés (AOI) de 3 x 3 píxeles con centro en la coordenada geográfica correspondiente a cada punto de muestreo a campo.

Se extrajeron los valores individuales de los píxeles de los AOI's en cada sitio, de NDVI, EVI y las otras bandas (Azul, Rojo IRC e IRM), necesarios para el cálculo de los otros índices de vegetación (Tabla 3.1). Para el cálculo de aquellos índices de vegetación que incluyen correcciones a partir del suelo desnudo, se emplearon los valores recomendados en bibliografía para sitios con cobertura vegetal intermedia (Gilbert *et al.*, 2002; Huete *et al.*, 2002; Justice *et al.*, 1998) por no contar con información específica de los sitios de muestreo. En el caso de las imágenes MOD11 se extrajeron los valores para el píxel que contiene las áreas de muestreo a campo.

La capa "Reliability" (Didan *et al.*, 2006) de las imágenes MOD13Q1 fue utilizada para comprobar la fiabilidad de cada píxel extraído. Este parámetro tiene cinco

categorías 0= píxel con valor fiable, 1= valor semifiable (poca dispersión atmosférica), 2= nieve/hielo, 3= nubes y 4= sin datos. Se eliminaron aquellos pixeles con fiabilidad 2 y 3, no observándose valores de 4. Los valores eliminados fueron reemplazados por el promedio de los valores del mismo píxel en la fecha próxima anterior y posterior. Los pixeles con baja fiabilidad se presentaron en épocas invernales (días julianos 161, 177, 193 y 209), resultando en un reemplazo solo el 1.8 % del total de pixeles analizados.

Tabla 3.1. Principales índices de vegetación citados en la literatura (modificada de Wan (1999) y Gilabert et al. (2002))

| Índice | Ecuación | Característica | Autor |
|--|---|--|-------------------------|
| Ratio Vegetation Index | $RVI = \frac{IRC}{R}$ | De fácil cálculo. Sensible a las características ópticas del suelo. | Pearson & Millar (1972) |
| Normalized Difference Vegetation Index | $NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$ | Disponible para una serie larga de tiempo. Afectado por alta biomasa y suelo desnudo. | Rouse et al (1974) |
| Soil Adjusted Vegetation Index | $SAVI = \frac{(IRC - R)(1 + l)}{(IRC + R + l)}$ | Usado en áreas con vegetación escasa. Es necesario calibración local de l (factor de corrección del suelo) | Huete (1988) |
| Infrared Percentage Vegetation Index | $IPVI = \frac{IRC}{IRC + R} = \frac{1}{2}(NDVI + 1)$ | Similar a NDVI, pero con valores positivos. Sensible a características del suelo | Crippen (1990) |
| Modified SAVI | $MSAVI = \frac{2 IRC + 1 - (\sqrt{(2 IRC + 1)^2 - 8 (IRC - R)}}{2}$ | Minimiza el efecto del suelo. | Qi et al (1994) |
| Optimized SAVI | $OSAVI = \frac{IRC - R}{IRC + R + Y}$ | Minimiza el efecto del suelo. Necesita calibración de Y . | Rondeaux et al (1996) |
| Enhanced Vegetation Index | $EVI = \frac{2,5(IRC - R)}{IRC + C_1 * C_2 * Az + l}$ | Minimiza problemas de reflectancia del suelo y aerosoles. Sólo disponible a partir del año 2000 (MODIS) | Huete et al. (2002) |
| Normalized Difference Water Index | $NDWI = \frac{IRC - IRM}{IRC + IRM}$ | Responde al contenido hídrico de las plantas | (Hunt et al., 1989) |

IRC= Infrarrojo Cercano; IRM= Infrarrojo Medio; R= Rojo; Az= Azul; l = factor de corrección del brillo del suelo; C_1 y C_2 son coeficientes de correlación de aerosoles. Los valores utilizados en los parámetros son los recomendados en bibliografía para sitios con nivel de canopeo intermedio: $Y = 0,16$ y $l = 0,5$. Los coeficientes de EVI se consideraron $C_1 = 6$ y $C_2 = 7,5$ y $l = 1$.

Se realizó un análisis de correlación, con previa comprobación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas (sig. 0,05), con los índices de vegetación y la reflectancia de las diferentes bandas extraídas de las imágenes. Esto permitió establecer el grado de la relación existente entre ellos y de esta manera reducir las descripciones sólo para los índices más representativos.

Análisis de la variación espacio temporal de la información espectral

Variación espacial de los Índices de Vegetación

Para analizar este aspecto se consideraron los siguientes atributos derivados de la curva estacional de los índices de vegetación (Figura 3.1): *Integral Anual (I)*, *Rango Relativo* anual (RRel), el valor y *Momento del Máximo IV* registrado (*MMax*) (Figura 3.1). Con estos atributos se resume la mayor parte de la variabilidad de los IV's (Jobbágy *et al.*, 2002; Paruelo *et al.*, 2001a; Paruelo *et al.*, 1998a). La *Integral Anual* de los índices, es un buen estimador de la radiación fotosintéticamente activa que es interceptada por la vegetación a lo largo del año, parámetro este asociado a la PPNA. El *Rango Relativo* y el *Momento del Máximo* capturan las principales características de la estacionalidad de la ganancia de carbono en el ecosistema (Irisarri, 2008; Paruelo *et al.*, 1995), es decir que el *Rango Relativo* anual además permite observar la variabilidad de la productividad dentro del año, mientras que el *Momento del Máximo IV* está relacionado con el momento de máxima producción de biomasa verde.

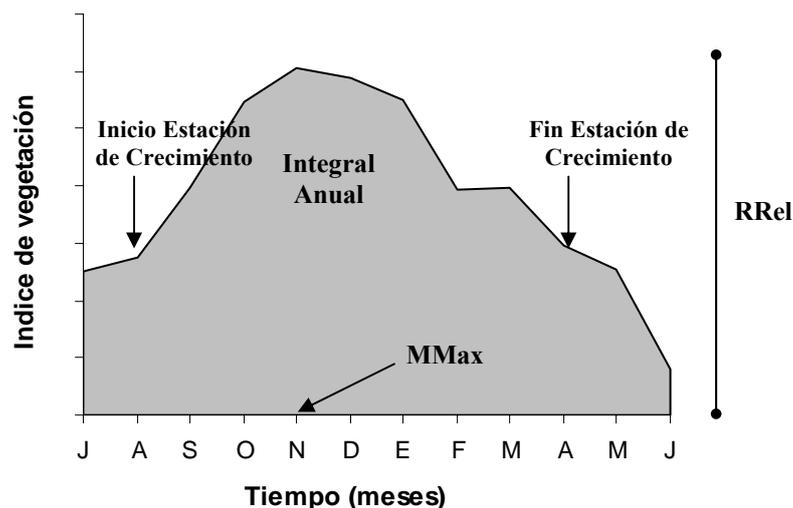


Figura 3.1. Esquemmatización de los atributos estudiados en la curva de Índices de Vegetación, donde el área sombreada corresponde a la Integral Anual de IV y MMax= Momento del valor Máximo y RRel= Rango Relativo.

La Integral Anual se calculó como el promedio de los meses dentro de cada año productivo, es decir de agosto de un año a mayo del año siguiente, no tomando en cuenta los meses de junio y julio, por lo que se obtuvo un valor por estación de crecimiento (2003/ 04, 2004/ 05, 2005/ 06, 2006/ 07, 2007/ 08, 2008/ 09, 2009/ 10). También se obtuvo la Integral Anual General, como el promedio de las integrales anuales de las 7 temporadas. El Rango Relativo anual se calculó como la diferencia entre el promedio de los valores máximos y promedio de los valores mínimos, dividido por la Integral Anual General. El Valor máximo se calculó como el promedio de los valores máximos de cada temporada y el *Momento del Máximo* como el mes con mayor frecuencia en obtener ese atributo en el total de años analizados, ambos sin considerar el período invernal (Mayo- Junio- Julio). Estos atributos de la curva de IV's se utilizan en la bibliografía únicamente para NDVI y EVI, por lo que se decidió emplearlos solo en la descripción de estos. Para los restantes índices sólo se estudiaron los valores promedios anuales y la evolución dentro del año y entre años.

Se realizaron comparaciones de media mediante test "T" para los valores de Integral Anual Media, Máximo, Mínimo y Rango Relativo medios por área ecológica. Las diferencias entre sitios dentro de un área ecológica se presentan a modo descriptivo.

Variación temporal de los Índices de Vegetación: variación intraanual (estacional) e interanual

La variación en el tiempo se estudió entre años (variación interanual), y dentro de la estación de crecimiento (variación estacional). Para evaluar la variación entre años se utilizó la Integral Anual de cada estación de crecimiento y el Coeficiente de Variación de la misma. Para caracterizar la estacionalidad de cada área ecológica se consideró el Rango Relativo Anual y el Momento del máximo. Se realizó un Test de "T", con una significancia de 0,05, para determinar si existen diferencias entre los valores promedio mensuales de los índices de vegetación de los sitios de MMN y EMS, en el análisis estacional. Para dicho análisis se empleó el programa SPSS 15.0.

Determinación de la estación de crecimiento

La estación de crecimiento es uno de los parámetros que caracteriza la fenología de las coberturas vegetales, y su inicio y finalización, así como su longitud están muy relacionadas con las condiciones climáticas (Jobbágy *et al.*, 2002). Existen distintos métodos que utilizan series temporales de IV's para determinar estas características del comportamiento vegetal. Estas aproximaciones incluyen: divergencia respecto de la media móvil (Reed *et al.*, 1994), momento en el cual el IV incrementa después que la temperatura del aire supera los 5°C (Kaduk *et al.*, 1996), o utilización de umbrales (Jobbágy *et al.*, 2002; Jönsson *et al.*, 2006; White *et al.*, 1997) entre otros. En esta tesis se decidió comparar dos metodologías de umbral: la propuesta por White *et al.* (1997) y la de Jobbágy *et al.* (2002). El primero plantea que el inicio y finalización de la estación de crecimiento queda determinado cuando el valor del índice de vegetación supera el umbral calculado como el promedio entre el valor máximo y el mínimo anual. En cambio Jobbágy *et al.* (2002), basado en Jönsson *et al.* (2006), propone que este umbral está fijado como el 25 % (20% según Jönsson) de la amplitud estacional del índice (máximo-mínimo) para cada año; donde éste mínimo (nivel base) se calculó como el promedio de los valores mínimos (mínimos a la izquierda y derecha del pico de crecimiento). Existen programas como el TIMESAT (Jönsson *et al.*, 2006) que extraen

automáticamente los parámetros de estacionalidad de la vegetación, como inicio y finalización de la estación de crecimiento, a partir de series temporales de información satelital. Sin embargo, en este trabajo la obtención de estos atributos se realizó con el uso planillas de cálculo. La longitud de la temporada de crecimiento se calculó como la cantidad de días entre la fecha de inicio y finalización de la estación de crecimiento. No se consideraron las temporadas de 2003-04 y 2009-10 por estar incompletas.

Resultados

Los diferentes índices y bandas espectrales resultaron en general con algún nivel de asociación en las dos áreas ecológicas bajo estudio (Tabla 3.2). El EVI resultó positiva y significativamente relacionado con SAVI y los índices de la familia SAVI, y con las bandas NIR y MIR, tanto en EMS como MMN. Mientras NDVI presentó una correlación más alta con RVI. Estas correlaciones permitieron tomar la decisión de realizar solo la descripción únicamente de NDVI y EVI como representativos de los demás índices.

Tabla 3.2. Coeficientes de correlación de Pearson entre los diferentes índices y bandas en a) EMS y b) MMN.

| | Area ecológica | NDVI | EVI | RVI | SAVI | MSAVI | OSAVI | NIR | MIR | BLUE |
|-------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| NDVI | EMS | 1 | 0,787(**) | 0,987(**) | 0,818(**) | 0,757(**) | 0,906(**) | 0,371 | 0,567 | -0,315 |
| | MMN | 1 | -0,079 | 0,628(*) | -0,057 | 0,049 | 0,377 | -0,412 | -0,299 | -0,690(*) |
| EVI | EMS | 0,787(**) | 1 | 0,769(**) | 0,964(**) | 0,970(**) | 0,920(**) | 0,835(**) | 0,918(**) | 0,252 |
| | MMN | -0,079 | 1 | -0,569 | 0,904(**) | 0,890(**) | 0,777(**) | 0,850(**) | 0,887(**) | 0,49 |
| RVI | EMS | 0,987(**) | 0,769(**) | 1 | 0,823(**) | 0,760(**) | 0,922(**) | 0,374 | 0,543 | -0,324 |
| | MMN | 0,628(*) | -0,569 | 1 | -0,517 | -0,406 | -0,323 | -0,538 | -0,657(*) | -0,562 |
| SAVI | EMS | 0,818(**) | 0,964(**) | 0,823(**) | 1 | 0,978(**) | 0,967(**) | 0,812(**) | 0,904(**) | 0,136 |
| | MMN | -0,057 | 0,904(**) | -0,517 | 1 | 0,937(**) | 0,851(**) | 0,834(**) | 0,878(**) | 0,479 |
| MSAVI | EMS | 0,757(**) | 0,970(**) | 0,760(**) | 0,978(**) | 1 | 0,932(**) | 0,856(**) | 0,901(**) | 0,206 |
| | MMN | 0,049 | 0,890(**) | -0,406 | 0,937(**) | 1 | 0,815(**) | 0,829(**) | 0,861(**) | 0,421 |
| OSAVI | EMS | 0,906(**) | 0,920(**) | 0,922(**) | 0,967(**) | 0,932(**) | 1 | 0,671(*) | 0,793(**) | -0,074 |
| | MMN | 0,377 | 0,777(**) | -0,323 | 0,851(**) | 0,815(**) | 1 | 0,491 | 0,624(*) | 0,06 |
| NIR | EMS | 0,371 | 0,835(**) | 0,374 | 0,812(**) | 0,856(**) | 0,671(*) | 1 | 0,898(**) | 0,589(*) |
| | MMN | -0,412 | 0,850(**) | -0,538 | 0,834(**) | 0,829(**) | 0,491 | 1 | 0,873(**) | 0,720(**) |
| MIR | EMS | 0,567 | 0,918(**) | 0,543 | 0,904(**) | 0,901(**) | 0,793(**) | 0,898(**) | 1 | 0,432 |
| | MMN | -0,299 | 0,887(**) | -0,657(*) | 0,878(**) | 0,861(**) | 0,624(*) | 0,873(**) | 1 | 0,690(*) |
| BLUE | EMS | -0,315 | 0,252 | -0,324 | 0,136 | 0,206 | -0,074 | 0,589(*) | 0,432 | 1 |

(*) Indica correlación significativa con un nivel de 0,05 y (**) de 0,01. NIR= Infrarrojo cercano, BLUE= Azul, MIR= Infrarrojo medio.

1. Dinámica funcional de la EMS y MMN

Diferencias estadísticamente significativas fueron encontradas en el valor promedio de los IV's (Integral Anual General) entre áreas ecológicas siendo superior en Estepa Magallánica Seca en un 5,6 % para el NDVI y 8 % para el EVI. Al analizar como se comportan los demás atributos de los índices (Máximo, Mínimo, RRel) también se observa que existen diferencias entre las áreas ecológicas (Figura 3. 2). Para ambos índices la EMS evidenció un valor de Máximo y Mínimo más elevados que MMN. Las diferencias encontradas entre áreas ecológicas para estos atributos son cercanas al 3,3 % para el valor del máximo y 3,7 % para el mínimo en NDVI y de 10,5 % para el valor del máximo (diferente estadísticamente significativa) y 7 % para el mínimo en EVI. El valor del rango relativo del EVI resulta un 6,5 % superior en el MMN, si bien las diferencias no resultaron estadísticamente significativas.

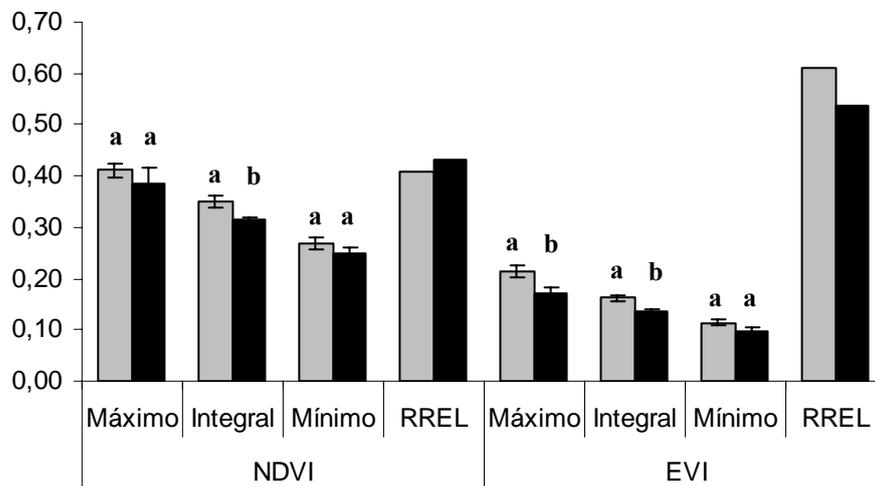


Figura 3. 2. Atributos de los Índices de Vegetación (NDVI y EVI), empleados en la caracterización de las áreas ecológicas. Las barras grises corresponden a EMS y las negras a MMN. RREL= Rango Relativo. Las barras corresponden a un error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$), entre tipos de vegetación.

El RREL aumentó a medida que el valor de la Integral de los IV's incrementó valores (Figura 3. 3. a y b). Los sitios de EMS presentaron los valores más altos en la Integral del índice, a un mismo RREL, indicando una mayor PPNA en los sitios de EMS (asumiendo que existe relación entre PPNA y IV's-I) y una estacionalidad similar entre los sitios de MMN y EMS.

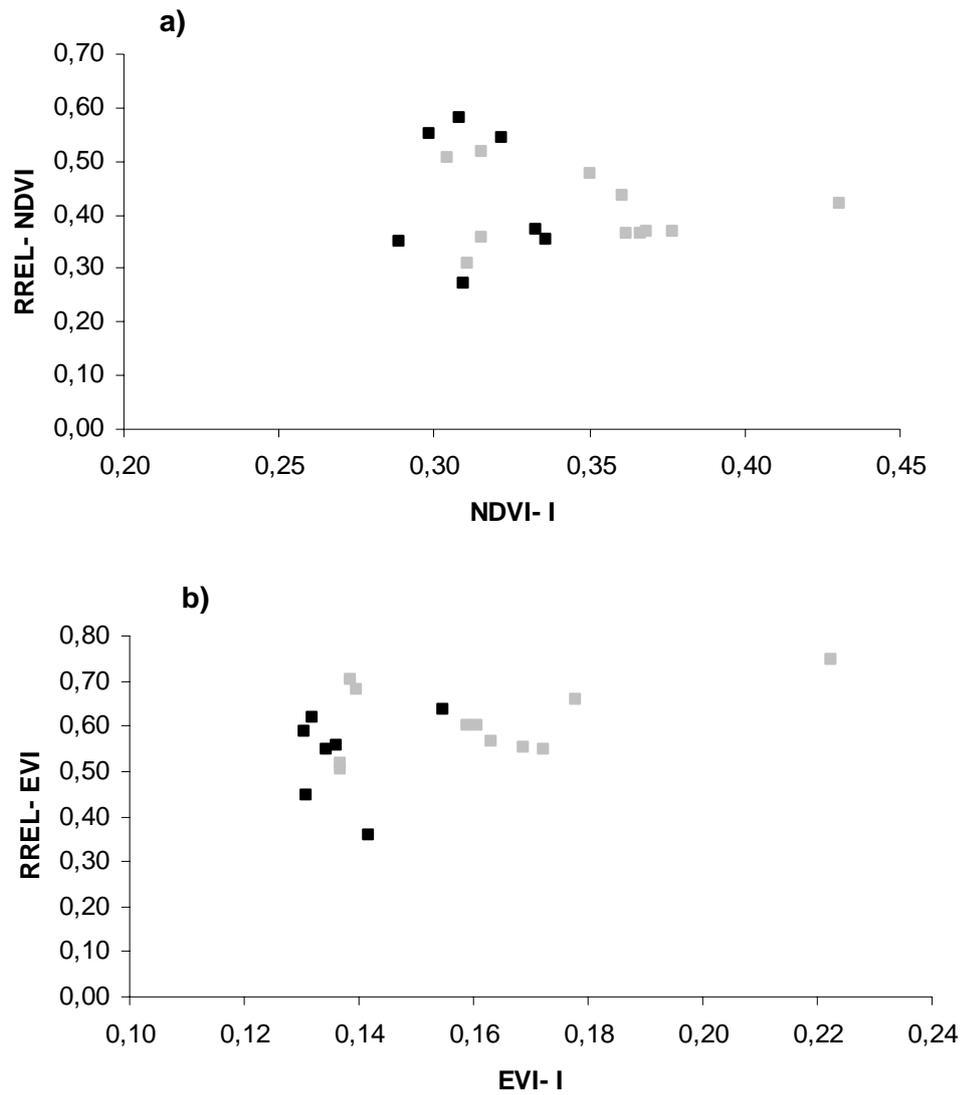


Figura 3. 3. Relación entre Rango Relativo (RREL) e Integral (I) de a) NDVI y b) EVI. Puntos grises corresponden a sitios de EMS y puntos negros a sitios de MMN.

Existieron variaciones dentro de cada área ecológica con respecto de la Integral Anual. Dentro de la EMS (Figura 3.4. a y Figura 1.a - ANEXO) el sitio que presentó valores más altos en todos los índices fue Markatch Aike (2), en cambio, los valores más bajos los presentó Moy Aike. En MMN (Figura 3. 4.b y Figura 1.b- ANEXO) los sitios con valores mayores fueron Las Horquetas (2), mientras que los menores fueron observados en Coy Aike (2).

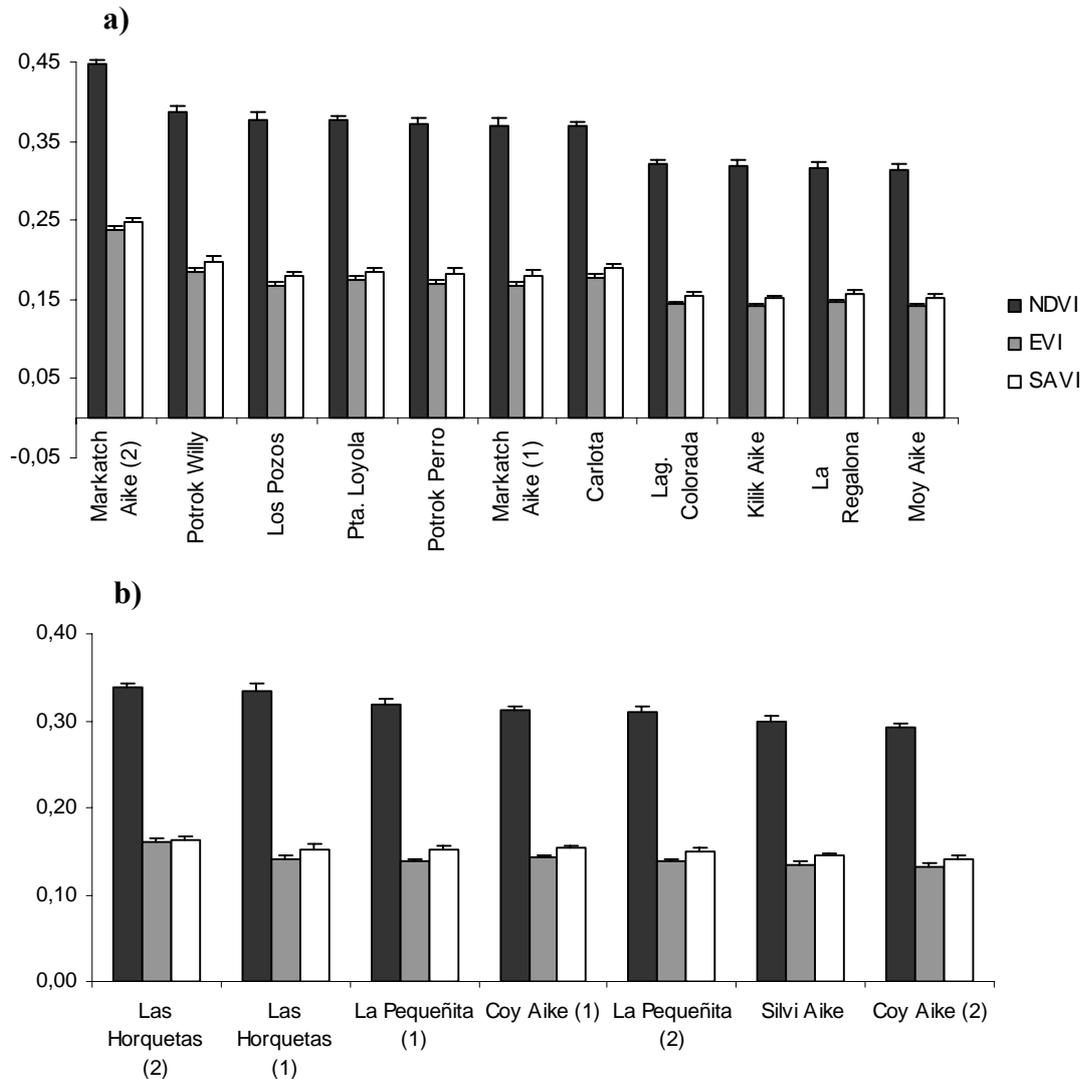


Figura 3.4. Variación dentro de cada área ecológica del promedio anual (Integral Anual General) de los índices de vegetación en a) Estepa Magallánica Seca y en b) Matorral de Mata Negra. Las barras verticales corresponden a un error estándar.

El comportamiento de los índices a lo largo de la serie analizada presentó el mismo patrón anual (Figura 3.5 y Figura 2 ANEXO). En general los valores más bajos se presentaron en invierno y los máximos en los meses de primavera verano, principalmente en Octubre y Noviembre (Tabla 3.3). Para algunas temporadas el MMN presentó valores elevados en ambos índices durante el período invernal posiblemente debido a la presencia de nieve o escarcha. Para todos los índices se evidenciaron mayores diferencias entre las áreas ecológicas en plena temporada de crecimiento, en

donde los valores de Estepa Magallánica Seca claramente fueron superiores a los del Matorral de Mata Negra. Las curvas de IV's para la EMS y el MMN tuvieron su máxima separación en las temporadas 2004-05 y 2005-06. En la mayoría de las temporadas el índice parece mostrar un aumento leve en otoño, posiblemente condiciones ambientales favorables permitieron un rebrote en la vegetación.

La Integral de NDVI y EVI presentó variaciones entre años en ambas áreas ecológicas. Una tendencia levemente decreciente se observó a través de las temporadas en la integral anual de los NDVI y EVI. La integral anual 2006/07 de los dos índices en ambas áreas ecológicas fue menor que el promedio general (promedio de todas las temporadas) (Figura 3. 5 a y b). Posiblemente esto esté relacionado con un ciclo climático a largo plazo y debería ser comparado con datos climáticos.

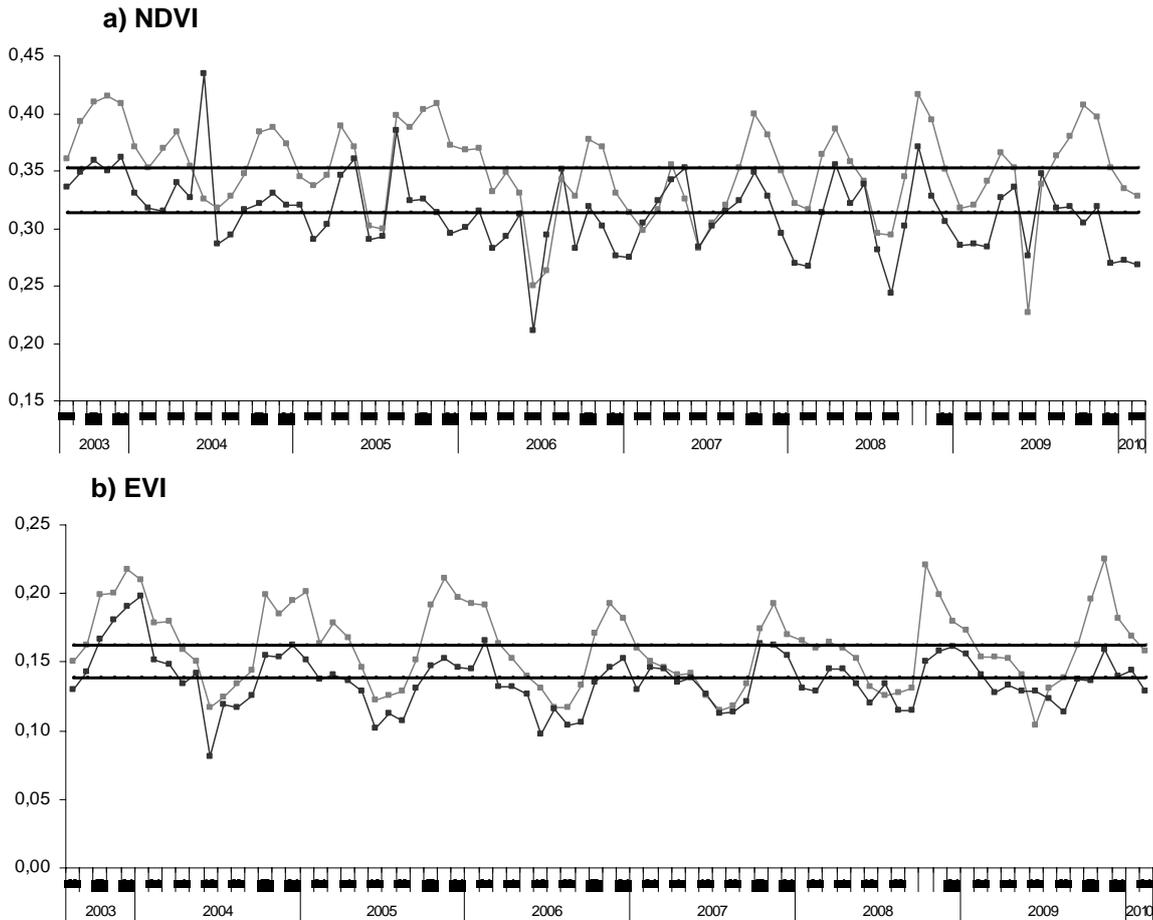


Figura 3. 5. Serie temporal de valores promedio mensuales de a) NDVI, b) EVI, para las temporadas de crecimiento analizadas. La línea de color gris corresponde a EMS y la negra a MMN. La línea horizontal representa la integral promedio general para cada área ecológica.

El momento de máximo y mínimo valor ocurrió en diferentes meses para EMS y MMN en NDVI y EVI (Tabla 3. 3). El momento de máximo se obtuvo en EMS en la segunda quincena de octubre para NDVI y 15 días más tarde en EVI, mientras que en MMN para NDVI fue durante la primera quincena de agosto y para EVI durante la primera de enero. Los valores mínimos se observaron en el invierno en las dos áreas ecológicas para los dos índices.

Tabla 3.3. Momento de máximo y mínimo para todas las temporadas (2003-2010)

| Área Ecológica | Máximo | | Mínimo | |
|----------------|--------------|---------------|-----------|-----------|
| | NDVI | EVI | NDVI | EVI |
| EMS | 2Q- Octubre* | 1Q- Noviembre | 1Q- Junio | 1Q- Julio |
| MMN | 2Q- Octubre* | 1Q- Noviembre | 1Q- Junio | 1Q- Julio |

Donde 1Q y 2Q corresponde a la primera y segunda quincena respectivamente.

* Presencia de un segundo pico en la 2Q de Abril.

Los valores máximos absolutos alcanzados a lo largo de la serie analizada fueron siempre superiores en EMS (Tabla 3.4). El máximo en EMS (0,42 en NDVI y 0,22 en EVI) fue registrado en la temporada 2003-04, pero los índices lo presentaron en momentos diferentes (Octubre '03 para NDVI y Noviembre '03 para EVI) (Tabla 3.4). Sin embargo los valores mínimos presentaron un comportamiento diferente (valores más altos se encontraron para MMN en NDVI y levemente inferiores en EVI), pero fueron registrados en el mismo momento del año (Junio). El valor del máximo promedio fue superior en EMS para ambos índices (Tabla 3.4). EMS alcanzó valores superiores y con una menor variación entre años de este atributo (NDVI=0,40, CV=3,6% y EVI=0,2, CV=5,4%) que el área de matorral (NDVI=0,36, CV=4,5% y EVI=0,17, CV=9,4%).

Tabla 3.4. Integral Anual y los 3 valores máximos y mínimos (y momento de ocurrencia) de NDVI y EVI para la serie analizada (2003-2010).

| Área Ecológica | Índice | Máximo* | Mínimo* | Integral Anual General |
|----------------|--------|--------------------|---------------|------------------------|
| EMS | NDVI | Oct-03 (0,42) | Jun-04 (0,10) | 0,36 (ds= 0,02) |
| | | Oct-05 (0,41) | Jun-05 (0,18) | |
| | | Oct-08 y 09 (0,41) | Jun-06 (0,18) | |
| | EVI | Nov-03 (0,22) | Jun-04 (0,11) | 0,17 (ds=0,01) |
| | | Nov-05 (0,22) | Jun-06 (0,11) | |
| | | Nov-09 (0,22) | Jun-07 (0,11) | |
| MMN | NDVI | Ago-05 (0,39) | Jun-05 (0,18) | 0,32 (ds=0,01) |
| | | Oct-08 (0,37) | Jun-06 (0,14) | |
| | | Abr-08 (0,36) | Ago-08 (0,20) | |
| | EVI | Ene-04 (0,20) | Jun-04 (0,09) | 0,14 (ds=0,01) |
| | | Feb-06 (0,17) | Jun-06(0,09) | |
| | | | Ago-08 (0,1) | |

*Los valores entre paréntesis corresponden a al valor del atributo

En términos generales las formas de las curvas de la EMS y del MMN para los diferentes índices describen un comportamiento similar dentro del año (Figura 3.6 y Figura 3- ANEXO). Las diferencias entre las áreas ecológicas estuvieron dadas básicamente por el valor de cada índice en los distintos meses (promedio mensual considerando las temporadas de crecimiento 2003/04 a 2009/10). En la Figura 3.6 y Figura 3- ANEXO puede observarse como los sitios de Estepa presentaron valores promedios mensuales más altos que los sitios de Matorral para todos los índices, alcanzando su mayor diferencia entre los meses de octubre-noviembre (momento del máximo). Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ambientes, durante gran parte del año, excepto en invierno. EVI y SAVI presentan una dinámica similar con una distribución unimodal, obteniendo su máximo valor avanzada la primavera (octubre- noviembre) y un mínimo en época invernal. Mientras que NDVI mostró un comportamiento particular, con dos máximos dentro del año en ambos tipos de vegetación, uno de mayor magnitud en Noviembre y otro más pequeño en Abril (más importante en Estepa) y un mínimo también en el invierno.

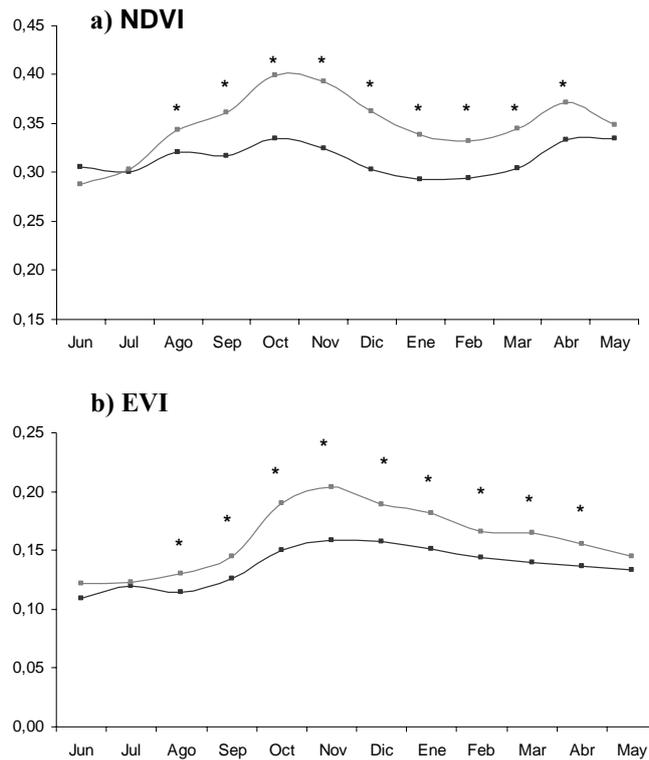


Figura 3. 6. Comportamiento anual de a) NDVI y b) EVI para EMS (gris) y MMN (negro). Nótese el comportamiento bimodal de NDVI. En gris EMS y en negro MMN. Asteriscos indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tipos de vegetación.

Dentro de la Estepa Magallánica se pudo observar que los sitios abarcaron una gran amplitud de situaciones respecto a los valores de los índices estudiados. Para todos los índices, el sitio Markatch Aike (2) presentó los valores más altos durante todo el año; Moy Aike, La Regalona, Laguna Colorada y Kilik Aike presentaron los más bajos, mientras que el resto de los sitios se encontró en situaciones intermedias. En el Matorral de Mata Negra, el sitio con valores más altos fue Las Horquetas (1), y los más bajos los presentó Coy Aike (2). Estas variaciones dentro de cada área ecológica están asociadas a la cobertura y biomasa vegetal (Capítulo siguiente).

Los índices mostraron variaciones entre años para un mismo mes en ambas áreas ecológicas (Figura 3.7). Para las dos áreas ecológicas NDVI mostró importantes variaciones entre años principalmente durante los meses de invierno, alcanzando valores máximos en Junio de hasta 31 % en EMS y 43 % en MMN. EVI, por su parte, presentó altos coeficientes de variación tanto en invierno como en verano (principalmente en Diciembre). Los valores mínimos se encontraron en primavera temprana y otoño, para ambos índices, tanto en EMS y MMN. El resto del año las variaciones fueron menores tanto en EMS como en MMN, aunque los sitios de EMS resultaron tener mayores valores que los de MMN en ambos índices.

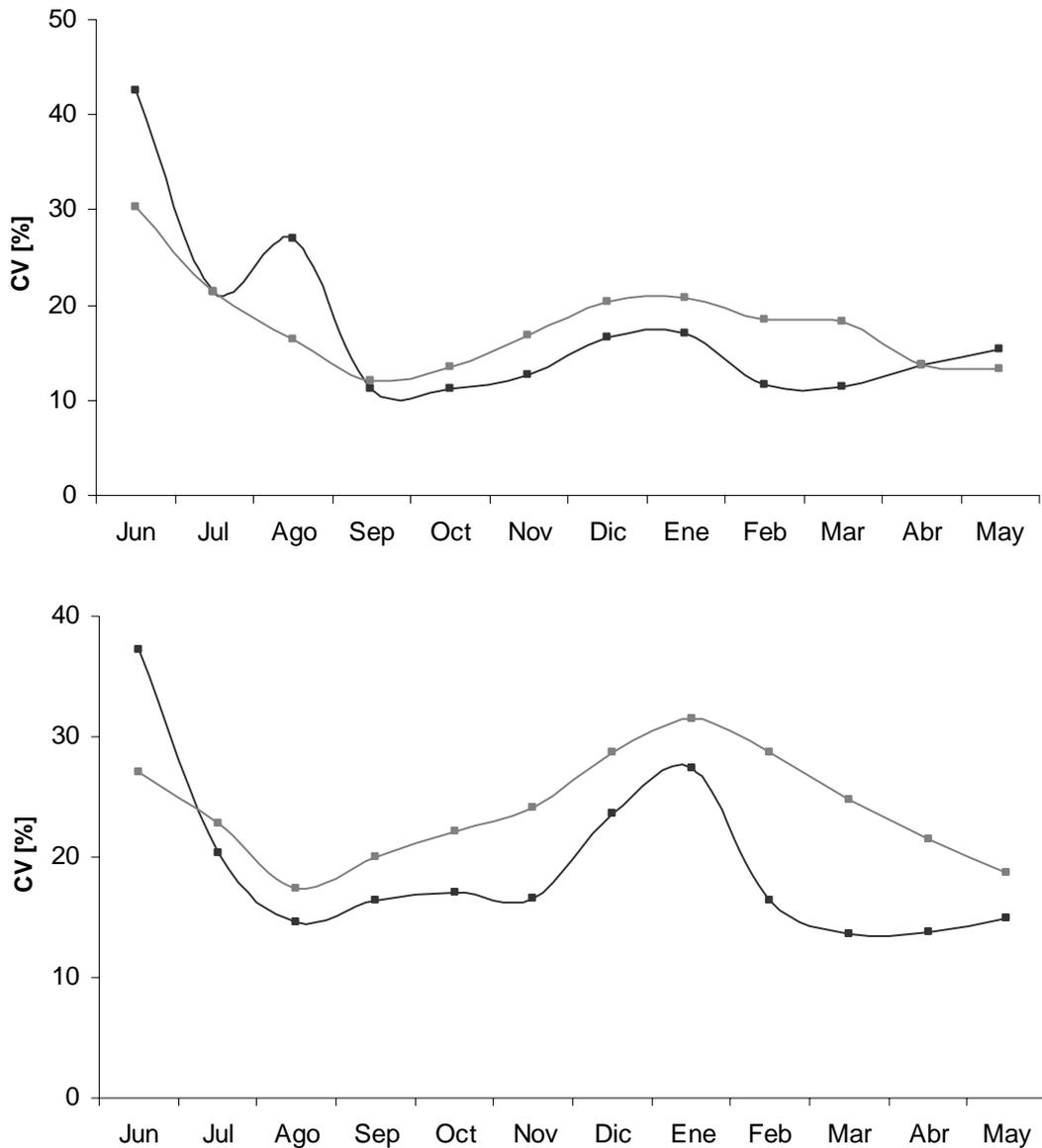


Figura 3. 7. Variación relativa mensual (entre años) de la dinámica anual de a) NDVI y b) EVI para EMS (gris) y MMN (negro).

2. Determinación de la estación de crecimiento

En función de lo propuesto por White *et al.*(1997) y considerando el comportamiento bimodal del NDVI dentro del año se pudieron reconocer dos períodos de crecimiento, y por lo tanto detectar dos momentos inicios y dos de finalización. Mientras que EVI mostró anualmente una sola estación de crecimiento. El momento de inicio de la estación de crecimiento se observó antes en NDVI para ambos tipos de vegetación.

Cuando se analiza NDVI, en términos generales, la Estepa Magallánica Seca mostró el inicio y finalización de la primera estación de crecimiento (MI₁ y MF₁ respectivamente) más tardío (MI₁ a mediados de agosto y MF₁ a fines de diciembre) que el Matorral de Mata Negra (MI₁ a fines de julio y MF₁ a principios de diciembre),

en cambio ocurrió lo inverso en el rebrote de otoño, es decir MI_2 y MF_2 de EMS ocurrió más temprano (mediados de marzo (finalizando en los últimos días de mayo)) que MI_2 y MF_2 de MMN (fines de marzo hasta mediados de junio) (Figura 3.8 a).

No se encontraron diferencias en el momento de inicio de la estación de crecimiento entre Estepa Magallánica Seca y Matorral de Mata Negra (fines de septiembre) con EVI. Sin embargo, el período de crecimiento finalizó antes en EMS (fines de Marzo) que en MMN (fines de mayo) (Figura 3.8 b).

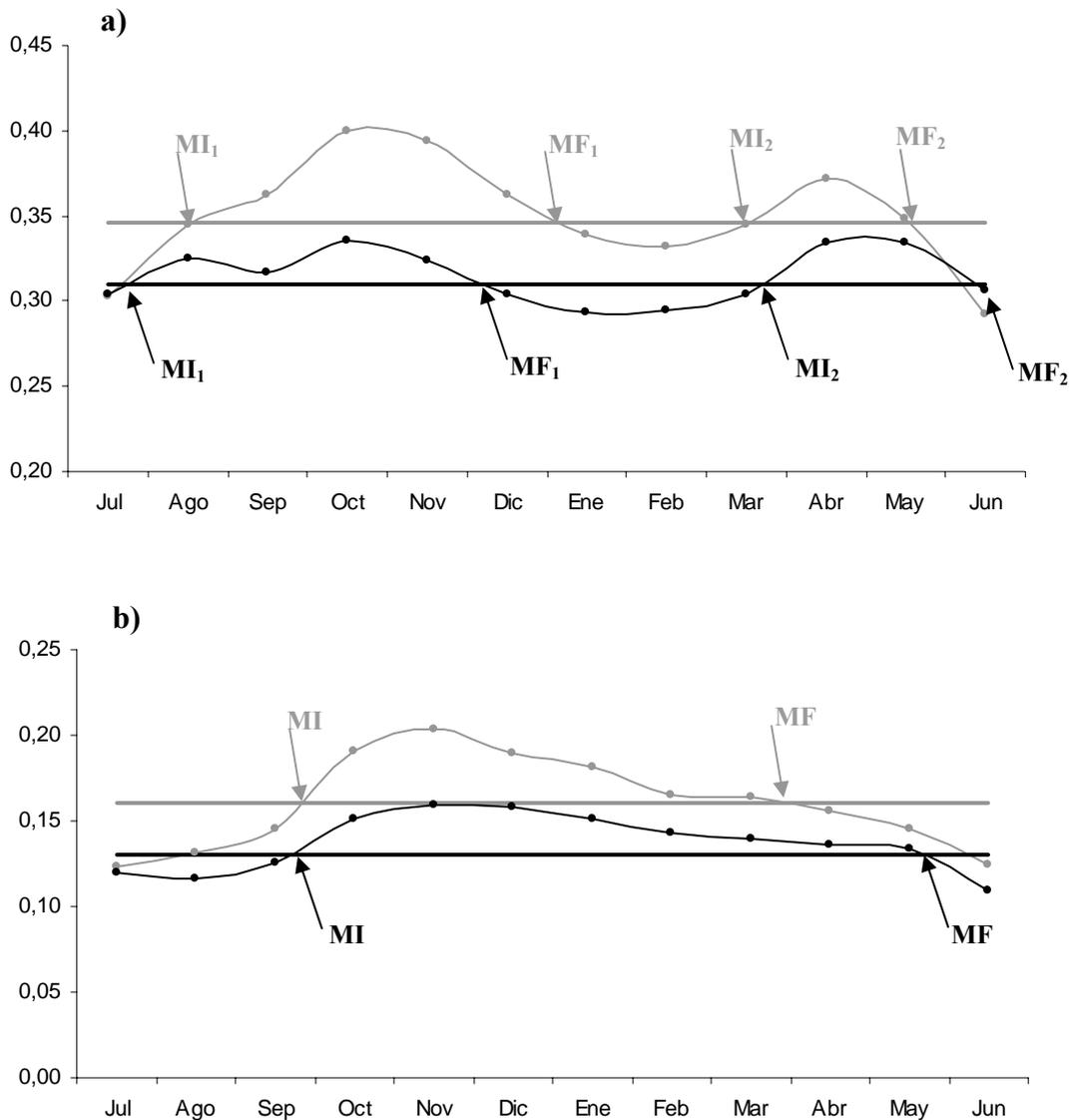


Figura 3. 8. Inicio y Finalización de la estación de crecimiento estimada de acuerdo a White *et al.* (1997) para a) NDVI y b) EVI en EMS (gris) y MMN (negro). MI= Momento de Inicio y MF= Momento de Finalización. Las líneas horizontales corresponden al umbral (calculado como $Umbral = (\text{máximo}_{\text{anual}} + \text{mínimo}_{\text{anual}})/2$).

Con NDVI la longitud del período de crecimiento de la Estepa Magallánica fue menor que en el Matorral de Mata Negra, aunque la diferencia fue escasa. La EMS mostró una mayor actividad fotosintética durante 6 meses y medio (4 meses y medio

durante la primera estación de crecimiento y 2 meses en el rebrote de otoño), mientras que la vegetación del MMN presentó mayor actividad fotosintética durante 7 meses (4 meses en el primer período y 3 meses en otoño). El crecimiento de la vegetación parece acelerarse a fines de septiembre. Un análisis similar utilizando el índice EVI refleja un período de mayor actividad fotosintética bastante más corto para la Estepa (5 meses y medio) que el MMN (casi ocho meses).

Existieron variaciones entre años en el primer período de crecimiento de NDVI. Durante las temporadas 2004-05 y 2008-09 el inicio del crecimiento ocurrió primero en la Estepa y el Matorral tuvo un crecimiento de apenas 2 meses. Esto podría deberse a que las temporadas invernales no tuvieron precipitación suficiente como para recargar el perfil del suelo con agua disponible para la vegetación de raíces más profundas (arbustos).

Con la metodología propuesta por Jobbágy *et al.*(2002) se calculó una estación de crecimiento muy prolongada para ambas áreas ecológicas y para los dos índices. No se pudo detectar con esta técnica el rebrote de otoño observado con la metodología anterior. El NDVI mostró un solo período de crecimiento en la Estepa Magallánica y un inicio muy temprano en ambos tipos de vegetación (principios de julio en MMN y fines de julio en EMS) (Figura 3.9 a). En EVI el inicio se presentó más tarde que NDVI en ambas áreas ecológicas (principios de septiembre) (Figura 3.9 b). Diez meses de crecimiento fueron detectados en EMS con NDVI y 8,5 meses con EVI, mientras que el MMN mostró aproximadamente 5 meses de crecimiento total con NDVI (observándose el rebrote de otoño) y con EVI unos 6 meses (Figura 3.9 a y b).

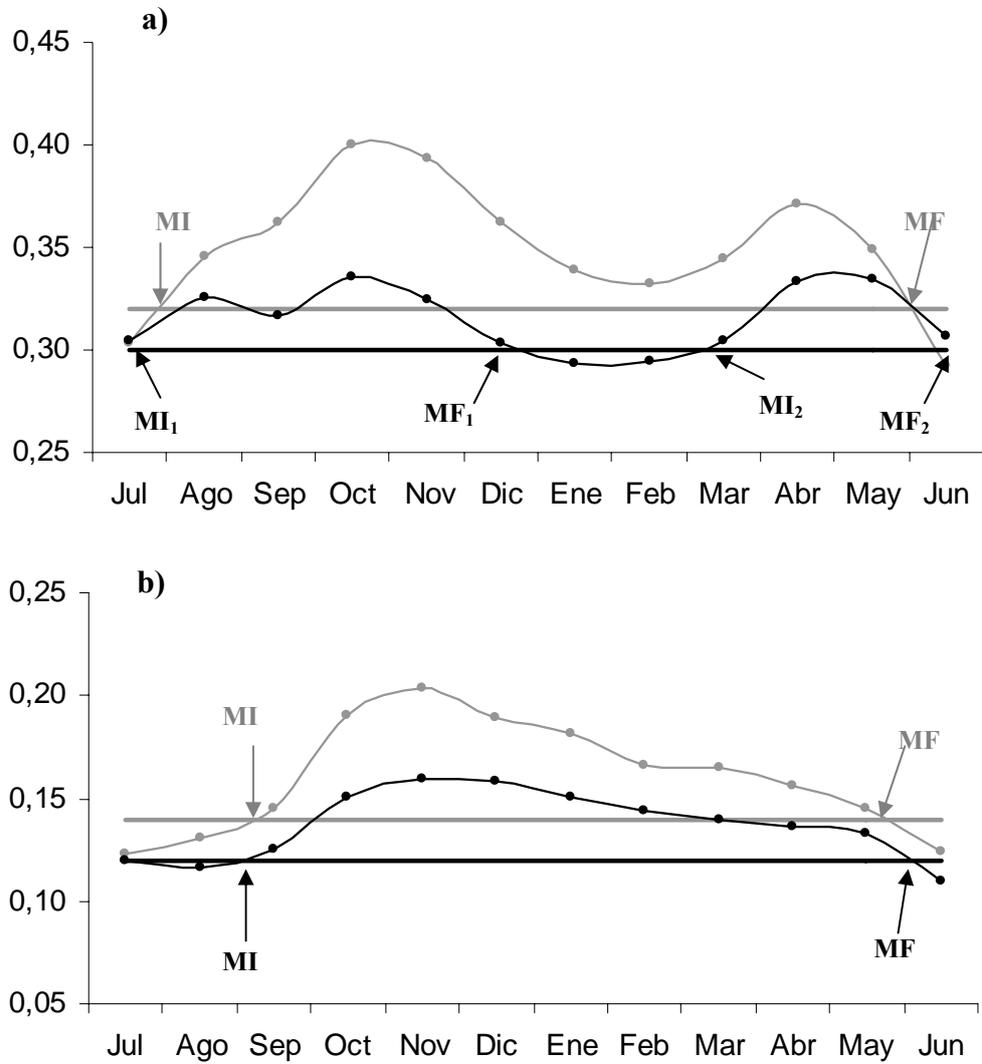


Figura 3. 9. Inicio y Finalización de la estación de crecimiento calculado de acuerdo a Jónbágy *et al.*(2002) para a) NDVI y b) EVI en EMS (gris) y MMN (negro). MI= Momento de Inicio y MF= Momento de Finalización. Las líneas horizontales corresponden a umbral= $(\text{máximo}_{\text{anual}} - \text{mínimo}_{\text{anual}}) * 0.25$.

Discusión

En el presente capítulo se realizó una descripción de los principales atributos de los distintos índices espectrales y su variación en el espacio y tiempo (intra e interanual), en las áreas ecológicas de EMS y MMN de la Patagonia Austral. Los perfiles temporales de estos índices parecen mostrar el comportamiento de la vegetación observado a campo, en especial el NDVI. Éste índice permitió también diferenciar el comportamiento de la Estepa Magallánica Seca del Matorral de Mata Negra. Las áreas presentaron patrones similares (máximos en primavera- verano, con un segundo pico en otoño, y los mínimos valores en invierno), pero la EMS presentó valores superiores durante todo el año, con diferencias que se maximizaron en la época de crecimiento.

Existen numerosos trabajos donde se estudia el funcionamiento y la dinámica de la vegetación patagónica. En la zona centro oeste de la región, se ha descrito el comportamiento de la PPNA en el tiempo y el espacio, indirectamente a través de información espectral (Fabricante, 2005; Irisarri, 2008; Paruelo *et al.*, 2004; Paruelo *et al.*, 1998c) o mediante corte directo (Bertiller *et al.*, 1990; Borrelli *et al.*, 2001b, c; Fernandez *et al.*, 1991) pero pocos fueron realizados en latitudes altas (Oliva *et al.*, 1995; Posse *et al.*, 2000) como el presentado en esta tesis.

Los dos índices de vegetación estudiados tuvieron un comportamiento diferente a lo largo del año. El NDVI mostró un perfil bimodal dentro del año en ambos tipos fisonómicos (EMS y MMN), con un máximo a fines de octubre y un segundo pico en época otoñal; mientras que EVI resultó con un solo máximo (primer quincena de noviembre). Ambos mostraron su valor mínimo en la época invernal. Este máximo (mediados- fines de primavera) y valores mínimos en invierno responden a condiciones fundamentalmente de temperatura y humedad en el suelo. Resultados similares fueron encontrados por otros autores para el mismo área (Paruelo *et al.*, 1998b) con el uso de imágenes de menor resolución espacial, y para tipos fisonómicos similares (Estepa Graminosa) con el mismo tipo de imágenes (Irisarri, 2008). Ferrante (no publicado) observó para un sitio en la EMS (Potrok Aike), una dinámica de PPNA similar, con datos recolectados a campo. Las precipitaciones estivales y una menor evapotranspiración provocada por el descenso de la temperatura hacia el final del verano podrían explicar el comportamiento de la vegetación a principios del otoño (segundo pico de NDVI). La metodología empleada por Jónbágy *et al.* (2002) parece no ser adecuada para evaluar la estación de crecimiento en estas latitudes, ya que predice una estación de crecimiento demasiado prolongada, no detecta el rebrote de otoño en la Estepa Magallánica Seca y coloca muy tempranamente al inicio de la estación de crecimiento. La escasa variabilidad de los índices dentro del año genera probablemente un umbral muy bajo. Es por esto que la metodología propuesta por White *et al.* (1997) resultaría más aplicable a estas zonas.

El momento del máximo valor en EVI y NDVI coincide con el momento de máxima acumulación de biomasa verde de intercoironal. Durante la primer quincena de Noviembre se observó la mayor acumulación de material verde del estrato intercoironal en el Campo Experimental Potrok Aike (Ferrante, no publicado). El momento de máxima productividad está relacionado positivamente con la precipitación anual y negativamente con la temperatura media anual (Jónbágy *et al.*, 2002; Paruelo *et al.*, 1998b).

La longitud estimada de la estación de crecimiento en los ambientes estudiado fue escasa. En otras estepas patagónicas con precipitaciones similares fue de 220 días

(Jobbágy *et al.*, 2002), mientras que en la estimación con NDVI fue de 210 días en el Matorral de Mata Negra y 195 en Estepa Magallánica Seca, con NDVI. Es posible que el efecto combinado de las bajas temperaturas, que a estas latitudes limitan el crecimiento durante el invierno y la sequía estival, que genera una interrupción del crecimiento por estrés hídrico, expliquen la reducción en el período activo de la vegetación.

Contrariamente a lo esperado, la temporada de crecimiento comenzó más temprano en estos ambientes que en otros de precipitaciones similares y clima más cálido. Jobbágy *et al.* (2002) encontraron que el inicio y finalización del crecimiento ocurrió a fines de septiembre y primeros días de mayo, respectivamente. La figura 3.8 muestra que el inicio ocurrió un mes antes en EMS y casi dos meses antes en MMN. Este temprano crecimiento se realiza en suelos recientemente descongelados y temperaturas medias muy bajas, y probablemente se realiza por pulsos en los días en que la temperatura supera un umbral mínimo (Ferrante, no publicado). La especie dominante del intercoironal, *Poa duseinii* es de fenología muy temprana, y comienza un vigoroso crecimiento en esta etapa. Esto es probablemente un rasgo adaptativo, ya que este es el único período del año que ofrece sistemáticamente un adecuada provisión de agua y temperaturas adecuadas en las capas superficiales (Oliva *et al.*, 2001b).

La EMS presenta un final de estación de crecimiento más tardío que MMN para ambos índices. Jobbágy *et al.* (2002) encontraron que sitios más húmedos tienen un final de estación de crecimiento más tarde que los sitios más secos, lo que podría explicar el comportamiento entre EMS y MMN. Las raíces más profundas de los arbustos de Mata Negra no parecen servir para prolongar este período de crecimiento frente al estrés hídrico estival.

El inicio de la estación de crecimiento primaveral se demoró en la Estepa Magallánica con respecto al Matorral, mientras que en el otoño se observó un patrón inverso. La vegetación gramínea tiene en general una activación más rápida del crecimiento, pero es posible que la presencia de nieve afecte la actividad fotosintética de las estepas gramíneas de porte más bajo.

La EMS presentó en general mayor variabilidad que el MMN en ambos índices. Estos resultados son similares a los encontrados en áreas con similar tipo fisiológico (Fabricante, 2005; Irisarri, 2008; Knapp *et al.*, 2001). La mayor variación en el período invernal puede deberse a condiciones ambientales que alteran los valores normales de los índices de vegetación, por ejemplo, nieve o escarcha, mientras que la alta variabilidad en verano podría explicarse por las sequías severas que se presentan algunos años.

Considerando que la fenología de la vegetación está estrechamente relacionada con la dinámica de la atmósfera más baja (Reed *et al.*, 1994), que el NDVI está relacionado con el contenido de clorofila (no relacionado directamente con el contenido hídrico de la vegetación), que el NDWI permite estudiar esta última variable (Ceccato, 2001) y que Julien y colaboradores (2006) comprobaron que el análisis temporal de NDVI y TS permite identificar cambios en la vegetación, se podría utilizar toda esta información, por ejemplo, como aproximación para determinar inicio y finalización, así como duración de la estación de crecimiento (Figura 3. 10). El inicio de la estación de crecimiento (momento del año en que el NDVI supera el umbral) se produce cuando la temperatura superficial alcanza aproximadamente 5°C y las condiciones de humedad (de la vegetación y el suelo) (NDWI) son suficientes para permitirlo. A medida que avanza el período de crecimiento de la vegetación (aumento del NDVI) favorecido por el incremento de la temperatura las condiciones de estrés comienzan a ser evidentes, por un aumento en la evapotranspiración. Al alcanzar el pico de crecimiento ha aumentado

el contenido hídrico de las plantas (más verdes), por lo que se observa también, aunque con un pequeño retraso, un incremento del NDWI. Después de una disminución en estas variables (NDVI y NDWI) durante el verano, ayudado por las precipitaciones estivales (Figura 3. 11) y temperaturas aún adecuadas, se encuentra el rebrote de otoño (aumento de NDVI y NDWI). En la Figura 3. 11 se puede apreciar más claramente estas mismas relaciones, para el Campo Experimental Potrok Aike, con datos de la estación meteorológica, considerando un período de tres años.

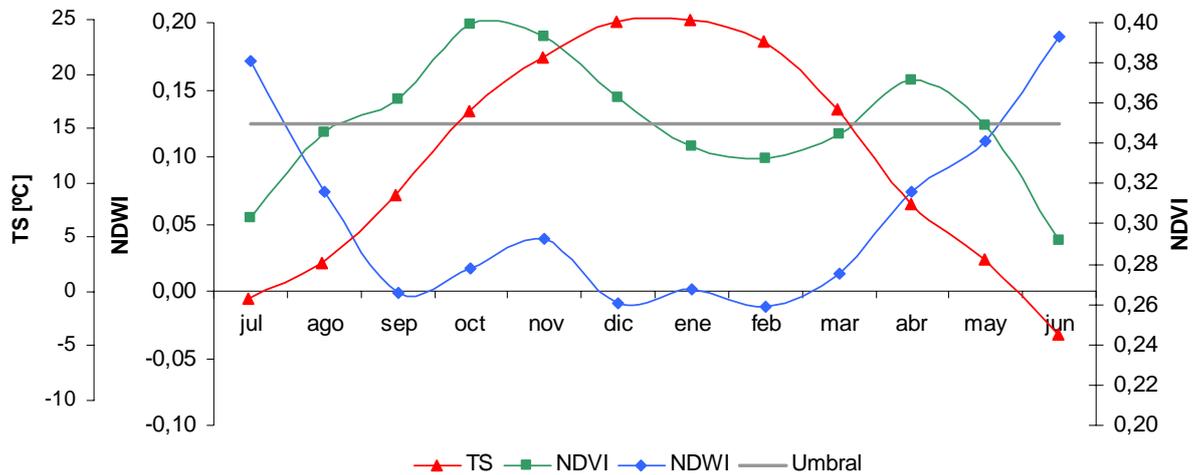


Figura 3. 10. Evolución anual de tres variables relacionadas con el comportamiento vegetal en la Estepa Magallánica Seca: Temperatura Superficial (TS), NDVI y NDWI. Valores promedio de la serie 2003-2010. La línea horizontal corresponde al umbral para establecer el crecimiento (White *et al.*, 1997).

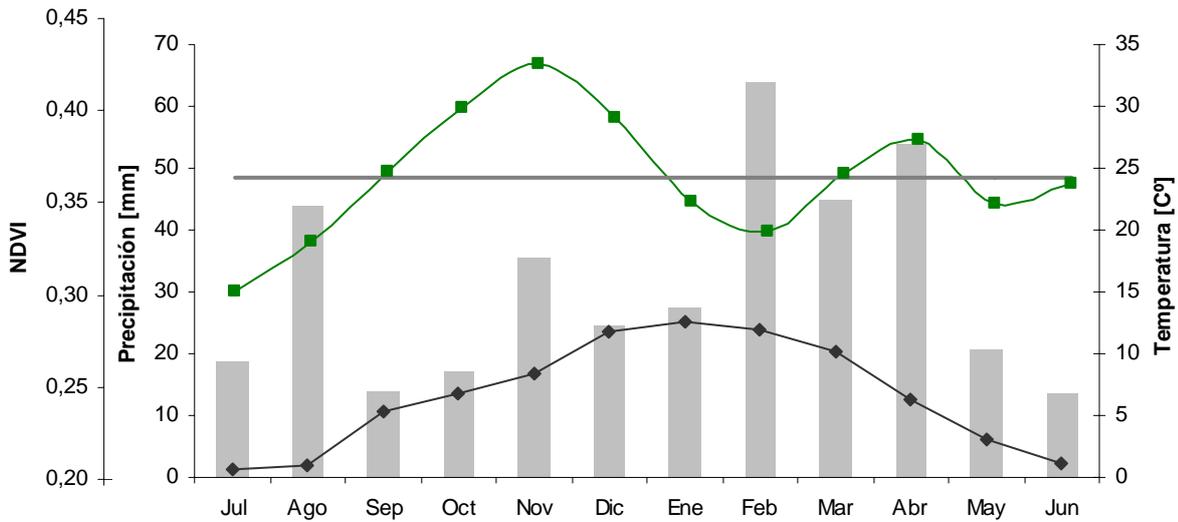


Figura 3. 11. Diagrama ombrotérmico para un campo de la Estepa Magallánica Seca (Potrok Aike) y la evolución del NDVI, mostrando los dos picos de crecimiento. Datos promedio para tres años (2007-2009), los valores de NDVI corresponden al promedio de los dos sitios muestreados dentro de este campo (Willy y Perro). Las barras corresponden a la precipitación, rombos a temperatura, cuadrados a NDVI y línea horizontal al umbral para determinar crecimiento (White *et al.*, 1997).

Los datos a campo de fenología son escasos en esta zona, por lo que es necesario realizar una aproximación a través de imágenes satelitales. Las series temporales de los índices de vegetación permiten monitorear la dinámica natural de la fenología de la vegetación. El empleo de imágenes MODIS parece adecuado para el monitoreo de pastizales como una primera aproximación al manejo sustentable de estos ambientes, a partir del uso de los índices de vegetación (principalmente NDVI), los cuales son de fácil obtención. Conocer el comportamiento fenológico a través de imágenes es de importancia ecológica y ganadera, sin embargo obtener un ajuste de datos espectrales con datos de campo (siguiente capítulo de esta tesis), como por ejemplo con cobertura vegetal y biomasa, podría aportar información aún más valiosa y aproximada a la realidad del sistema.

Capítulo 4. Relación entre los diferentes índices espectrales y la vegetación

Introducción

Como se mencionó con anterioridad, los índices de vegetación obtenidos por sensores remotos reflejan el estado de la cobertura vegetal. Estos índices pueden ser buenos estimadores de parámetros que describen el funcionamiento y estructura de la vegetación. Distintos autores han descrito relaciones entre los índices de vegetación y el Índice de Área Foliar (IAF), fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa (fPAR), cobertura vegetal, biomasa verde y Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA), entre otras (Baret *et al.*, 1991; Di Bella *et al.*, 2004b; Goward *et al.*, 1985; Justice *et al.*, 1998; Myneni *et al.*, 2002; Paruelo *et al.*, 1997a; Paruelo *et al.*, 2004; Piñeiro *et al.*, 2006). La integral en el tiempo de los índices de vegetación (promedio de la estación de crecimiento) se encuentra altamente relacionada con la PPNA (Huete *et al.*, 1999; Running *et al.*, 1988; Running *et al.*, 2000), y para algunas zonas de la provincia de Santa Cruz, diferentes trabajos registraron relaciones de estos índices con variables productivas (Oliva *et al.*, 1999; Oliva *et al.*, 1995).

De la estimación de la PPNA que realizan los índices de vegetación, se puede determinar la biomasa forrajera dependiendo del tipo fisiológico observado. La oferta en biomasa de pastos cortos y hierbas (estrato intercoironal) es de gran importancia en los sistemas ganaderos extensivos, ya que este estrato concentra la mayor parte del forraje de calidad, especialmente para los ovinos, y se monitorea para determinar la carga animal sustentable de los pastizales (Borrelli *et al.*, 2001b). El valor de esta variable en el momento de máxima acumulación de biomasa y su evolución estacional son entonces parámetros útiles para ajustar el manejo en los sistemas ganaderos. Una determinación rápida y de bajo costo de estos valores a partir de imágenes satelitales que permitan además un análisis de la evolución temporal ayudaría a tomar decisiones tanto a nivel de los productores como de los planificadores y políticos. En la Patagonia, además, una estimación de la biomasa en el momento de máxima acumulación, estará altamente relacionada con la PPNA, debido a la marcada estacionalidad de la ganancia de carbono que presenta la vegetación (Jobbágy *et al.*, 2002; Paruelo *et al.*, 1998b).

La ocurrencia de fenómenos de sequía afectan la calidad y disponibilidad forrajera para el consumo animal, y por lo que el monitoreo de esta condición también permitiría una toma de decisiones acertada en el manejo de un campo. Cuando se producen eventos de sequía, tradicionalmente monitoreado con datos de estaciones meteorológicas, el contenido hídrico de la planta disminuye, lo que resulta en una disminución del “verdor”. Un menor contenido de agua de la vegetación consecuentemente trae aparejado una menor actividad fotosintética y por lo tanto un menor vigor de la misma, influyendo incluso en la estructura de la hoja (disminución del IAF). Estas condiciones hacen que la reflectancia de la vegetación varíe en las diferentes longitudes de onda, principalmente observado como una disminución de la reflectancia en la zona del IRC y un aumento en la banda del IRM. Los índices de vegetación permiten inferir condiciones de estrés hídrico (Ji *et al.*, 2003) y su consecuente disminución en la productividad primaria. Sin embargo, existen índices espectrales que al incorporar el IRM en su cálculo permiten el monitoreo de las condiciones hídricas de la vegetación y por lo tanto de sequías, por lo que resulta ventajoso emplear imágenes satelitales ante la escasez de estaciones meteorológicas en la zona. El NDWI (Normalizad Difference water Index) (Hunt *et al.*, 1989) es uno de estos índices y resulta más sensible a la estructura de la vegetación y contenido hídrico que el NDVI (Gao, 1996).

Como se mencionó en el capítulo anterior la temperatura superficial (TS) puede contribuir a determinar momentos de estrés hídrico. Es entonces que al aumentar NDVI

se espera una disminución la temperatura superficial y viceversa, por lo tanto el cociente entre estas variables ($\text{Ratio}=\text{NDVI}/\text{TS}$) ha sido propuesto como buen estimador del contenido de humedad de la vegetación (Chuvieco *et al.*, 2004a), aumentando bajo condiciones de estrés hídrico.

En el Capítulo 2 de esta tesis se presentó una descripción de la vegetación de las áreas ecológicas Estepa Magallánica Seca y Matorral de Mata Negra con datos estructurales y funcionales de la vegetación medidos a campo y en el Capítulo 3 se mostró que los índices espectrales permiten observar el comportamiento de la vegetación. En el presente capítulo el objetivo principal es correlacionar estas dos fuentes: las reflectancias en las bandas del rojo, azul, IRC e IRM, los índices de vegetación (incluyendo NDWI), la integral de NDVI (I-NDVI) y EVI (I-EVI), el cociente NDVI/TS con cobertura y biomasa vegetal de diferentes estratos y condición fenológica (verde- seco) de Estepa Magallánica Seca y Matorral de Mata Negra.

Materiales y métodos

Se calculó para este capítulo el cociente NDVI/TS para cada píxel dentro de los sitios de muestreos (áreas de 3x3 píxeles).

Para analizar las correlaciones existentes entre las variables de la vegetación con los índices espectrales se construyeron dos matrices:

- matriz con datos de cobertura: de 20 columnas, que incluyeron suelo desnudo, mantillo y cobertura vegetal total y por forma de vida (intercoironal, coironal, subarbustivo y arbustivo), además de los índices y bandas espectrales; y 39 filas, correspondientes a las fechas de muestreo por sitio.

- matriz con datos de biomasa: de 35 columnas, con la inclusión de los índices de vegetación y bandas satelitales, biomasa total y por estrato de vegetación (intercoironal, coironal, subarbustivo y arbustivo), con sus respectivas fracciones de verde y seco y la combinación de algunas de ellas; y 37 filas, donde se consideraron las fechas de muestreo por sitio.

El muestreo de campo se realizó en diferentes fechas, por lo que para las correlaciones se decidió asignar los valores espectrales (índices y bandas) de las imágenes que contengan la fecha de muestreo a campo dentro de los 16 días de toma que poseen las MODIS. De esta forma, si el muestreo se realizó el día 05 de enero del 2010 le correspondió la imagen con inicio de toma el 1 de enero y finalización el 16 de enero de dicho año. Adicionalmente se evaluó la relación de los datos de campo con las imágenes de la quincena siguiente. Se consideraron en estas matrices los dos años de muestreo en conjunto.

Se realizó un análisis de correlación, previa comprobación de los supuestos de normalidad (test de Shapiro Wilks) y homogeneidad de varianzas (test de Levene), con un nivel de significancia del 0,05. Las correlaciones que se probaron fueron las siguientes:

- Los sitios de ambas áreas ecológicas en conjunto
- Separando las áreas ecológicas
- Agrupando los sitios en función de las clasificaciones obtenidas en el capítulo dos.

Cuando se analizó EMS y MMN de manera conjunta, fue necesario normalizar con la función Logaritmo natural (Ln) los datos de biomasa (fracción verde, seca y total) del estrato intercoironal y subarbustivo, y la biomasa seca y total del coironal, mientras que para la cobertura de coirones se empleó la función arcoseno ($\arcsen((x/100)^{1/2})$). La biomasa total no pudo ser normalizada. Cuando sólo se analizó EMS se normalizó con la función Ln la biomasa de subarbustos (verde, seca y total) y la fracción seca de coirones. Mientras que en el MMN la biomasa de intercoironal (fracción verde, seca y total), subarbustos (fracción seca y total) se normalizaron de igual forma que EMS. Dentro de la EMS, el sitio Markatch Aike (2) fue excluido del análisis ya que mostró valores anómalos para los índices espectrales. Presenta una biomasa verde intermedia (371 KgMS/ha) y es el de mayor cobertura vegetal (72%) (51% corresponde al estrato intercoironal), pero está ubicado sobre una colada basáltica que puede interferir la señal captada por el satélite.

Con las variables que correlacionaron significativamente, se realizaron regresiones lineales, considerando a las variables de vegetación como dependientes y las espectrales como independientes. Un análisis de correlación se realizó con los datos

promedios mensuales por tipo de vegetación de las variables espectrales (índices y bandas) para determinar el grado de relación existente entre ellas.

Resultados

Cuando se analizaron ambas áreas en conjunto se encontraron correlaciones significativas ($p < 0,05$) entre las variables medidas en la vegetación y los índices bajo estudio (Tabla 4.1 y Tabla 5-ANEXO). Se obtuvo una correlación positiva y significativa entre cobertura del estrato coironal e intercoironal con NDVI ($r=0,62$ y $0,49$, respectivamente) y con EVI ($r= 0,68$ y $0,52$ respectivamente), y negativa con cobertura de subarbustos ($r=-0,4$ para ambos índices). Con respecto a la biomasa, se observó una correlación importante entre la biomasa de coirones (fracción seca y total) similar entre ambos IV's (r entre $0,5$ y $0,6$). Sin embargo NDVI fue el índice que presentó una relación significativa con la porción verde del estrato subarbusivo ($r=0,35$) (Tabla 4.1). NDWI presentó un coeficiente de correlación de Pearson de $0,6$ con la biomasa verde de subarbustos. No se encontraron otras relaciones de importancia con las otras variables estudiadas (Tabla 5-ANEXO), excepto la banda del rojo e IRM, de forma negativa con la biomasa del intercoironal verde. Las Integrales de NDVI y EVI no parecieron mostrar una relación más importante (Tabla 5-ANEXO).

Al analizar los sitios de cada área ecológica por separado se encontraron correlaciones significativas ($p < 0,05$), entre la información espectral y las variables vegetales, una tendencia que resultó más marcada en el ambiente de EMS que en MMN (Tabla 4.1 y Tabla 6 y 7 del ANEXO). En Estepa Magallánica Seca se observó que ambos índices mostraron relación con cobertura de coirones de forma positiva y con suelo desnudo de manera negativa. Mientras que NDVI también se relacionó con cobertura vegetal ($r=0,51$). Con biomasa total correlacionaron los dos índices, pero fue más importante la relación con NDVI. Además éste índice correlacionó de manera significativa con biomasa de coirones (verde, seca y total) y las fracción verde del estrato intercoironal (Tabla 4.1). La integral de los índices correlacionó con la biomasa de los subarbustos. NDWI resultó relacionarse de forma negativa con la biomasa (verde, seca y total). En el Matorral de Mata Negra sólo se observó una correlación positiva entre NDVI y cobertura de subarbustos ($r=0,66$), similares valores de correlación se obtuvieron con los índices de comportamiento similar a NDVI (Tabla 7-ANEXO).

Tabla 4.1. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de vegetación e información espectral (bandas e índices calculados) considerando ambos ambientes en conjunto (EMS y MMN) y analizando solo EMS.

| Atributo | | EMS y MMN | | EMS | | |
|-----------|---|-------------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| | | NDVI | EVI | NDVI | EVI | |
| cobertura | Vegetal | 0,25 | 0,16 | 0,507(*) | 0,39 | |
| | Mantillo | 0,10 | 0,19 | -0,02 | 0,05 | |
| | Suelo desnudo | -0,428(**) | -0,406(*) | -0,549(**) | -0,510(*) | |
| | Intercoironal | 0,488(**) | 0,522(**) | -0,04 | -0,08 | |
| | Coironal | 0,618(**) | 0,684(**) | 0,505(*) | 0,485(*) | |
| | Subarbustivo | NN | NN | 0,17 | 0,12 | |
| Biomasa | Intercoironal | Verde | 0,26 | -0,05 | 0,433(*) | 0,12 |
| | | Seco | 0,07 | -0,08 | 0,00 | -0,21 |
| | | Total | 0,16 | -0,08 | 0,19 | -0,09 |
| | Coironal | Verde | nn | nn | 0,475(*) | 0,32 |
| | | Seco | 0,526(**) | 0,596(**) | 0,440(*) | 0,32 |
| | | Total | 0,549(**) | 0,613(**) | 0,496(*) | 0,35 |
| | Subarbustivo | Verde | 0,350(*) | 0,33 | 0,26 | 0,25 |
| | | Seco | 0,26 | 0,26 | 0,25 | 0,29 |
| | | Total | 0,30 | 0,29 | 0,26 | 0,29 |
| | Biomasa total (suma de todas las formas de vida) | Verde | nn | nn | 0,686(**) | 0,481(*) |
| | | Seco | nn | nn | 0,721(**) | 0,507(*) |
| | | Total | nn | nn | 0,732(**) | 0,514(*) |

(*) Indica correlación significativa con un nivel de 0,05 y (**) de 0,01. nn= variables que no cumplieron con e supuesto de normalidad.

En la Figura 4.1 se presentan los modelos de regresión lineal simple obtenidos entre las variables de vegetación y NDVI cuando se analizó en conjunto los sitios de Estepa Magallánica Seca y Matorral de Mata Negra. Estos modelos sólo explicaron entre el 12 y 38% de los cambios observados en las variables medidas en la vegetación. NDVI resultó explicar principalmente los cambios observados en la cobertura de coirones (38%) la biomasa del mismo estrato (30%) (Figura 4.1 c y a, respectivamente).

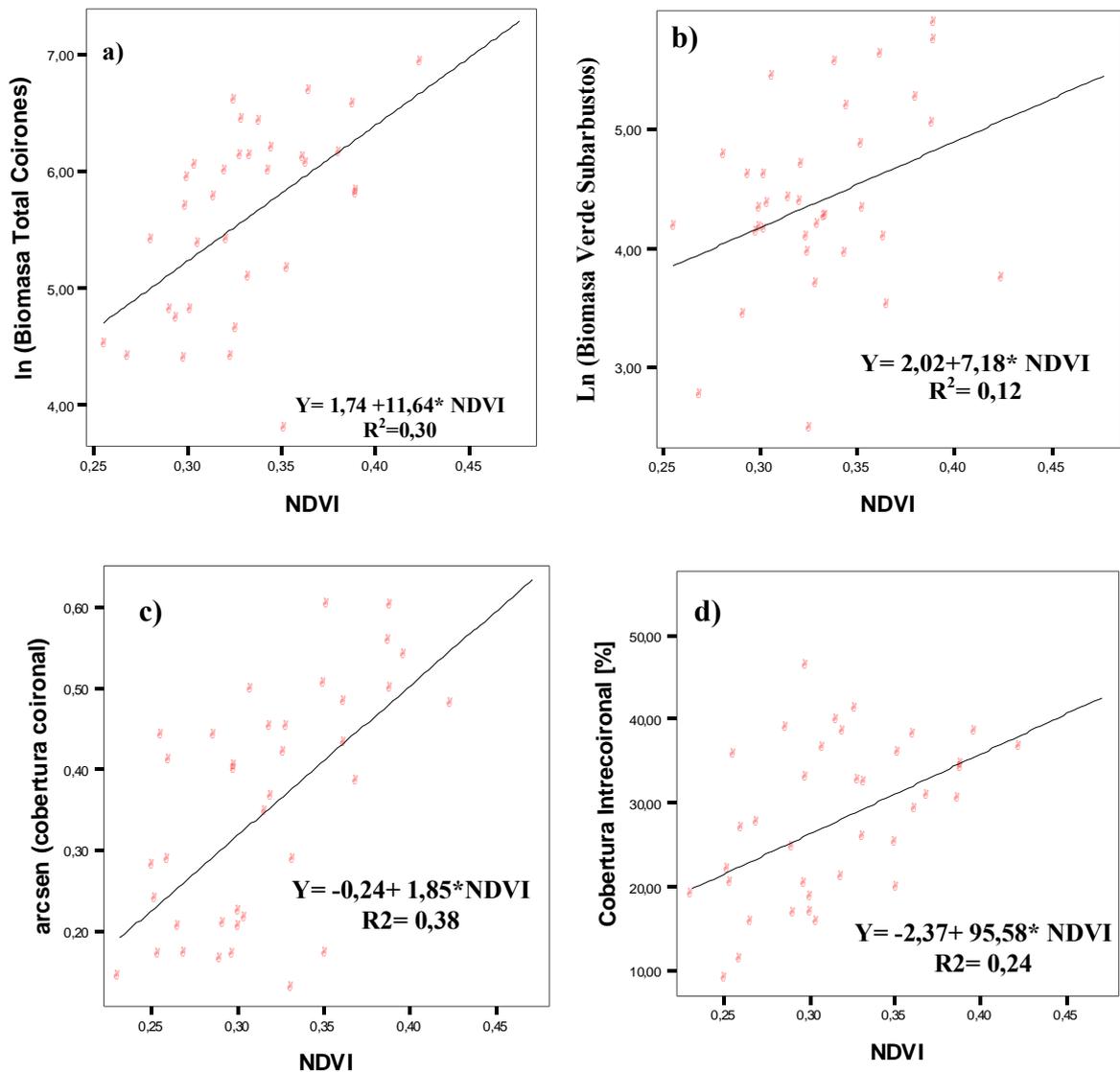


Figura 4.1. Regresiones lineales simples al analizar EMS y MMN en conjunto.

Al analizar las áreas ecológicas de manera individual los modelos resultaron con mayor capacidad de explicación que cuando se estudiaron ambas áreas en conjunto. En Estepa Magallánica Seca el NDVI logró explicar el 52% de la variabilidad observada en la biomasa total (Figura 4.2 a). Mientras que solo logró explicar el 19% de los cambios en biomasa verde de pastos cortos y hierbas (Figura 4.2 c) y un porcentaje un poco más alto (25%) para la biomasa total de coirones (Figura 4.2 b). Sólo un 26% de la cobertura vegetal resultó ser explicada por el NDVI (Figura 4.2 d), y el mismo porcentaje para la cobertura de los pastos altos (Figura 4.2 e). Sin embargo en Matorral de Mata Negra la única regresión encontrada fue entre NDVI y la cobertura de los subarbustos ($R^2 = 0,43$) (Figura 4.2 f).

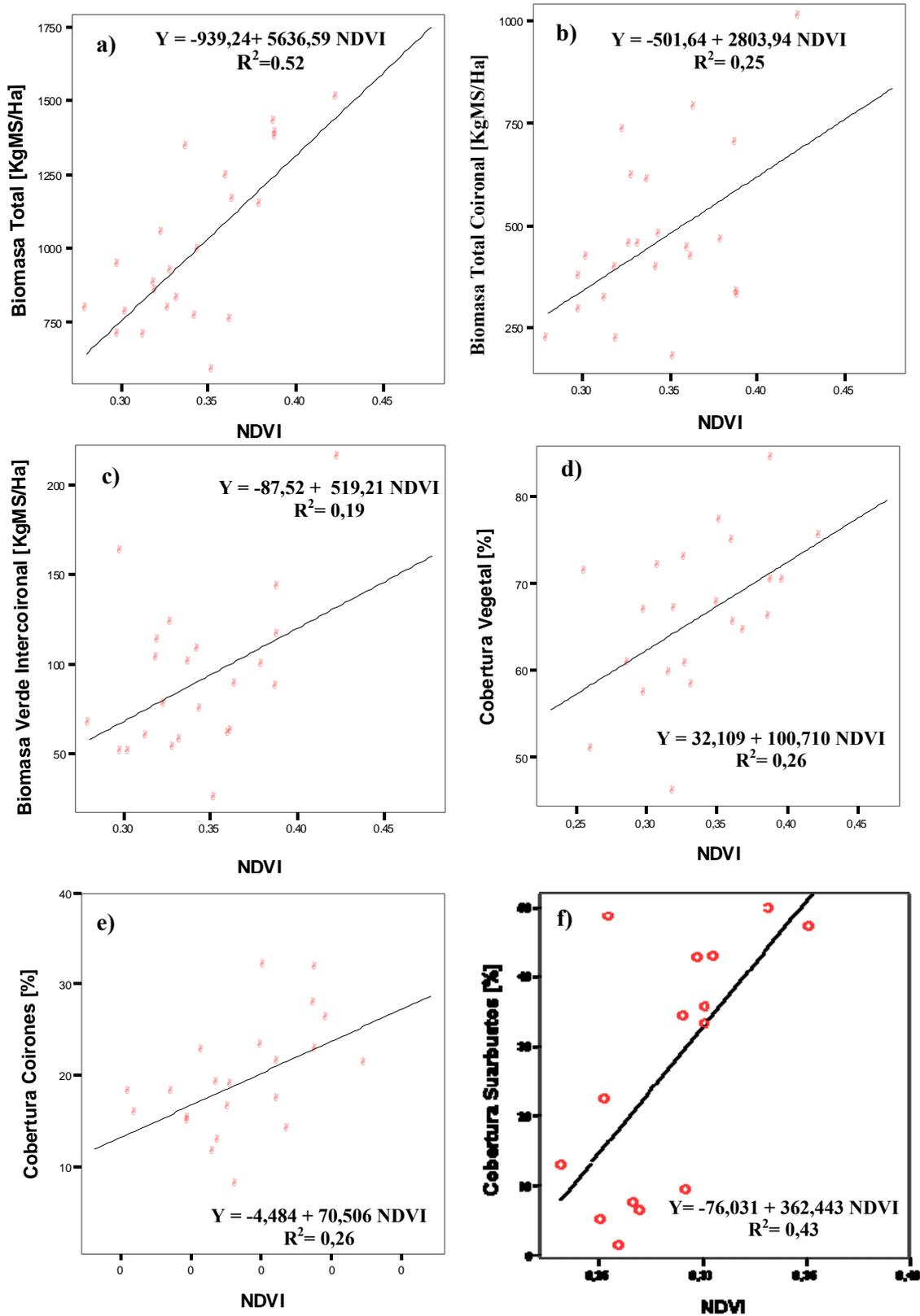


Figura 4.2. Regresiones lineales simples entre NDVI y biomasa y cobertura vegetal en a, b, c, d y e) EMS y f) MMN

El agrupamiento de los sitios en función de la clasificación obtenida en el capítulo 2, no mostraron mejores resultados que cuando se analizó cada área ecológica por separado. Esto posiblemente se debió a que el número de sitios y fechas por clase no fue suficiente.

El cociente NDVI/TS correlacionó con algunas de las variables medidas en la vegetación. Cuando se analizó en conjunto las dos áreas ecológicas, este cociente resultó correlacionado con la biomasa verde del estrato intercoironal (Ln) ($r= 0.34$). En Estepa Magallánica Seca correlacionó significativamente y de manera positiva tanto con biomasa verde de coirones ($r= 0,43$) como con la biomasa total ($r= 0,51$). Sin embargo en Matorral de Mata Negra no se encontró relación con los atributos de la vegetación.

Discusión

Los resultados presentados en este capítulo demuestran que el uso de los índices de vegetación, y principalmente el NDVI, puede ser una potencial herramienta para el monitoreo de la vegetación en el sur de la Patagonia. La relación entre los índices espectrales y la cobertura y biomasa vegetal resultó, sin embargo, sensible a la escala de trabajo. A escala regional (análisis de los sitios de Estepa Magallánica Seca y Matorral de Mata Negra en conjunto) se encontraron pocas relaciones significativas entre los índices espectrales y los atributos vegetales, y los coeficientes de regresión resultaron muy bajos. En el análisis regional el 24% de la variabilidad observada en la cobertura de pastos cortos y hierbas y el 38% en la cobertura de los pastos altos quedó explicada por el NDVI. Sin embargo la cobertura vegetal total no correlacionó con ningún índice. En este caso no se logró normalizar la biomasa total, por lo que no se pudo realizar correlaciones. Posiblemente el estudio conjunto de dos estructuras diferentes de vegetación, en cuanto a cobertura, biomasa, formas de vida, presencia de suelo desnudo, genere “ruido” en el análisis. Gamon y colaboradores (1995) no encontraron correlaciones significativas en zonas áridas y semiáridas de Estados Unidos, entre NDVI y la biomasa total, atribuyendo esta falta de relación a la amplia variación en el contenido de biomasa muerta en pie.

Cuando el análisis de correlación se realizó para cada área de manera independiente, los resultados fueron significativamente distintos. En la EMS se obtuvieron regresiones significativas con Biomasa total (y sus fracciones verde y seca), cobertura de coirones y total y biomasa de intercoironal verde, mientras que en el Matorral de Mata Negra solo se relacionó con cobertura de subarbustos.

En la Estepa Magallánica Seca la variación en la cobertura vegetal total estuvo explicada en parte (26%) por el NDVI. Un coeficiente mayor ($R^2=0,50$) se encontró en ambientes con coberturas totales del 40 al 70% en el Noroeste de China, con imágenes MODIS (Guo *et al.*, 2007). Este índice también explicó parte de la variación de la biomasa total (52%) y de la biomasa verde del estrato intercoironal (19%). Gamon *et al.* (1995) encontraron relación entre NDVI y biomasa verde en una amplia variedad de estructuras de vegetación. Paruelo y colaboradores (2004) para estepas patagónicas lograron ajustar un modelo lineal ($R^2= 0.84$) que relaciona la PPNA (biomasa cosechada en el pico de producción) y el NDVI, estimado a partir de una imagen Landsat del año 1997, mientras que en pastizales de Estados Unidos, con precipitaciones de 280 a 1150 mm, relacionaron el NDVI (Integral del NDVI) con PPNA (Paruelo *et al.*, 1997a). En la Figura 4.3 se muestra la aplicación de la regresión, encontrada en esta tesis, para el cálculo de biomasa total en la Estepa Magallánica Seca (Biomasa total = $-939,24 + 5636,59 \text{ NDVI}$. $R^2= 0,52$).

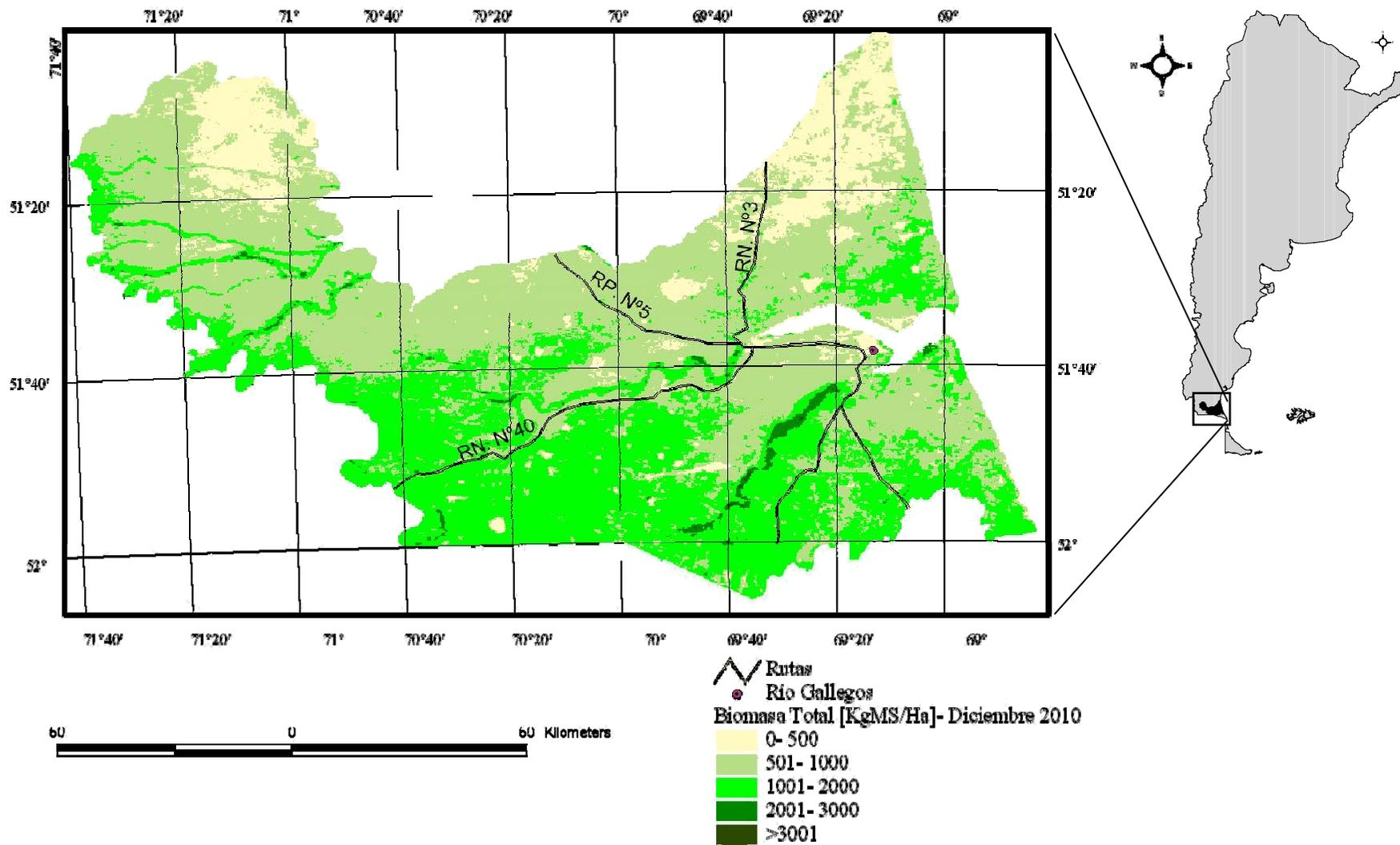


Figura 4. 3. Estimación para el mes de diciembre del 2010 de la Biomasa Total [KgMS/Ha] en la Estepa Magallánica Seca. Modelo aplicado: $Biomasa\ total = -939,24 + 5636,59\ NDVI$. $R^2 = 0,52$.

Las hierbas y pastos cortos por su calidad forrajera (alto contenido protéico) (Somlo, 1997) representan el estrato vegetal de mayor importancia ganadera en la zona (Borrelli, 2001). En esta tesis se obtuvieron regresiones significativas entre NDVI y biomasa verde del estrato intercoironal en Estepa Magallánica Seca, pero con bajo poder explicativo ($R^2=0,19$). En otros estudios, Oliva y otros (1995) para la zona de Meseta Central relacionaron NDVI y biomasa total del intercoironal (con cortes de biomasa en tres años 1990 a 1993) con coeficiente de regresión alto (R^2 varió entre 0,5 y 0,7) con una imagen del año 1986. La aplicación directa de los índices a partir de sensores remotos para el cálculo de biomasa total de intercoironal, que es la base del Método Santa Cruz, es por lo tanto, limitada. Sin embargo, la regresión podría ser utilizada como una primera aproximación en las evaluaciones de pastizales, para una comparación relativa de la estimación de la biomasa forrajera entre potreros de un mismo campo, complementando los muestreos a campo, disminuyendo de esta manera la cantidad de muestras a tomar y por lo tanto reduciendo costos. En la Figura 4.4 se presenta la estimación de biomasa verde de intercoironal con la regresión encontrada en este capítulo.

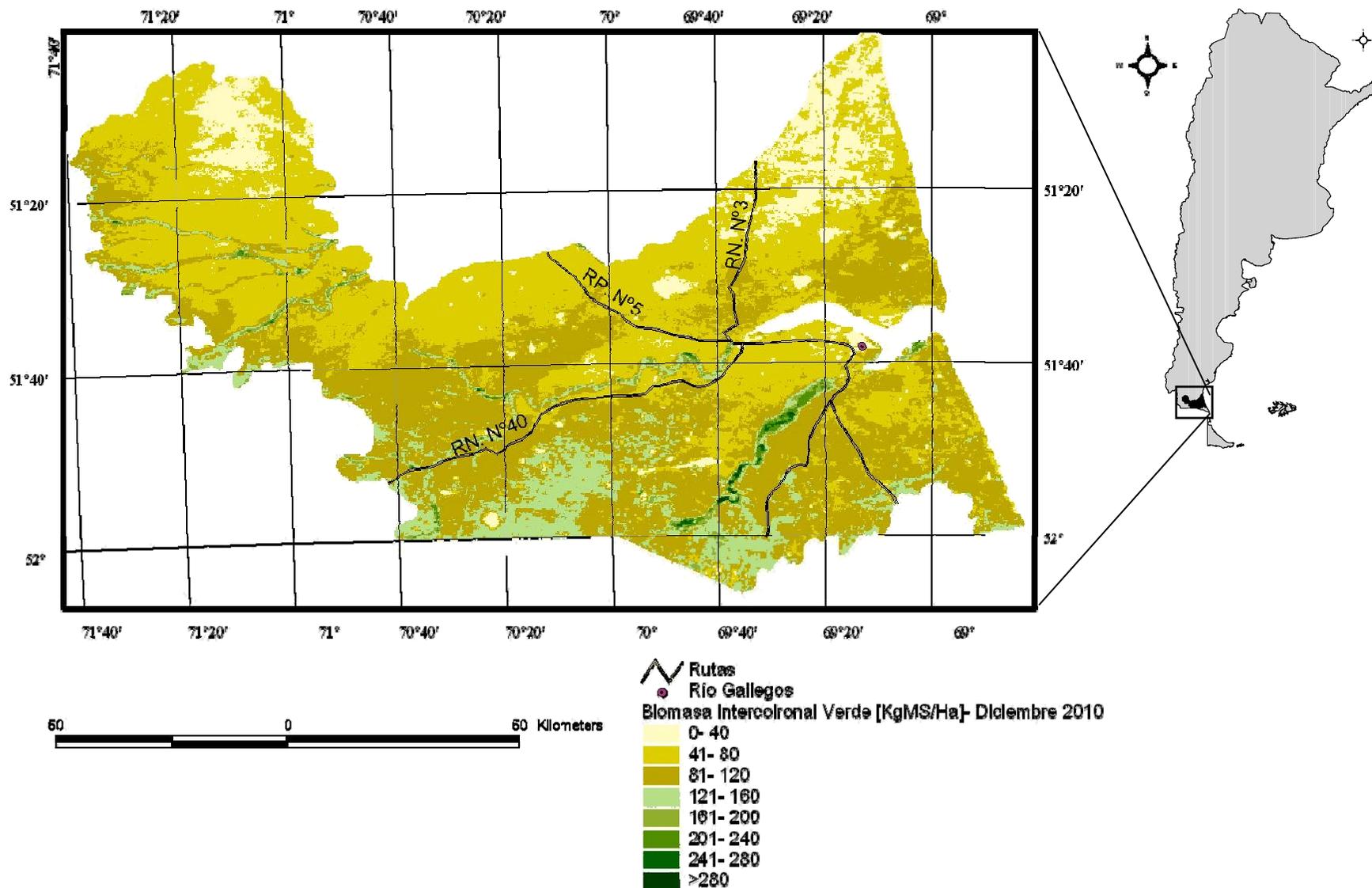


Figura 4. 4. Estimación para el mes de diciembre del 2010 de la Biomasa del estrato Intercoironal Verde [KgMS/Ha] en la Estepa Magallánica Seca. Modelo aplicado: Biomasa Intercoironal Verde = $-97,52 + 519,21 \text{ NDVI}$. $R^2 = 0,19$.

Existen diferentes métodos en la Patagonia para el cálculo de receptividad ganadera (Golluscio, 2009). Entre éstos se encuentran a) el Método Santa Cruz, en el cual se estima la receptividad a partir de cortes de biomasa forrajera (intercoironal) y b) el Método de PPNA, de la Facultad de Agronomía de la UBA- Cátedras de Ecología y Forrajes, aplicado en el noroeste de la provincia del Chubut, donde a partir de la estimación de la PPNA y aplicando un factor de uso, se obtiene el número de animales aceptados en el ambiente sin deteriorar el recurso. En el Método de la PPNA existen tres formas diferentes para estimar la PPNA uno de los cuales emplean la calibración NDVI- PPNA presentada por Paruelo y colaboradores (2004) con una imagen del año 1997, por lo que solo sería aplicable a ese año (Golluscio, 2009). En esta tesis, en la Estepa Magallánica Seca se encontraron regresiones significativas entre el NDVI y las variables utilizadas para estimar receptividad en el Método Santa Cruz (Biomasa del intercoironal ($R^2= 0,19$)) y en el Método de la PPNA (biomasa total ($R^2= 0,52$)), utilizando cortes de biomasa en distintos momentos en diferentes años. Por lo que se podría utilizar el modelo con mayor poder explicativo, y aplicar un factor de uso del recurso forrajero para realizar estimaciones más precisas de la receptividad ganadera de los campos de la zona.

El mapa de biomasa total puede ser utilizado, como se mencionó en el párrafo anterior, para la estimación de receptividad ovina (carga sustentable), mediante el cálculo del Forraje Disponible (FD) y un consumo individual estimado para los ovinos. Para el cálculo del FD a partir de la biomasa total, se debe utilizar un Índice de Cosecha (IC), que representa la proporción de la productividad total que se puede consumir sin afectar el pastizal. Un índice de cosecha del 30% de la Producción Primaria Neta (cuyo estimador es la biomasa en diciembre, el pico de crecimiento) ha sido considerado adecuado (Abdalla, 1980; Beale *et al.*, 1986; Holechek, 1991; Hutchings *et al.*, 1953; Winder *et al.*, 2000). Para el cálculo del FD se debe convertir la biomasa verde de intercoironal en biomasa total de intercoironal. Otros estudios de la Estepa Magallánica han estimado el porcentaje de verde en relación al total (verde+senescente+muerto) varía entre el 20 y el 40%, con un valor de 38% en diciembre (Ferrante, no publicado). El consumo individual del animal, que se puede estimar en $MS= 513 \text{ Kg MS/Equivalente Ovino}$ (Borrelli, 2001). Se presenta como ejemplo la receptividad estimada en EOP¹ utilizando como base el mapa de Biomasa total (Figura 4. 5) y el mapa de Biomasa Verde del estrato Intercoironal (Figura 4. 6) para el mes de diciembre, también mostrados en esta sección. El cálculo de Receptividad (R) realizado de $R=\text{Forraje disponible/Consumo Individual Anual}$ estimado por las dos metodologías es similar y puede orientar la elaboración de mapas de receptividad para aplicaciones regionales, como los mapas de receptividad estimada de la Ley Ovina.

¹ 1 Equivalente Ovino Patagónico (EOP) equivale al promedio de requerimientos anuales de una oveja de 49 kg de peso vivo al servicio, esquilada en septiembre, que gesta y desteta un cordero de 20 kg vivo a los 100 días de lactancia. Esto corresponde a 2,79 MCal de energía metabolizable por día.

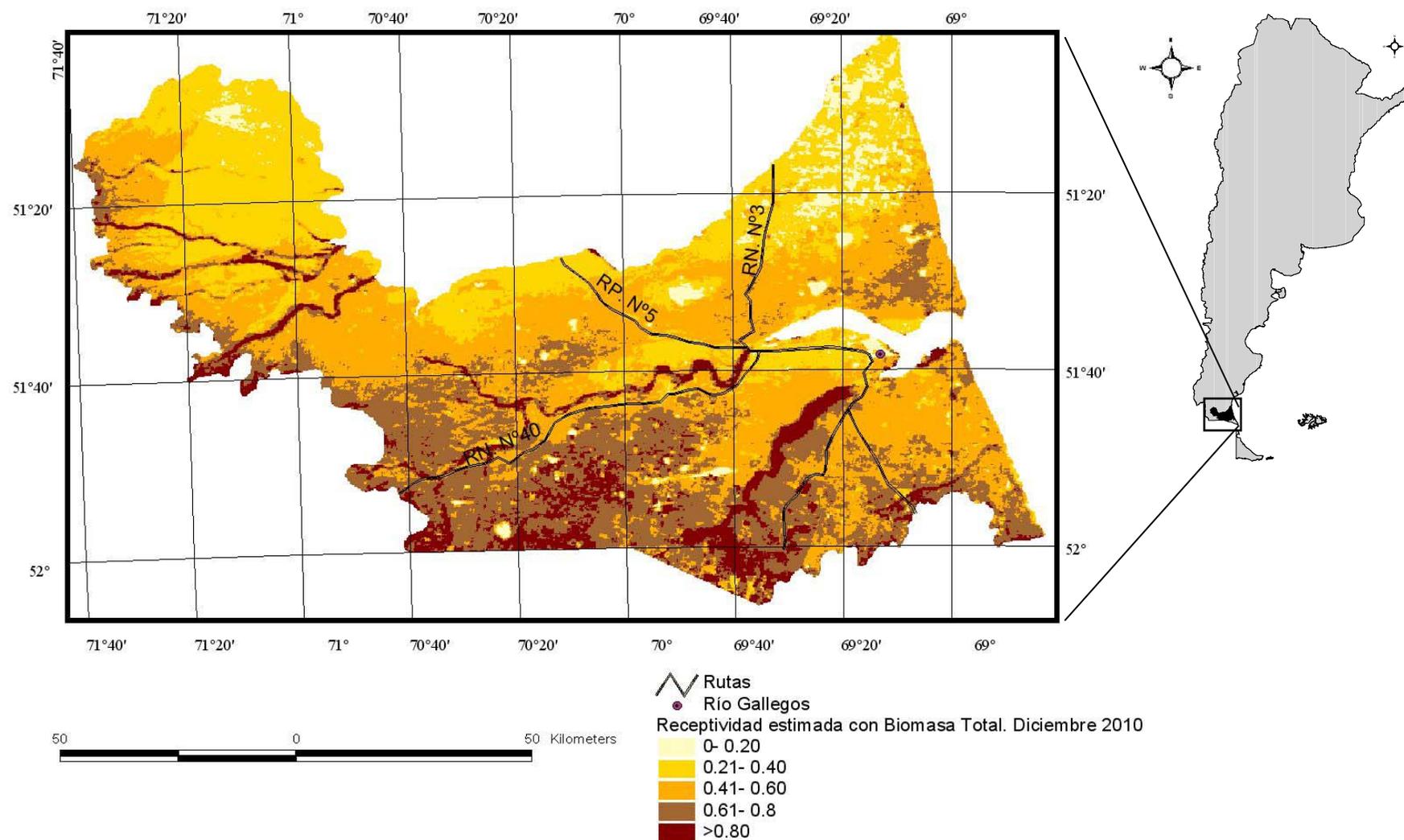


Figura 4. 5. Receptividad estimada (en EOP) para el mes de diciembre del 2010, en la Estepa Magallánica Seca, utilizando como base el mapa de biomasa total para el mismo mes.

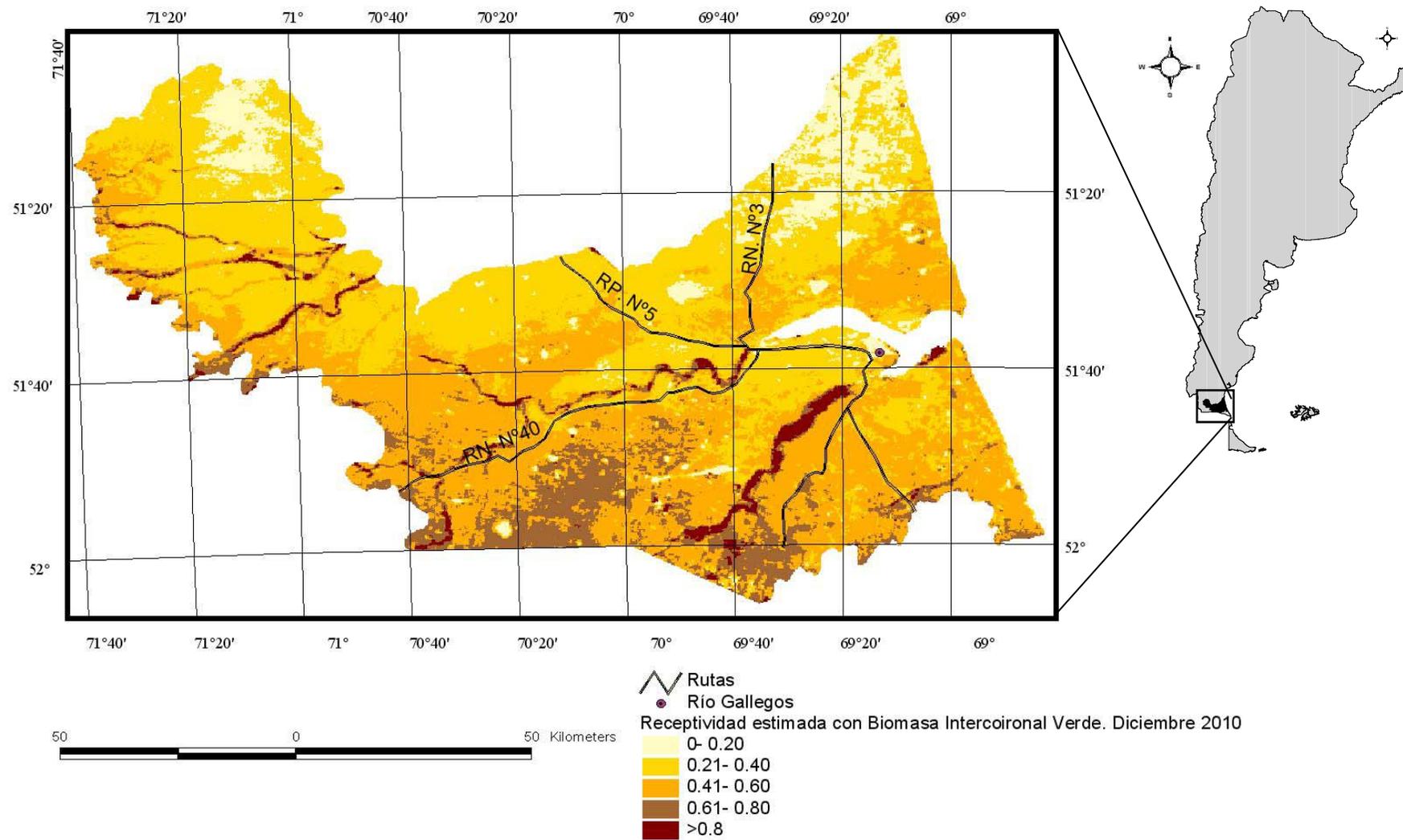


Figura 4. 6. Receptividad estimada (en EOP) para el mes de diciembre del 2010, en la Estepa Magallánica Seca, utilizando como base el mapa de biomasa verde del estrato intercoironal para el mismo mes.

En el Matorral de Mata Negra no se encontraron relaciones significativas entre las características de la vegetación y los índices de vegetación, excepto con cobertura de subarbustos ($R^2= 0,43$). La fracción no explicada de los modelos encontrados en esta tesis, tanto para Estepa Magallánica Seca como para Matorral de Mata Negra, se puede deber a múltiples factores, entre los cuales se puede mencionar:

- Variaciones en la eficiencia del uso de la luz o el background del suelo (Huete, 1989; Paruelo *et al.*, 2004)
- Afectación de la señal recibida por el satélite por la presencia de material muerto en pie (Di Bella *et al.*, 2004a; Gamon *et al.*, 1995)
- En Matorral de Mata Negra podría deberse además a una divergencia en el patrón estacional del canopeo “siempreverde” y la actividad fotosintética (Gamon *et al.*, 1995) y al efecto de la arquitectura del canopeo (Sellers, 1985)
- el efecto que puede tener la nieve sobre la reflectancia del canopeo
- El alto porcentaje de nubosidad que se presenta en la zona durante gran parte del año puede alterar los valores de los índices. Aquellas zonas que durante los 16 días de obtención de la imagen estuvieron cubiertas de nubes, presentarán valores anómalos de NDVI, y por lo tanto estimaciones erróneas de las variables vegetales.

Algunos de los trabajos analizados en esta tesis, realizan un solo corte suponiendo que el pico de crecimiento representa la PPNA. Realizar este tipo de estimaciones puede resultar en valores erróneos, generalmente subestimando el valor real de la productividad (Sala *et al.*, 2000). En esta tesis se realizaron cortes de biomasa en 3 momentos diferentes (en tres estaciones de crecimiento distintas), y se relacionó con la imagen más cercana a la fecha de corte, por lo que los modelos estacionales generados aquí permiten un rango de acción temporal más grande.

Los índices relacionados al contenido de agua, no presentaron mejores correlaciones que los índices de vegetación. A pesar de esto la evolución anual de NDWI y NDVI/Temperatura Superficial (TS) parece mostrar el comportamiento del contenido hídrico de la vegetación y del suelo. Para ambas áreas ecológicas los valores más altos de NDWI se observan en los meses de otoño- invierno y en el mes de máxima producción (noviembre), mientras que los valores más bajos en verano, indicando condiciones de estrés. El cociente NDVI/TS presenta un comportamiento similar con los valores más bajos en el verano (enero y febrero), debido a que el NDVI es más bajo en este período y las temperaturas superficiales más elevadas, y los valores más altos en octubre y abril en Estepa Magallánica Seca y en Agosto, octubre y mayo en Matorral de Mata Negra. Gu y otros (2007) encontraron que el NDWI responde más rápido que NDVI a condiciones de sequía y la relación NDVI/Temperatura Superficial también está relacionada al estrés hídrico que sufre la vegetación (Chuvieco *et al.*, 2004b), por lo que la posible aplicación de estos índices para esta zona podría ser detección de estrés hídrico (sequías).

Se esperaba que los índices que no son tan sensibles a la presencia de suelo desnudo o al tipo de suelo, produzcan mejores correlaciones. Aunque NDVI y RVI son sensibles a condiciones las características ópticas del suelo, en este trabajo se encontraron relaciones significativas con las variables medidas a campo. Sin embargo, con los índices de la familia SAVI no se obtuvieron los resultados esperados, dado que el nivel de relación con cobertura y biomasa no fueron superiores a los encontrados con NDVI. Tanto SAVI como OSAVI involucran en sus cálculos coeficientes de ajuste al

suelo, que, de acuerdo a bibliografía, toman valores de $I=0,5$ e $Y=0,16$ para coberturas vegetales intermedias. Estos coeficientes deberían ser ajustados a cada ambiente en particular considerando algunas variables como por ejemplo Índice de Área Foliar. EVI a demostrado buenas relaciones en áreas con alta PPNA en Patagonia (mallines) (Irisarri, 2008), debido a que no sufre saturación en ambientes con gran cantidad de biomasa. El NDVI es el índice más ampliamente utilizado en la bibliografía, con una serie de datos de más de 20 años, y con el que se encontró correlación significativa en este capítulo, por lo que todos los esfuerzos de ajuste deberían realizarse sobre este índice.

Considerando que la abundancia y PPNA de los tipos funcionales de los sistemas áridos está controlada por la precipitación (Sala *et al.*, 1997) y también está afectada por la temperatura (Jobbágy *et al.*, 2002) se deberían relacionar los datos de esta tesis con esas variables, aún con la limitación que produce la escasez de estaciones meteorológicas. Estas relaciones se pudieron analizar para uno de los sitios estudiado en esta tesis (Campo Experimental Potrok Aike), que cuenta con una estación meteorológica propia, con una serie de datos de al menos 10 años y con datos de chequeo de pastizales (biomasa de pastos cortos y dicotiledóneas).

El uso de imágenes MODIS parece una herramienta útil en el estudio de la dinámica espacial y temporal de grandes áreas. Con una resolución espacial intermedia entre imágenes NOAA/AVHRR (1- 8 Km) y Landsat (30m) y una resolución temporal interesante (16 días), las imágenes MODIS permiten una descripción adecuada del funcionamiento de la vegetación, al menos en el área sur de la provincia de Santa Cruz. En este trabajo se presentó una descripción de la vegetación en dos áreas ecológicas al sur de la Patagonia austral: Estepa Magallánica Seca y Matorral de Mata Negra, a través de índices de espectrales de imágenes MODIS, con datos cada 16 días, en las temporadas 2003-2010. Esto sustentado en las correlaciones significativas, encontradas en esta tesis, entre estos índices (principalmente NDVI) y biomasa vegetal.

En esta tesis se describieron diferentes atributos estructurales de la vegetación en Estepa Magallánica Seca y Matorral de Mata Negra. Esta descripción, con una amplia distribución de sitios muestreados y con Estados diferentes (en EMS), que incluyó información por forma de vida (Coironal, Intercoironal, Subarbustos y Arbustos) y la proporción de material verde y seco, permitió aportar información sólida para relacionar las variables espectrales, obtenida de imágenes MODIS, con las características estructurales de la vegetación. Se logró también derivar del NDVI los parámetros fenológicos (inicio, longitud y finalización de la estación de crecimiento). El comportamiento de la vegetación en el tiempo en las dos áreas ecológicas pudo ser descripto utilizando el NDVI y el EVI, con el cálculo del umbral propuesto por White (1997).

La PPNA de los ambientes áridos y semiáridos se encuentra íntimamente ligada a la alta variación que presenta la precipitación en estos ecosistemas (Lauenroth, 1979; Noy-Meir, 1973), y responde relativamente rápido, comparada con atributos estructurales, a esta variable climática, en comparación con variables estructurales como la cobertura. El rebrote otoñal que es especialmente evidente en la Estepa Magallánica Seca, puede estar relacionado, además, con las temperaturas, dado que en este período del año las temperaturas aún permiten la actividad fotosintética. Esto ocurre también en el principal período de crecimiento (fines de primavera- verano) en otros lugares de Patagonia (Jobbagy *et al.*, 2000).

La EMS y el MMN presentaron diferencias en cuanto a biomasa total, pero la cobertura vegetal y el elenco de especies son similares. La dominancia de las formas de vida arbustiva y gramínea determinan probablemente las diferencias de respuesta y la evolución diferencial del NDVI (variación interanual) en EMS y MMN. Es probable que las formas de vida arbustiva respondan más lentamente a las variaciones de la disponibilidad hídrica y acumulen biomasa en forma interanual.

La estimación y seguimiento de la PPNA a partir de los índices de vegetación obtenida de imágenes satelitales permitiría incorporar información primordial en el manejo ganadero. La evaluación del comportamiento de la vegetación sería adecuada para determinar el momento de mayor restricción para el consumo animal, de acuerdo a la evolución del año, además de la posibilidad de estimar receptividad ovina, en función de la biomasa total, con la regresión encontrada en esta tesis.

El 26 % de la variación de la cobertura de coirones está explicada por el NDVI. La determinación del estado en el que se encuentra un campo (modelo de Estados y Transiciones) se realiza básicamente a partir de la cobertura de coirones (Borrelli *et al.*, 2001a), por lo que esta relación puede ayudar a realizar estimaciones de estos estados.

El amplio uso que han tenido las imágenes NOAA reside básicamente en que éstas poseen una serie temporal con mayor cantidad de años disponibles que las imágenes MODIS, por lo que su uso podría complementar la información de NDVI de

éstas últimas, principalmente para estudios en los cuales sea necesario contar con una serie de datos satelitales más prolongada.

La complementariedad existente entre la evolución temporal de las curvas y las correlaciones con datos de campo, permitiría una primera aproximación a la realidad del campo, en la EMS y MMN, en tiempo real. La correlación encontrada en esta tesis entre biomasa total y NDVI permitirá realizar el monitoreo de la vegetación tanto espacial como temporal, mejorar la delimitación de áreas ecológicas y realizar una primera aproximación a la disponibilidad de forraje para el ganado ovino. Esto no implica evitar el trabajo de campo, sino complementarlo. Los índices de vegetación estudiados en esta tesis, no estuvieron relacionados con la composición florística de las áreas estudiadas, sin embargo sí lo estuvieron con la fisonomía y funcionamiento de la vegetación, lo que permite estudiar los cambios en la cobertura total o tipo funcional, principalmente en el área de EMS. No obstante se debería considerar un posible cambio en las relaciones NDVI- datos vegetación, si se analizan años con precipitaciones por encima o debajo de la media histórica de la zona. La escasez de datos meteorológicos en la zona sólo permitiría realizar este análisis para algunos sitios, representativos, donde se cuente con superiores a 10 años.

El alto porcentaje de nubosidad que se presenta en la zona durante gran parte del año altera los valores del NDVI. Por ejemplo la imagen de los primeros 16 días de enero del 2011, aparece cubierta de nubes en la porción SW, por lo que las estimaciones de biomasa total aplicando los modelos de esta tesis dan valores de 0. Por esta razón podría pensarse solo en utilizar los valores promedios mensuales o el valor máximo del mes, eliminando de esta manera el “ruido” en la señal ocasionada por la nubosidad.

Deberían realizarse futuras investigaciones incursionando en otros productos del sensor MODIS, como por ejemplo Productividad primaria bruta (MOD17A2, Terra Gross Primary Productivity, 1000 m, 8 Días), tipo de cobertura de tierras (MOD12Q1, Terra Land Cover Type, 1000 m, Anual), dinámica de cobertura de tierras (MOD12Q2 Terra Land Cover Dynamics, 1000 m, Anual), Índice de Área Foliar y Fracción de la Radiación Fotosintéticamente Activa (MOD15A2 Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR), 1000 m, 8d ías). Incluso para análisis regionales se puede pensar en utilizar el producto IV's de resolución espacial menor (por ejemplo MOD13A2 Terra Vegetation Indices, 1000 m, 16 Días).

Es necesaria la validación y el mejoramiento de las ecuaciones de regresión encontradas en este trabajo, pudiéndose emplear para este fin evaluaciones de pastizales existentes en la provincia, presentadas dentro del marco de la ley ovina, que contienen datos de disponibilidad de pastos cortos (intercoironal), distribuidos en toda la provincia. Técnicas estadísticas de re-muestreo permitirían evaluar estas regresiones, como por ejemplo Bootstrapping o Jackknife, que utilizan el conjunto de datos originales y obtienen pseudovalores, con los cuales se construyen nuevas regresiones. Otras técnicas predictivas, como Random Forest (Breiman, 2001) o Redes Neuronales Artificiales, mejorarían las estimaciones de las relaciones entre variables de la vegetación medida a campo y las espectrales. Ambas técnicas han sido utilizadas exitosamente en ecología (Cutler *et al.*, 2007; Paruelo *et al.*, 1997b), con mejores resultados que modelos de regresión. Con los datos generados en esta tesis es posible utilizar redes neuronales donde los atributos de la curva de NDVI (máximo, mínimo, integral, inicio y finalización de la estación de crecimiento), las variables climáticas (con registros de al menos 10 años de datos) y las variables de vegetación actuarían como parámetros para el entrenamiento de la red neuronal.

El análisis subpíxel y los Modelos de Transferencia Radiativa también podrían ser aplicados para mejorar y ajustar las relaciones encontradas en esta tesis. El análisis subpíxel se basa en que la información contenida en un píxel es la respuesta dada por la combinación lineal de la reflectancia de cada tipo de cobertura considerando su proporción (Elmore *et al.*, 2000), por lo que con calibraciones permite obtener la información contenida en un píxel, como tipo de cobertura y porcentaje de ocupación de cada una de estas clases, a partir de conocer las firmas espectrales puras de cada tipo. Los Modelos de Transferencia Radiativa (MTR), que son modelos teóricos, usados para simular la reflectancia del canopy, en función de relaciones físicas como IAF, ángulo de visión, posición del sol, ángulo de inclinación de la hoja, entre otras variables. Los MTR invertidos permiten usar datos satelitales para estimar algunas de estas variables, por ejemplo Índice de Área Foliar (Myneni *et al.*, 1997) y/o cobertura vegetal. Zarco Tejada y otros (2003) encontraron que las reflectancias de las MODIS a través de Modelos de Transferencia Radiativa permiten el monitoreo de el contenido hídrico de las hojas.

Las relaciones encontradas en esta tesis se pueden emplear para realizar clasificaciones funcionales. La utilización de los atributos extraídos de la curva de NDVI (máximo, mínimo, rango relativo e Integral) permite distinguir diferentes tipos de vegetación en función de su comportamiento (Paruelo, 2008; Paruelo *et al.*, 2001a; Paruelo *et al.*, 2004; Paruelo *et al.*, 1998c). Esto permitiría un mejor manejo de los sistemas, dado que los cambios funcionales son de más rápida detección que los estructurales (Cabello *et al.*, 2008; Fernández *et al.*, 2008; Pettorelli *et al.*, 2005).

Bibliografía

- Abdalla, S.H. (1980) *Application of Simulation Techniques to Evaluate Grazing Management Policies in the Semidesert Grasslands of Southern New Mexico*, NMSU.
- Alcaraz, D., Paruelo, J. & Cabello, J. (2006) Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula. *Global Ecology and Biogeography*, **15**, 200-212.
- Anyamba, A. & Tucker, C.J. (2005) Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. *Journal of Arid Environments*, **63**, 596-614.
- Bahamonde, H., Cibils, A. & Oliva, G. (2005). Tasas de descomposición de materia orgánica en relación con la ubicación topográfica en un sitio de la Estepa Magallánica Seca. In *Campo Experimental Potrok Aike Resultado de 15 años de labor técnica* (González, L.; Iglesias, R; Cibils, A Editores), pp. 43- 44. INTA.
- Baret, F. & Guyot, G. (1991) Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing and Environment*, **35**(2-3), 161- 173.
- Bastin, G., Pickup, G., Chewings, V. & Pearce, G. (1993) Land degradation assessment in Central Australia using a grazing gradient method. *Rangeland Journal*, **15**, 190-216.
- Beale, I.F., Orr, D.M., Holmes, W.E., Palmer, N., Evenson, C.J. & Bowly, P.S. (1986). The effect of forage utilization levels on sheep production in the semi-arid south west of Queensland. In *Proceedings 2nd International Rangelands Congress* (ed P.J. Joss, Lynch, P.W. and Williams, O.B.), pp. 30- 34. Australian Academy of Science, Adelaide.
- Bertiller, M., Carrera, A., Bisigato, A. & Sain, C. (2001). Degradation of Patagonian ecosystems of Argentina by grazing. A regional approach. In *Simposio Internacional: medioambiente y uso sustentable de recursos naturales en América Latina.* , Lima.
- Bertiller, M., Irrisari, M.P. & Ares, J. (1990) Phenology of *Festuca pallescens* in relation to topography in north-western Patagonia. *Journal of Vegetation Science*, **1**, 579-584.
- Bisigato, A., Bertiller, M., Ares, J. & Pazos, G. (2005) Effect of grazing on plant patterns in arid ecosystems of Patagonian Monte. *Ecography*, **28**, 561- 572.
- Borrelli, P. (2001). Cap. 5. Producción animal sobre pastizales naturales. In *Ganadería ovina sustentable en la Patagonia Austral*. (eds P. Borrelli & G. Oliva), pp. 131-162. INTA, Buenos Aires.
- Borrelli, P., Anglesio, F., Baetti, C., Iacomini, M. & Ramstrom, A. (1988) Condición de pastizales en el sudeste de Santa Cruz (Patagonia) II: Sitio "Santacruzense". *Revista Argentina de Producción Animal*, **8**(3), 201-213.
- Borrelli, P., Cheppi, C., Iacomini, M. & Ramstrom, A. (1984) Condición de pastizales en el sitio terraza de Río Gallegos. *Revista Argentina de Producción Animal*, **4**(9), 879-897.

Borrelli, P. & Oliva, G. (2001a). Cap. 4. Efectos de los animales sobre los pastizales. In *Ganadería ovina sustentable en la Patagonia Austral*. (eds P. Borrelli & G. Oliva), pp. 101- 130. INTA, Buenos Aires.

Borrelli, P. & Oliva, G. (2001b). Cap. 6. Evaluación de pastizales. In *Ganadería ovina sustentable en la Patagonia Austral. Tecnología de Manejo Extensivo* (eds P. Borrelli & G. Oliva), pp. 163- 184. INTA, Buenos Aires.

Borrelli, P. & Oliva, G. (2001c) *Ganadería ovina sustentable en la Patagonia Austral. Tecnología de manejo extensivo* INTA Regional Patagonia Sur y GTZ (Alemania). Buenos Aires.

Borrelli, P., Oliva, G., Williams, M., Gonzalez, L., Rial, P. & Montes, L. (1997) *Sistema regional de soporte de decisiones. Santa Cruz y Tierra del Fuego* Proyecto Prodeser. INTA-GTZ., Buenos Aires.

Braun Blanquet, J.J. (1932) *Plant sociology, the study of plant communities* Hafner Pub co, New York.

Breiman, L. (2001) Random Forest. *Machine Learning*, **45**, 5- 32.

Cabello, J., Alcaráz Segura, D., Altesor, A., Delibes, M., Baeza, S. & Liras, E. (2008). Funcionamiento ecosistémico y evaluación de prioridades geográficas en conservación. In *Ecosistemas*, Vol. 17, pp. 53- 63.

Cabrera, A. (1976). Regiones fitogeográficas argentinas. Fascículo 1. In *Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería. Tomo II* (ed W. Kugler), p 85pp. Editorial ACME S.A.C.I., Buenos Aires.

Canfield, R.H. (1941) Application of line interception method in sampling range vegetation. *Journal Forestry*, **39**, 388- 394.

Ceccato, P. (2001) *Estimation of vegetation water content using remote sensing for the assessment of fire risk occurrence and burning efficiency*, University of Greenwich.

Chen, X., Xu, C. & Tan, Z. (2001) An analysis of relationships among plant community phenology and seasonal metrics of Normalized Difference Vegetation Index in the northern part of the monsoon region of China. *International Journal Biometeorology*, **45**, 170- 177.

Chuvieco, E. (1995) *Fundamentos de Teledetección espacial*. Rialp S. A. , España.

Chuvieco, E., Cocero, D., Aguado, I., Palacios, A. & Prado, E. (2004a) Improving burning efficiency estimates through satellite assessment of fuel moisture content. *Journal of Geophysical Research*, **109**, D14S07, doi:10.1029/2003JD003467: 003461-003468.

Chuvieco, E., Cocero, D., Riaño, D., Martín, P., Martínez-Vega, J., de la Riva, J. & Pérez, F. (2004b) Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*, **92**, 322- 331.

- Cibils, A. (1993a) Manejo de pastizales. *En Borrelli, P. y Oliva, G. (Eds). Catálogo de prácticas. EEA INTA Santa Cruz. Ganadería Ovina Sustentable en la Patagonia Austral: Tecnología de Manejo Extensivo, INTA, 2001.*
- Cibils, A. (1993b). Manejo de pastizales. Informe técnico de cambio rural. Catálogo de prácticas. Tecnologías disponibles. . In. EEA Santa Cruz, Río Gallegos.
- Cibils, A., Humano, G., Escalada, J. & Torra, F. (2005). Productividad primaria de un pastizal de la Estepa Magallánica Seca. In *Campo Experimental Potrok Aike Resultado de 15 años de labor técnica (González, L.; Iglesias, R; Cibils, A Editores)*, pp. 59- 60. INTA.
- Cutler, R., Edwards, T., Beard, K., Cutler, A., Hess, K., Gibson, J. & Lawler, J. (2007) Random Forest for classification in ecology. *Ecology*, **88**(11), 2783- 2792.
- De Fina, A., Garbosky, A., Gianetto, F. & Sabella, L. (1968) *Difusión geográfica de cultivos índices en la Provincia de Santa Cruz y sus causas*, Buenos Aires.
- del Valle, H.F. (1999) Uso de la información satelital NOAA AVHRR en el monitoreo ecológico patagónico. *Revista Argentina de Producción Animal*, **19**, 119-123.
- Di Bella, C., Paruelo, J., Becerra, J., Bacour, C. & Baret, F. (2004a) Effect senescent leaves on NDVI-based estimates of fAPAR experimental and modelling evidences. *International Journal of Remote Sensing*, **25**(23), 5415- 5427.
- Di Bella, C., Rebella, C. & Paruelo, J. (2000) Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. *International Journal of Remote Sensing*, **21**(4), 791- 797.
- Di Bella, C.M., Faivre, R., Ruget, F., Seguin, B., Guérif, M., Combal, B., Weiss, M. & Rebella, C. (2004b) Remote sensing capabilities to estimate pasture production in France. *International Journal of Remote Sensing*, **25**(23), 5359- 5372.
- Didan, K. & Huete, A. (2006) MODIS Vegetation Index Product Series Collection 5 Change Summary. TBRS Lab. The University of Arizona.
- Ebata, M. & Tateishi, R. (2001) Phenological stage monitoring in Siberia by using NOAA/AVHRR data. *22nd Assian Conference on Remote Sensing*, Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing. National University of Singapur.
- Elmore, A.J., Mustard, J.F., Manning, S.J. & Lobell, D.B. (2000) Quantifying vegetation change in semiarid environments: precision and accuracy of spectral mixture analysis and the normalized difference vegetation index. *Remote Sensing and Environment*, **73**, 87-102.
- Epstein, H.E., Lauenroth, W.K., Burke, I.C. & Coffin, D.P. (1997) Productivity patterns of C3 and C4 functional types in the U.S. Great Plains. *Ecology*, **78**(3), 722- 731.
- Fabricante, I. (2005) *Variaciones Espaciales y Temporales del Índice Verde Normalizado en el Norte de la Patagonia*, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
- Fernández, N. & Piñeiro, G. (2008). La caracterización de la heterogeneidad espacial de los ecosistemas: el uso de atributos funcionales derivados de datos espectrales. In *Ecosistemas*, Vol. 17, pp. 64- 78.

- Fernandez, R.J., Sala, O. & Golluscio, R. (1991) Woody and herbaceous aboveground production of a Patagonian steppe. *Journal of Range Management*, **44**(5), 434- 437.
- Ferrante, D. (no publicado) *Distribución del agua en el suelo, en relación con la estructura radical y producción de biomasa de tres tipos funcionales en un pastizal de la Estepa Magallánica Seca, en Santa Cruz.*, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
- Gamon, J., Field, C., Goulden, M., Griffin, K., Hartley, A., Joel, G., Peñuelas, J. & Valentini, R. (1995) Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three californian vegetation types. *Ecological Applications*, **5**(1), 28- 41.
- Gao, B. (1996) NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing and Environment*, **58**, 257- 266.
- Gauch, H.G.J. (1982) Multivariate Analysis in Community Ecology. *Cambridge Univ. Press. New York. Citado en Lezama, F., Altesor, A. , León, R. y Paruelo, J. Heterogeneidad de la vegetación en pastizales naturales de la región basáltica de Uruguay. 2006. Ecología Austral.16: 167- 182.*
- Gilabert, M.A., González- Piqueras, J. & García- Haro, J. (1997) Acerca de los Indices de Vegetación. *Revista de teledetección*, **8**, 1-10.
- Gilabert, M.A., González- Piqueras, J., García- Haro, J. & Meliá, J. (2002) A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing and Environment*, **82**, 303- 310.
- Giltelson, A., Kaufman, Y. & Merzlyak, N. (1996) Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS- MODIS. *Remote Sensing and Environment*, **58**, 289- 298.
- Gitay, H. & Noble, I.R. (1997). What are functional types and how should we seek them? En *Plant Functional Types. Their relevance to ecosystem properties and global change* (eds. Smith, T. M., Shugart, H. H., y Woodward, F. I.), pp. 3-19, Cambridge University Press, Cambridge, UK. Citado en Alcaraz, D., Paruelo, J., Ovonarte, C., Piquer, M. & Cabello, J. (2004). Tipos funcionales de ecosistemas de la península ibérica. Implicaciones para el cambio global y la conservación de la biodiversidad. In *Ecosistemas*, Vol. XIII. In.
- Golluscio, R. (2005). Dimensiones de la heterogeneidad a nivel de comunidad: profundidad radical y fenología en 25 especies patagónicas. In *La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas* (ed FAUBA), pp. 145- 169, Buenos Aires.
- Golluscio, R. (2009) Receptividad ganadera: marco teórico y aplicaciones prácticas. *Ecología Austral*, **19**, 215- 232.
- Golluscio, R., Deregibus, A. & Paruelo, J.M. (1998a) Sustainability and range management in Patagonian steppes. *Ecología Austral*, **8**, 265- 284.
- Golluscio, R. & Sala, O. (1993) Plant functional types and ecological strategies in Patagonian forbs. *Journal of Vegetation Science*, **4**, 839- 846.
- Golluscio, R.A., Deregibus, V.A. & Paruelo, J.M. (1998b) Sustainability and range management in the Patagonian steppes. *Ecología Austral*, **8**, 265- 284.

Goward, S.N., Tucker, C.I. & Dye, D.G. (1985) North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 AVHRR. *Vegetatio*, **64**, 3- 14. (Citado en Running, S., Nemani, R., Heinsch, F., Zhao, M., Reeves, M. & Hashimoto, H. (2004). A Continuous Satellite-Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production. In *BioScience*, Vol. 2054, pp. 2547- 2560.).

Goward, S.N., Waring, R.H., Dye, D.G. & Yang, J. (1994) Ecological remote sensing at OTTER: satellite macroscale observations. *Ecological Applications*, **4**(2), 322- 343.

Gu, Y., Brown, J.F., Verdin, J.P. & Wardlow, B. (2007) A fiveyear analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, **34**, L06407:06401- L06407:06406.

Guo, N., Wang, X., Cai, D. & Yang, J. (2007). Comparison and Evaluation Between MODIS Vegetation Indices in Northwest China. In *Geosciende and Remote Sensing Symposium*, pp. 3366- 3369. IEEE International.

Guo, X., Gao, W., Richard, P., Lu, Y., Zheng, Y. & Pietroniro, E. (2004). Canadian prairie drought assessment through MODIS vegetation indices. In *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability* (Ed. Gao, W. & Shaw, D.), Vol. 5514, pp. 149- 158. Proceedings of SPIE, Bellingham. USA.

Hill, M.J., Donald, G.E., Hyder, M.W. & Smith, R.C.G. (2004) Estimation of pasture growth rate in the south west of Western Australia from AVHRR NDVI and climate data. *Remote Sensing and Environment*, **93**, 528-545.

Holechek, J.L. (1991) Chihuahuan Desert rangeland, livestock grazing, and sustainability. *Rangelands*, **13**, 115- 120.

Huete, A. (1989). Soil influences in remotely sensed vegetation-canopy spectral. In *Theory and applications of optical remote sensing* (ed G. Asrar), pp. 107- 141. Citafo en Paruelo, J., Epstein, H.E., Lauenroth, W.K., y Burke, I.C. (1997) ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the US. *Ecology*, 1978, 1953- 1958. John Wiley and Sons, New York. USA.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X. & Ferreira, L.G. (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, **83**, 195- 213.

Huete, A., Justice, C. & van Leeuwen, W. (1999) MODIS vegetation index (mod 13). Algorithm theoretical basis document. *University of Arizona*, 120.

Humano, G., Oliva, G., Battini, A., Mascó, M., Kofalt, R. & Barría, D. (2005). La vegetación del Campo Experimental Potrok Aike. In *Campo Experimental Potrok Aike Resultado de 15 años de labor técnica* (González, L.; Iglesias, R; Cibils, A Editores), pp. 43- 44. INTA.

Hunt, E. & Rock, B. (1989) Detection of Changes in Leaf Water Content Using Near- and Middle-Infrared Reflectances. *Remote Sensing and Environment*, **30**, 43- 54.

Hunt, E. & Yilmaz, M. (2007). Remote Sensing of Vegetation Water Content using Shortwave Infrared Reflectances. In *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability IV. Editado por W. Gao y S. Ustin*, Vol. 6679, 667902-1. SPIE.

Hutchings, S.S. & Stewart, G. (1953) Increasing forage yields and sheep production on intermountain winter ranges. *USDA, Circ. 925*.

INDEC. (2008). Censo Nacional Agropecuario 2002. In. http://www.indec.mecon.gov.ar/agropecuario/cna_principal.asp.

INTA. (2008). AER Río Gallegos. Datos climaticos estancias. In. Datos inéditos.

INTA. (En Prensa). Mapa de Regiones Ecológicas Homogéneas In *Programa Nacional de Ecorregiones. La Ecorregión Patagonia. Centros Regionales Patagonia Norte y Sur*. INTA. EEA Bariloche. EEA Trelew. EEA Santa Cruz.

Irisarri, G. (2008) *Variación espacial y temporal de la productividad primaria neta aérea de mallines del Noroeste de la Patagonia*, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.

Jackson, T., Chen, D., Cosh, M., Li, F., Anderson, M., Walthall, C., Doriaswamy, P. & Hunt, E. (2004) Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing and Environment*, **92**, 475- 482.

Ji, L. & Peters, A. (2003) Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, **87**, 85- 98.

Jobbagy, E.G. & Sala, O. (2000) Controls of grass and shrub aboveground production in the Patagonian steppe. *Ecological Applications*, **10**(2), 541- 549.

Jobbágy, E.G., Sala, O.E. & Paruelo, J.M. (2002) Patterns and controls of primary production in the patagonian steppe: a remote sensing approach. *Ecology*, **83**(2), 307- 319.

Jönsson, P. & Eklundh, L. (2006) TIMESAT a Program for Analyzing Time-Series of Satellite Sensor Data. *Users Guide for TIMESAT 2.3*.

Julien, Y., Sobrino, J. & Verhoef, W. (2006) Changes in land surface temperatures and NDVI values over Europe between 1982 and 1999. *Remote Sensing and Environment*, **103**, 43- 55.

Justice, C.O., Vermote, E., Townshend, J.R.G., Defries, R., Roy, D.P., Hall, D.K., Salomonson, V.V., Privette, J.L., Riggs, G., Strahler, A., Lucht, W., Myneni, R.B., Knyazikhin, Y., Running, S.W., Nemani, R.R., Wan, Z., Huete, A.R., van Leeuwen, W., Wolfe, R.E., Giglio, L., Muller, J.-P., Lewis, P. & Barnsley, M.J. (1998) The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, **36**(4), 1228- 1249.

Kaduk, J.D. & Heimann, M. (1996) A prognostic phenology scheme for global terrestrial carbon cycle models. *Climate Research*, **6**(1), 1-19.

Kaurivi, J.Z.U., Huete, A.R. & Didan, K. (2003). Multitemporal MODIS-EVI Relationships With Precipitation and Temperature at the Santa Rita Experimental Range. In *Santa Rita Experimental Range: 100 years (1903 to 2003) of accomplishments and contributions* (ed M.F. McClaran, P.; Edminster, C., tech.

coords.). Proc. RMRS-P-30. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Kawamura, K., Akiyama, T., Yokota, H.-o., Tsutsumi, M., Yasuda, T., Watanabe, O. & Wang, S. (2005) Quantifying grazing intensities using geographic information systems and satellite remote sensing in the Xilingol steppe region, Inner Mongolia, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **107**, 83- 93.

Knapp, A.K. & Smith, M.D. (2001) Variation Among Biomes in Temporal Dynamics of Aboveground Primary Production. *Science*, **291**(19), 481- 484.

Lauenroth, W.K. (1979). Grassland primary production: North American Grasslands in perspective. In *Perspectives in grassland ecology. Ecological studies* (ed N.R. French), Vol. 32, pp. 3- 24. Springer- Verlag, New York, USA. En Sala, O. Parton, W, J., Joyce, L.A. y Lauenroth, W.K., 1988. Primary production of the Central Grassland region of the United States. *Ecology*, 69 (1): 40-45.

Lauenroth, W.K., Hunt, H.W., Swift, D.M. & Singh, J.S. (1986) Estimating above-ground net primary production in grasslands: a simulation approach. *Ecological Modelling*, **33**, 297- 314.

Lauenroth, W.K. & Sala, O. (1992) Long- term forage production of North American shortgrass steppe. *Ecological Applications*, **2**(4), 397- 403.

León, R., Bran, D., Collantes, M., Paruelo, J. & Soriano, A. (1998) Grandes Unidades de vegetación de la Patagonia extra andina. *Ecología Austral*, **8**, 125 - 144.

León, R.J.C. & Aguiar, M.R. (1985) El deterioro por uso pasturil en estepas herbáceas patagónicas. *Phytocoenología*, **13**, 181- 196.

Levy, E. & Madden, D. (1933) The point method of pasture analysis. *New Zealand Journal of Agriculture*, **46**, 267-269.

Magurran, A.E. (2004). Chapter Six. Diversity in space and time. In *Measuring biological diversity*, p 256. Blackwell Science Oxford.

Margalef, R. (1978) *Perspectivas de la teoría ecológica* Vendra S. A. , Barcelona. España. Citado en Giraldo Mendoza, A. y Arellano Cruz, G. 2002. Equivalencia entre series temporales de diversidad para dos niveles taxonómicos. *Ecología Aplicada*, Vol. 1, N° 1, pp. 43 – 49.

Mazzarino, M., Bertiller, M., Sain, C., Satti, P. & Coronato, F. (1998) Soil nitrogen dynamics in northeastern Patagonia steppe under different precipitation regimes. *Plant and soil*, **202**, 125-131.

Mc Naughton, S.J., Oesterheld, M., Frank, D.A. & Williams, K.J. (1989) Ecosystem level patterns of primary production and herbivory in terrestrial habitats. *Nature*, **341**, 142-144.

McCune, B. & Mefford, M.J. (1999). PC-ORD: Multivariate analysis of ecological data. In. MjM Software, Gleneden Beach, Oregon, USA.

- Milchunas, D.G. & Lauenroth, W.K. (1993) Quantitative effects of grazing on vegetation and soils over a global range of environments. *Ecological Monographs*, **63**(4), 327- 366.
- Monteith, J.L. (1994) Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. *Agricultural and Forest Meteorology*, **68**, 213- 220.
- Movia, C.P., Soriano, A. & Leon, R.J.C. (1987) La vegetación de la cuenca del Río Santa Cruz (Provincia de Santa Cruz, Argentina). *Darwiniana*, **28**, 9-78.
- Mueller-Dombois, D. & Ellenberg, H. (1974) *Aims and methods of vegetation ecology*, Wiley, New York. .
- Myneni, R.B., Hoffman, S., Knyazikhin, Y., Privette, J.L., Glassy, J., Tian, Y., Wang, Y., Song, X., Zhang, Y., Smith, G.R., Lotsch, A., Friedl, M., Morisette, J.T., Votava, P., Nemani, R. & Running, S.W. (2002) Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, **83**, 214- 231.
- Myneni, R.B., Nemani, R. & Running, S. (1997) Estimation of Global Leaf Area Index and Absorbed Par Using Radiative Transfer Models. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, **35**(6), 1380- 1393.
- Noy-Meir. (1973) Desert ecosystems: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **4**, 25-51.
- Odum, E.P. (1971) *Fundamentals of ecology*, 3^a edn., Saunders. Philadelphia.
- Odum, E.P. (1980). La Diversidad como función del flujo de energía. In *Conceptos unificadores en ecología* (ed E. Blume), Barcelona. España. Citado en Giraldo Mendoza, A. y Arellano Cruz, G. 2002. Equivalencia entre series temporales de diversidad para dos niveles taxonómicos. *Ecología Aplicada*, Vol. 1, N° 1, pp. 43 – 49.
- Oesterheld, M., Di Bella, C. & Kerdiles, H. (1998) Relation between NOAA-AVHRR satellite data and stocking rate of rangelands. *Ecological Applications*, **8**(1), 207- 212.
- Oesterheld, M., Sala, O.E. & McNaughton, S.J. (1992) Effect of animal husbandry on herbivore- carrying capacity at a regional scale. *Nature*, **356**.
- Oliva, G., Cibils, A., Borrelli, P. & Humano, G. (1998) Stable states in relation to grazing in Patagonia: A 10-year experimental trial. *Journal of Arid Environments*, **40**, 113-131.
- Oliva, G., González, L., Rial, P. & Livraghi, E. (2001a). Cap. 2. El ambiente en la Patagonia Austral. In *Ganadería ovina sustentable en la Patagonia Austral*. (eds P. Borrelli & G. Oliva). INTA, Buenos Aires.
- Oliva, G., Noy- Meir, I. & Cibils, A. (2001b). Cap. 3. Fundamentos de ecología de pastizales. In *Ganadería ovina sustentable en la Patagonia Austral*. (eds P. Borrelli & G. Oliva). INTA, Buenos Aires.
- Oliva, G.E., González, L. & Rial, P. (1999) La teledetección aplicada a la evaluación de los recursos forrajeros a escala de predio en Patagonia. *Revista Argentina de Producción Animal*, **19**, 145-155.

- Oliva, G.E., Rial, P., González, L., Cibils, A. & Borrelli, P. (1995). Evaluation of carrying capacity using Landsat MSS images in South Patagonia. In *5th International Rangeland Congress*.
- Paruelo, J. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. In *Ecosistemas*, Vol. 17, pp. 4- 22.
- Paruelo, J., Epstein, H.E., Lauenroth, W.K. & Burke, I.C. (1997a) ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the US. *Ecology*, **78**, 953- 958.
- Paruelo, J., Jobbagy, E.G. & Sala, O. (2001a) Current distribution of ecosystem functional types in temperate south america. *Ecosystems*, **4**, 683- 698.
- Paruelo, J., Jobbagy, E.G., Sala, O., Lauenroth, W.K. & Burke, I.C. (1998a) Functional and structural convergence of temperate grassland and shrubland ecosystems. *Ecological Applications*, **8**(1), 194- 206.
- Paruelo, J. & Lauenroth, W.K. (1995) Regional patterns of NDVI in North American shrubland and grassland. *Ecology*, **78**, 1888- 1898.
- Paruelo, J. & Tomasel, F. (1997b) Prediction of functional characteristics of ecosystems: a comparison of artificial neural networks and regression models. *Ecological Modelling*, **98**, 173- 186.
- Paruelo, J.M., Beltran, A., Jobbágy, E.G., Sala, O.E. & Golluscio, R.A. (1998b) The climate of Patagonia: general patterns and controls on biotic processes. *Ecologia Austral*, **8**, 85-101.
- Paruelo, J.M., Bertiller, M.B., Schlichter, T.M. & Coronato, F.R. (1993) *Secuencias de deterioro en distintos ambientes patagónicos. Su caracterización mediante el modelo de estados y transiciones* Proyecto LUDEPA. Convenio INTA-GTZ., Bariloche.
- Paruelo, J.M., Burke, I.C. & Lauenroth, W.K. (2001b) Land-use impact on ecosystem functioning in eastern Colorado, USA. *Global Change Biology*, **7**, 631-639.
- Paruelo, J.M., Golluscio, R.A., Guerschman, J.P., Cesa, A., Jouve, V.V. & Garbulsky, M. (2004) Regional scale relationships between ecosystem structure and functioning: the case of the Patagonian steppes. *Global Ecology and Biogeography*, **13**, 385-395.
- Paruelo, J.M., Jobbágy, E.G. & Sala, O.E. (1998c) Biozones of Patagonian (Argentina). *Ecologia Austral*, **8**, 145-153.
- Paruelo, J.M. & Lauenroth, W.K. (1998d) Interannual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography*, **25**(4), 721-733.
- Paruelo, J.M., Oesterheld, M., Di Bella, C.M., Arzadun, M., Lafontaine, J., Cahupé, M. & Rebella, C.M. (2000) Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. *Applied Vegetation Science*, **3**, 189-195.
- Paruelo, J.M. & Sala, O.E. (1992) El impacto de la desertificación sobre la capacidad de carga de las estepas patagónicas: sus consecuencias económicas. *II Congreso Latinoamericano de Ecología. Caxambu. Brasil*, 36.

- Pettorelli, N., Vik, J.O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C.J. & Stenseth, N.C. (2005) Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution*, **20**(9), 503- 510.
- Pickup, G., Chewings, V. & Nelson, D. (1993) Estimating changes in vegetation cover over time in arid rangelands using Landsat MSS data. *Remote Sensing and Environment*, **43**, 243-263.
- Piñeiro, G., Oesterheld, M. & Paruelo, J.M. (2006) Seasonal Variation in Aboveground Production and Radiation-use Efficiency of Temperate rangelands Estimated through Remote Sensing. *Ecosystems*, **9**, 357- 373.
- Posse, G. & Cingolani, A. (2004) A test of the use of NDVI data to predict secondary productivity. *Applied Vegetation Science*, **7**, 201- 208.
- Posse, G. & Cingolani, A.M. (2000) Environmental controls of NDVI and sheep production in the Tierra del Fuego steppe of Argentina. *Applied Vegetation Science*, **3**, 253-260.
- Reed, B., Brown, J., VanderZee, D., Loveland, T., Merchant, J. & Ohlen, D. (1994) Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, **5**, 703-714.
- Rial, P. (2001). Grandes unidades de paisaje. In *Ganadería ovina sustentable en la Patagonia Austral* (eds P. Borrelli & G. Oliva), Vol. Cap. 2, pp. 22- 40, Buenos Aires.
- Roig, F., Anchorena, J., Dollenz, A., Faggi, A. & Méndez, E. (1985). Las comunidades vegetales de la transecta botánica de la Patagonia Austral. Primera parte. La vegetación del área continental. . In *Transecta Botánica de la Patagonia Austral* (eds O. Boelcke, D. Moore & F. Roig), pp. 350- 456. Conicet- Royal Society- Instituto de la Patagonia, Buenos Aires.
- Running, S. & Nemani, R. (1988) Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forests in different climates. *Remote Sensing and Environment*, **24**, 347- 367.
- Running, S., Thornton, P., Nemani, R. & Glassy, J. (2000). Chapter 3. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system. In *Methods in ecosystem science*. Springer, N.Y.
- Sala, O. & Austin, A. (2000). Methods of estimating Aboveground Primary Production. O.Sala- R. Jackson- H. Mooney & R. Howarth editores. In *Methods in Ecosystem Science*. New York Springer Verlag.
- Sala, O., Deregibus, V.A., Schilchler, T. & Alippe, H. (1981) Productivity Dynamics of a native temperate grassland in Argentina. *Journal of Range Management*, **34**(1), 48- 51.
- Sala, O.E., Lauenroth, W.K. & Golluscio, R.A. (1997). Plant functional types in temperate semi-arid regions. In *Plant functional types - their relevance to ecosystem and global change* (eds T.M. Smith, H.H. Shugart & F.I. Woodward), pp. 217-233. Cambridge University Press, Cambridge.

- Sala, O.E., Parton, W.J., Joyce, L.A. & Lauenroth, W.K. (1988) Primary production of the Central Grassland Region of the United States. *Ecology*, **69**(1), 40- 45.
- Salazar Lea Plaza, J. & Godagnone, R. (1990). Provincia de Santa Cruz. Escala 1:1.000.000. In *Atlas de Suelos de la República Argentina*. INTA - Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca, Buenos Aires.
- Sandholt, I., Rasmussen, K. & Andersen, J. (2002) A Simple Interpretation of The Surface Temperature / Vegetation Index Space For Assessment of Surface Moisture Status. *Remote Sensing and Environment*, **79**, 213-224.
- Sellers, P.J. (1985) Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, **6**, 1335- 1372. Citado en Huete, A., Justice, C., y van Leeuwen, W. (1999) MODIS vegetation index (mod 1313). Algorithm theoretical basis document. University of Arizona, 1120.
- Singh, J.S., Lauenroth, W.K. & Steinhorst, R.K. (1975) Review and assessment of various techniques for estimating net aerial primary production in grassland from harvest data. *Botanical Review*, **41**, 181-232. En Jobbágy, E.G., Sala, O.E. y Paruelo, J. M., 2002. *Ecology* 2083 (2002): 2307-2319.
- Smith, T.M., Shugart, H.H., Woodward, F.I. & Burton, P.J. (1993). Plant functional types. In *Vegetation dynamics and global change* (ed A.M.y.S. Solomon, H. H.), pp. 272- 292. Chapman & Hall, New York, USA. Citado en Alcaráz Segura, D., Paruelo, J., Oyonarte Gutiérrez, C., Piquer, M., y Cabello Piñar, J. (2004) Tipos funcionales de ecosistemas de la Península Ibérica. Implicaciones para el cambio global y la conservación de la biodiversidad. In *Ecosistemas*, Vol. 13, pp. 76- 81.
<<http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=9>>.
- Solbrig, O.T., Barbour, M.A., Cross, J., Goldstein, G., Lowe, C.H., Morello, J. & Young, T.W. (1977). The strategies and community patterns of desert plants. In *Convergent evolution in warm desert* (ed O.T. Orians G. H. & Solbrig), pp. 67- 106. Downden, Hutchinson and Ross, Inc. Stroudsburg, PA. Citado en Golluscio, R. & Sala, O. (1993) Plant functional types and ecological strategies in Patagonian forbs. *Journal of Vegetation Science*, **4**, 839- 46.
- Somlo, R. (1997) *Atlas dietario de herbívoros patagónicos* Prodesar- INTA- GTZ, Bariloche.
- Soriano, A. (1956) La vegetación de la República Argentina. IV. Los distritos florísticos de la Provincia Patagónica. *Revista de Investigaciones Agrícolas*, **10**(4), 323-347. Citado en León, R., Bran, D., Collantes, M., Paruelo, J. & Soriano, A. (1998) Grandes Unidades de vegetación de la Patagonia extra andina. *Ecología Austral*, 1998, pp. 1125-1944.
- Soriano, A. (1959) Síntesis de resultados obtenidos en las clausuras instaladas en 1954 y 1955. *Revista Agronómica del Noroeste Argentino*, **3**(1- 2), 163- 176.
- Soriano, A. & Movia, C. (1986) Erosión y desertización en la Patagonia. *Interciencia*, **11**, 77-83.

- Soriano, A. & Paruelo, J. (1992) Biozones: vegetation units defined by functional characters identifiable with the aid of satellite sensor images. *Global Change Biology Letters*, **2**, 82- 89.
- Soto, J. & Vazquez, M. (2000). Las condiciones climáticas de la Provincia de Santa Cruz. In *El Gran Libro de la Provincia de Santa Cruz* (eds A.N. García & E. Mazzoni), Vol. 1, pp. 98-115. ALFA Centro Literario y Milenio Ediciones, España.
- Wan, Z. (1999) MODIS Land-Surface Temperature. Algorithm theoretical basis document (LST ATBD). Version 3.3. *Institute for Computational Earth System Science. University of California, Santa Barbara*.
- Westoby, M., Walker, B. & Noy-Meir, I. (1989) Opportunistic management of rangelands not at equilibrium. *Journal of Range Management*, **42**(4), 266-274.
- White, M., Thornton, P. & Running, S. (1997) A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, **11**(2), 217- 234.
- Whittaker, R.H. (1972) Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, **21**(2/3), 213- 251.
- Winder, J.A., Calvin, C.B., Milton, T. & Holechek, J.L. (2000) Breed and stocking rate effects on Chihuahuan desert cattle production. *Journal of Range Management*, **53**, 32-38.
- Zarco-Tejada, P.J., Rueda, C.A. & Ustin, S.L. (2003) Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. *Remote Sensing of Environment*, **85**, 109- 124.
- Zhang, X., Friedl, M., Schaaf, C., Strahler, A., Hodges, J., Gao, F., Reed, B. & Huete, A.R. (2003) Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, **84**, 471- 475.

ANEXO

Tabla 1. Frecuencia de aparición de especies en los censos dentro de cada área ambiental. Forma de vida: P= Pasto, C= Coirón, H= Hierba, S= Subarbusto, A= Arbusto.

| Especie | Código | Forma de vida | Familia | Frecuencia | |
|-----------------------------------|--------|---------------|------------------|------------|------|
| | | | | EMS | MATA |
| <i>Acaena pinnatifida</i> | ACA | H | Rosaceae | 1 | 0 |
| <i>Acaena poeppigiana</i> | ACP | H | Rosaceae | 11 | 1 |
| <i>Acaena spp.</i> | ACsp | H | Rosaceae | 0 | 1 |
| <i>Adesmia lotoides</i> | ADL | H | Rosaceae | 8 | 3 |
| <i>Agropyron patagonicum</i> | AGP | P | Fabaceae | 0 | 1 |
| <i>Agrostis spp.</i> | AGS | P | Poaceae | 3 | 0 |
| <i>Anartrophyllum desideratum</i> | AND | S | Fabaceae | 1 | 0 |
| <i>Arjona patagonica</i> | ARJ | H | Santalaceae | 1 | 3 |
| <i>Armeria maritima</i> | ARM | H | Plumbaginaceae | 4 | 1 |
| <i>Azorella filamentosa</i> | AZF | H | Apiaceae | 4 | 2 |
| <i>Azorella monanthos</i> | AZM | S | Apiaceae | 2 | 0 |
| <i>Berberis spp.</i> | BRB | A | Berberidaceae | 1 | 2 |
| <i>Brachyclados spp.</i> | BRA | S | Asteraceae | 1 | 0 |
| <i>Bromus setifolius</i> | BRS | P | Poaceae | 11 | 6 |
| <i>Calandrinia spp.</i> | CAL | H | Portulacaceae | 1 | 1 |
| <i>Calceolaria uniflora</i> | CAU | H | Scrophulariaceae | 4 | 0 |
| <i>Carex andina</i> | CAA | P | Cyperaceae | 11 | 3 |
| <i>Carex argentina</i> | CAR | P | Cyperaceae | 4 | 7 |
| <i>Cerastium arvense</i> | CEA | H | Caryophyllaceae | 11 | 7 |
| <i>Colobanthus subulatus</i> | COS | S | Caryophyllaceae | 10 | 6 |
| <i>Deschampsia flexuosa</i> | DEF | P | Poaceae | 3 | 0 |
| <i>Ephedra frustillata</i> | EPF | S | Ephedraceae | 6 | 4 |
| <i>Euphorbia spp.</i> | EUP | S | Euphorbiaceae | 2 | 0 |
| <i>Festuca gracillima</i> | FEG | C | Poaceae | 11 | 1 |
| <i>Festuca pallescens</i> | FEP | C | Poaceae | 0 | 1 |
| <i>Festuca pyrogea/mag</i> | FEM | P | Poaceae | 11 | 7 |
| <i>Galium spp.</i> | GAL | H | Rubiaceae | 3 | 0 |
| <i>Hordeum comosum</i> | HOC | P | Poaceae | 4 | 1 |
| <i>Huanaca acaulis</i> | HUA | H | Apiaceae | 0 | 1 |
| <i>Hypochoeris incana</i> | HYP | H | Asteraceae | 5 | 0 |
| <i>Junellia tridens</i> | JUT | A | Verbenaceae | 0 | 7 |
| <i>Leuceria purpurea</i> | LEU | H | Compositae | 0 | 1 |
| <i>Líquenes</i> | LIQ | L | líquenes | 8 | 5 |
| <i>Luzula chilensis</i> | LUC | H | Juncaceae | 3 | 1 |
| <i>Mulinum mycrophilum</i> | MUM | S | Apiaceae | 1 | 0 |
| <i>Mulinum sp</i> | MUL | S | Apiaceae | 0 | 1 |
| <i>Musgos</i> | MUS | M | musgos | 4 | 4 |
| <i>Nardophyllum brioides</i> | NAB | S | Asteraceae | 9 | 4 |
| <i>Nassauvia aculeata</i> | NAA | S | Asteraceae | 0 | 1 |
| <i>Nassauvia darwinii</i> | NAD | S | Asteraceae | 4 | 3 |
| <i>Nassauvia ulicina</i> | NAU | S | Asteraceae | 0 | 3 |

| Especie | Código | Forma de vida | Familia | Frecuencia | |
|-------------------------------|--------|---------------------|-----------------|------------|------|
| | | | | EMS | MATA |
| <i>Oxalis enneaphylla</i> | OXE | H | Oxalidaceae | 1 | 0 |
| <i>Perezia lanigera</i> | PEL | S | Asteraceae | 1 | 1 |
| <i>Perezia recurvata</i> | PER | S | Asteraceae | 7 | 2 |
| <i>Poa duseii</i> | POD | P | Poaceae | 11 | 7 |
| <i>Poa lanuginosa</i> | POL | P | Poaceae | 0 | 4 |
| <i>Poligala darwiniana</i> | PLG | S | Poligaleaceae | 5 | 7 |
| <i>Rytidosperma virescens</i> | RYV | P | Poaceae | 10 | 3 |
| <i>Satureja darwinii</i> | SAD | S | Labiatae | 8 | 7 |
| <i>Senecio laseguei</i> | SEL | S | Asteraceae | 0 | 1 |
| <i>Senecio magellanicum</i> | SMA | S | Asteraceae | 4 | 0 |
| <i>Senecio miser</i> | SEM | S | Asteraceae | 0 | 1 |
| <i>Silene magellanica</i> | SIL | H | Caryophyllaceae | 1 | 1 |
| <i>Stipa chrysophylla</i> | STC | C | Poaceae | 6 | 5 |
| <i>Stipa ibari</i> | STI | P | Poaceae | 6 | 7 |
| <i>Stipa neaei</i> | STN | C | Poaceae | 0 | 3 |
| <i>Stipa psylantha</i> | STP | C | Poaceae | 0 | 2 |
| <i>Stipa speciosa</i> | STS | C | Poaceae | 0 | 1 |
| <i>Trisetum cumingii</i> | TRC | P | Poaceae | 4 | 3 |
| <i>Verbena odonelli</i> | VER | S | Verbenaceae | 8 | 2 |
| <i>Verbena sp</i> | VEC | S | Verbenaceae | 0 | 1 |
| <i>Vicia bijuga</i> | VBI | H | Fabaceae | 1 | 1 |
| <i>Vicia sp</i> | VIC | H | Fabaceae | 0 | 1 |
| <i>Viola maculata</i> | VIO | H | violaceae | 2 | 0 |

Tabla 2. Tabla fitosociológica de los censos realizados por sitios. Los valores corresponden a las clases de cobertura de acuerdo a Braun Blanquet, donde 3=25-50%, 2= 5- 25, 1= 5- 25 y += >1 %.
Los recuadros corresponden a las especies diferenciales entre EMS y MMN.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|-----|
| FEM | 1 | 1 | 1 | 1 | + | + | 1 | 1 | 1 | + | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 100 |
| CEA | 1 | 1 | 1 | 1 | + | 1 | 1 | 2 | 1 | + | 1 | + | + | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 100 |
| BRS | + | + | 1 | + | + | 1 | + | 1 | 1 | + | + | 1 | + | 1 | 1 | 1 | 1 | + | 94 | |
| COS | | + | + | + | 1 | + | 1 | 1 | + | 1 | + | + | + | + | | + | + | + | 89 | |
| SAD | + | | 1 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | + | 1 | + | 1 | + | 1 | 1 | + | 83 | |
| NAB | 2 | 2 | 2 | 1 | | + | | + | + | 2 | | 1 | 1 | + | | | | + | 72 | |
| LIQ | 2 | 2 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | + | | + | + | + | 1 | | | 72 | |
| STI | + | | | | 2 | + | | + | | 1 | 2 | + | + | + | + | + | + | 1 | 72 | |
| CAR | | | | | | 2 | + | | 1 | | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 67 | |
| STC | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | + | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 67 | |
| PLG | | | | | | | | + | 1 | + | + | 1 | 1 | 1 | 1 | + | + | 1 | 67 | |
| ADL | + | + | 1 | + | + | | | + | + | + | | + | + | | + | | | | 61 | |
| MUS | | | | + | + | + | | | | | + | + | + | 1 | + | | | | 44 | |
| RYV | 1 | + | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | + | 1 | 1 | | | | + | | + | + | | 78 | |
| CAA | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | + | 2 | 1 | 2 | 2 | + | | | + | | + | 1 | | 78 | |
| VER | 1 | | + | | 1 | 1 | 2 | | + | + | 1 | | | + | | | 1 | | 56 | |
| EPF | | 1 | | | | + | + | + | + | + | + | + | + | | | + | + | | 56 | |
| FEG | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | | + | | | | | | 67 | |
| ACP | + | + | + | + | + | + | 1 | 1 | + | 1 | 1 | | | | + | | | | 67 | |
| PER | + | | | 1 | | + | + | + | + | + | | | + | | | | | | 50 | |
| SMA | | + | | | + | + | | | | | + | | | | | | | | 22 | |
| AGS | | 1 | | 1 | + | | | | | | | | | | | | | | 17 | |
| DEF | | 1 | 1 | + | | | | | | | | | | | | | | | 17 | |
| HYP | | | + | + | + | | | + | + | | | | | | | | | | 28 | |
| CAU | + | | + | | | | | + | + | | | | | | | | | | 22 | |
| VIO | | | + | | + | | | | | | | | | | | | | | 11 | |
| IND | | | | | | | | + | | + | | | | | | | | | 11 | |
| AZM | | | | | | | | + | | + | | | | | | | | | 11 | |
| EUP | | + | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | 11 | |
| AND | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 11 | |
| GAL | | | | | | + | 1 | | | + | | | | | | | | | 17 | |
| JUT | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 39 | |
| POL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 28 | |
| STN | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 17 | |
| NAU | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 17 | |
| STM | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 17 | |
| COJ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 11 | |
| STP | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 11 | |
| NAD | | + | | + | | | | 1 | 1 | | | | | + | + | + | | | 39 | |
| TRC | + | 1 | | | | | | + | + | | | | | + | + | + | | | 39 | |
| HOC | | | | | 1 | | | + | + | + | | | | | | | | | 28 | |
| ARM | + | 1 | + | | | | | | | | + | | | | | | | + | 28 | |
| LUC | | 1 | 1 | | | | | | | + | | | | + | | | | | 22 | |
| ARJ | | + | | | | | | | | | | | | | + | | 1 | + | 22 | |
| BRB | | | | | | | | 1 | | | | | | | 1 | + | | | 17 | |
| VBI | + | | | | | | | | | | | + | | | | | | | 11 | |
| PEL | | | | | | | | | | | + | | | + | | | | | 11 | |
| CAL | | | | + | | | | | | | | | | | | | | + | 11 | |
| SIL | | + | | | | | | | | | | | | | | + | | | 11 | |
| ACA | | | | | | | | | + | | | | | | | | | | 6 | |
| ACsp | | | | | | | | | | | | | | + | | | | | 6 | |
| AGP | | | | | | | | | | | | + | | | | | | | 6 | |
| BRA | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | 6 | |
| FEP | | | | | | | | | | | | | | | | + | | | 6 | |
| HUA | | | | | | | | | | | | | + | | | | | | 6 | |
| LEG | | | | | | | | | | | | | | + | | | | | 6 | |
| LEU | | | | | | | | | | | | | | + | | | | | 6 | |
| MUM | | + | | | | | | | | | | | | | | | | | 6 | |
| MUL | | | | | | | | | | | | | | | + | | | | 6 | |
| NAA | | | | | | | | | | | | | | + | | | | | 6 | |
| OXE | | | | | | | | | + | | | | | | | | | | 6 | |
| SEL | | | | | | | | | | | | | | | | | | + | 6 | |
| SEM | | | | | | | | | | | | | + | | | | | | 6 | |
| STS | | | | | | | | | | | | | | | | | | + | 6 | |
| VEC | | | | | | | | | | | | | | | 2 | | | | 6 | |
| VIC | | | | | | | | | | | | | | | + | | | | 6 | |

Tabla 3. Varianza y eigenvectors del Análisis de Componentes Principales (Salida de PC-Ord) para EMS.

| VARIANCE EXTRACTED, FIRST 10 AXES | | | | |
|-----------------------------------|------------|---------------|---------------|------------|
| Broken-stick | | | | |
| AXIS | Eigenvalue | % of Variance | Cum.% of Var. | Eigenvalue |
| 1 | 0.091 | 36.341 | 36.341 | 0.028 |
| 2 | 0.061 | 24.315 | 60.657 | 0.022 |
| 3 | 0.037 | 14.891 | 75.548 | 0.018 |
| 4 | 0.027 | 10.906 | 86.454 | 0.016 |
| 5 | 0.014 | 5.632 | 92.086 | 0.014 |
| 6 | 0.008 | 3.335 | 95.422 | 0.013 |
| 7 | 0.005 | 1.872 | 97.294 | 0.012 |
| 8 | 0.004 | 1.691 | 98.985 | 0.011 |
| 9 | 0.002 | 0.691 | 99.676 | 0.010 |
| 10 | 0.001 | 0.324 | 100.000 | 0.009 |

FIRST 6 EIGENVECTORS

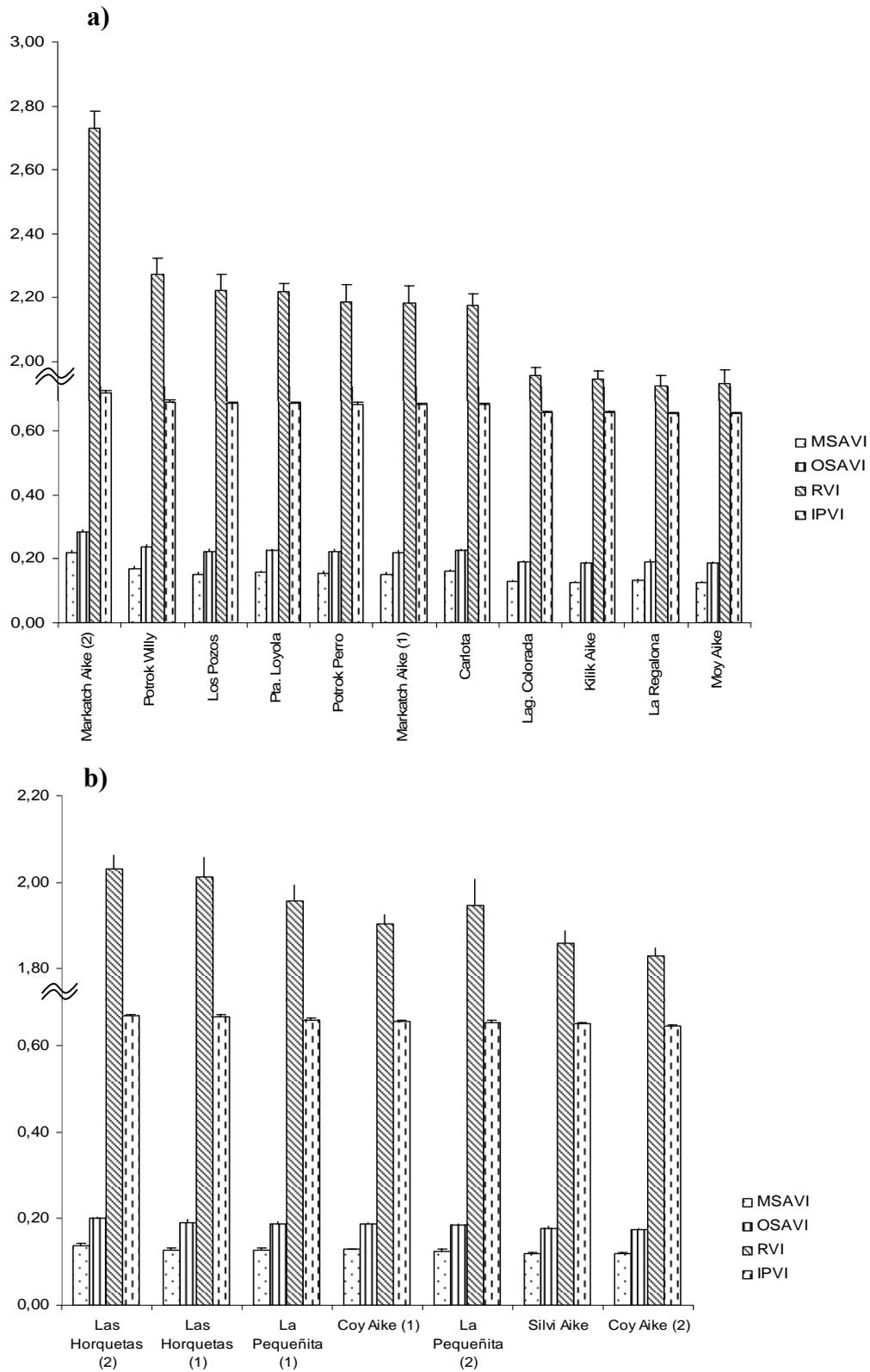
| variable | Eigenvector | | | | | |
|----------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| ACP | 0.0141 | -0.0005 | 0.0204 | 0.0547 | 0.0299 | -0.0213 |
| ADL | -0.0302 | 0.0025 | -0.0082 | -0.0129 | 0.0042 | -0.0231 |
| AGS | -0.0317 | -0.0107 | 0.0514 | -0.0285 | -0.0199 | -0.0588 |
| ARM | -0.0167 | 0.0007 | 0.0296 | -0.0218 | 0.0151 | -0.0381 |
| AZF | -0.0115 | 0.0056 | -0.0092 | 0.0262 | -0.0367 | 0.1112 |
| AZM | 0.0041 | -0.0025 | -0.0129 | 0.0125 | 0.0235 | 0.0266 |
| BRS | 0.0076 | -0.0634 | -0.0150 | 0.0740 | 0.0387 | -0.0369 |
| CAU | -0.0027 | 0.0009 | -0.0043 | 0.0226 | 0.0222 | -0.0335 |
| CAA | -0.0340 | 0.3639 | -0.6225 | -0.2650 | 0.4765 | -0.0994 |
| CAR | 0.1698 | -0.1062 | 0.1269 | -0.0356 | -0.0268 | 0.1345 |
| CEA | -0.0246 | 0.0051 | 0.0632 | 0.5030 | 0.0471 | -0.6643 |
| COS | 0.0392 | -0.0030 | -0.1109 | 0.0425 | 0.0564 | -0.0252 |
| DEF | -0.0402 | -0.0093 | 0.0536 | -0.0336 | 0.0116 | -0.0845 |
| EPF | 0.0028 | -0.0154 | 0.0543 | 0.0053 | 0.0255 | -0.0816 |
| EUP | -0.0029 | 0.0035 | 0.0005 | 0.0151 | 0.0086 | 0.0318 |
| FEG | -0.8466 | -0.1357 | -0.0955 | -0.2621 | -0.1897 | -0.0845 |
| FEM | -0.1196 | -0.0197 | 0.0651 | 0.0245 | -0.1744 | -0.0510 |
| GAL | 0.0097 | -0.0108 | -0.0233 | 0.0171 | 0.0370 | 0.0489 |
| HOC | 0.0121 | 0.0225 | -0.0454 | -0.0093 | -0.0333 | -0.0616 |
| HYP | -0.0032 | 0.0014 | -0.0176 | -0.0025 | -0.0084 | -0.0206 |
| LIQ | -0.0619 | 0.0405 | 0.1972 | -0.1088 | 0.2497 | -0.3571 |
| LUC | -0.0460 | -0.0077 | 0.0472 | -0.0352 | 0.0143 | -0.0832 |
| MUS | 0.0035 | 0.0112 | -0.0092 | -0.0257 | -0.0540 | -0.0120 |
| NAB | -0.0266 | 0.2023 | 0.6560 | -0.4636 | 0.3299 | -0.0687 |
| NAD | -0.0083 | 0.0058 | 0.0089 | 0.0639 | -0.0003 | -0.0442 |
| PER | -0.0338 | -0.0262 | 0.0043 | 0.0065 | -0.1104 | 0.1013 |
| POD | 0.2411 | -0.8078 | -0.1472 | -0.3625 | 0.0610 | -0.2676 |
| PLG | 0.0046 | 0.0084 | -0.0012 | 0.0750 | 0.0096 | -0.0434 |
| RYV | -0.0726 | -0.0142 | -0.1165 | -0.1106 | -0.2095 | 0.1101 |
| SAD | -0.0237 | 0.0466 | -0.0437 | 0.1731 | 0.0048 | -0.1253 |
| SMA | -0.0025 | 0.0012 | 0.0096 | -0.0105 | -0.0211 | -0.0060 |
| STC | 0.1588 | 0.0137 | 0.0841 | -0.0041 | -0.0876 | 0.2646 |
| STI | 0.3445 | 0.3565 | -0.1196 | -0.4199 | -0.5789 | -0.3829 |
| TRC | -0.0151 | 0.0026 | 0.0267 | -0.0049 | 0.0500 | -0.0111 |
| VER | 0.1279 | -0.0807 | -0.1501 | -0.0530 | 0.3340 | 0.0869 |
| VIO | -0.0016 | 0.0026 | -0.0062 | -0.0069 | -0.0070 | -0.0097 |
| IND | 0.0014 | -0.0005 | -0.0048 | 0.0054 | 0.0082 | 0.0117 |

Tabla 4. Varianza y eigenvectors del Análisis de Componentes Principales (Salida de PC-Ord) para EMS

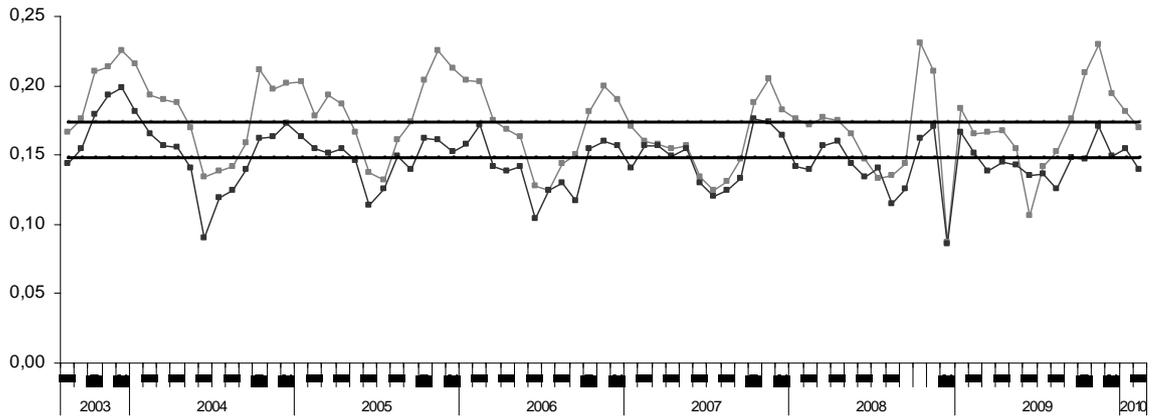
| <u>VARIANCE EXTRACTED, FIRST 10 AXES</u> | | | | | |
|--|-------------------|----------------------|----------------------|-------------------|--|
| Broken-stick | | | | | |
| <u>AXIS</u> | <u>Eigenvalue</u> | <u>% of Variance</u> | <u>Cum.% of Var.</u> | <u>Eigenvalue</u> | |
| 1 | 0.054 | 72.714 | 72.714 | 0.009 | |
| 2 | 0.008 | 10.480 | 83.194 | 0.007 | |
| 3 | 0.005 | 6.853 | 90.047 | 0.006 | |
| 4 | 0.003 | 3.596 | 93.643 | 0.005 | |
| 5 | 0.003 | 3.365 | 97.009 | 0.005 | |
| 6 | 0.002 | 2.991 | 100.000 | 0.004 | |
| 7 | 0.000 | 0.000 | 100.000 | 0.004 | |
| 8 | 0.000 | 0.000 | 100.000 | 0.003 | |
| 9 | 0.000 | 0.000 | 100.000 | 0.003 | |
| 10 | 0.000 | 0.000 | 100.000 | 0.003 | |

| <u>FIRST 6 EIGENVECTORS</u> | | | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <u>Eigenvector</u> | | | | | | |
| <u>variable</u> | <u>1</u> | <u>2</u> | <u>3</u> | <u>4</u> | <u>5</u> | <u>6</u> |
| ADL | -0.0026 | 0.0138 | 0.0582 | -0.0233 | -0.0595 | 0.0118 |
| ARJ | -0.0217 | -0.0139 | 0.0398 | -0.0022 | 0.0593 | -0.1332 |
| AZF | 0.0131 | -0.0613 | -0.0781 | -0.0832 | -0.0181 | 0.0329 |
| BRB | -0.0292 | 0.0094 | 0.1619 | -0.2292 | -0.1773 | 0.0424 |
| BRS | -0.0253 | -0.0137 | 0.1117 | -0.1059 | -0.3621 | 0.1859 |
| CAA | -0.0143 | -0.0374 | -0.0687 | -0.0440 | 0.0567 | -0.2346 |
| CAR | -0.0693 | -0.1146 | -0.3689 | 0.0268 | 0.4234 | -0.0694 |
| CEA | -0.0586 | -0.1581 | 0.1144 | -0.2927 | 0.0738 | -0.1093 |
| COJ | 0.3448 | 0.6392 | 0.3651 | 0.1649 | 0.2838 | -0.2795 |
| COS | 0.0044 | -0.0345 | -0.0937 | -0.0547 | 0.0111 | -0.0623 |
| EPF | 0.0129 | 0.0316 | -0.0196 | -0.0002 | 0.0026 | -0.0865 |
| FEM | -0.0022 | -0.0530 | 0.3510 | -0.2803 | -0.1628 | -0.1975 |
| JUT | -0.8907 | 0.3100 | 0.0277 | 0.1765 | -0.0572 | -0.0669 |
| JUM | 0.0594 | 0.1406 | 0.0338 | 0.3348 | -0.2065 | -0.0189 |
| LIQ | -0.0243 | -0.0853 | -0.0497 | -0.0501 | 0.0583 | -0.3331 |
| MUS | 0.0320 | -0.1256 | 0.0434 | 0.0202 | -0.0140 | 0.1105 |
| NAB | 0.0578 | -0.1706 | 0.0815 | -0.0399 | 0.1112 | 0.1994 |
| NAD | -0.0105 | -0.0005 | 0.0366 | -0.0663 | -0.0399 | -0.0232 |
| NAU | 0.0082 | -0.3066 | 0.0010 | 0.2040 | 0.1351 | -0.2322 |
| PER | 0.0055 | 0.0127 | 0.0034 | 0.0280 | -0.0166 | -0.0020 |
| POD | 0.1717 | 0.4139 | -0.6807 | -0.2083 | -0.2539 | -0.0154 |
| POL | -0.0199 | -0.0044 | 0.1053 | -0.0259 | -0.1347 | 0.0740 |
| PLG | 0.0350 | -0.0790 | 0.0226 | 0.1215 | 0.1041 | 0.1865 |
| RYV | 0.0022 | -0.0562 | -0.0741 | -0.0665 | 0.0155 | -0.0782 |
| SAD | -0.0221 | -0.2019 | -0.1521 | 0.3571 | -0.0989 | -0.2983 |
| STC | -0.1113 | 0.0642 | 0.0821 | -0.2119 | 0.1172 | -0.0333 |
| STI | -0.0746 | 0.1340 | 0.0082 | 0.0396 | 0.4948 | 0.5073 |
| STN | -0.0056 | 0.0098 | -0.0607 | -0.0520 | 0.0050 | -0.0233 |
| STP | 0.0258 | -0.1502 | -0.0032 | 0.0254 | 0.0245 | 0.1085 |
| STM | 0.1332 | -0.0691 | 0.0425 | 0.5393 | -0.2609 | 0.1711 |
| TRC | -0.0049 | 0.0012 | -0.0194 | -0.0528 | -0.0215 | -0.0366 |
| VER | -0.0165 | -0.0959 | 0.0134 | 0.0547 | 0.1478 | -0.2918 |

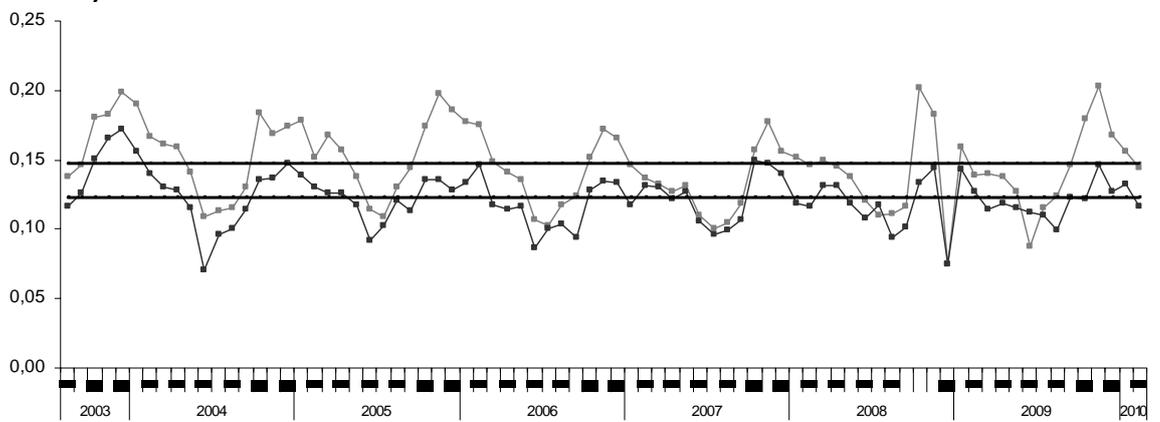
Figura 1. Variación dentro de cada área ecológica del promedio anual de los índices de vegetación en a) EMS y en b) MMN. Las barras verticales corresponden a un error estándar.



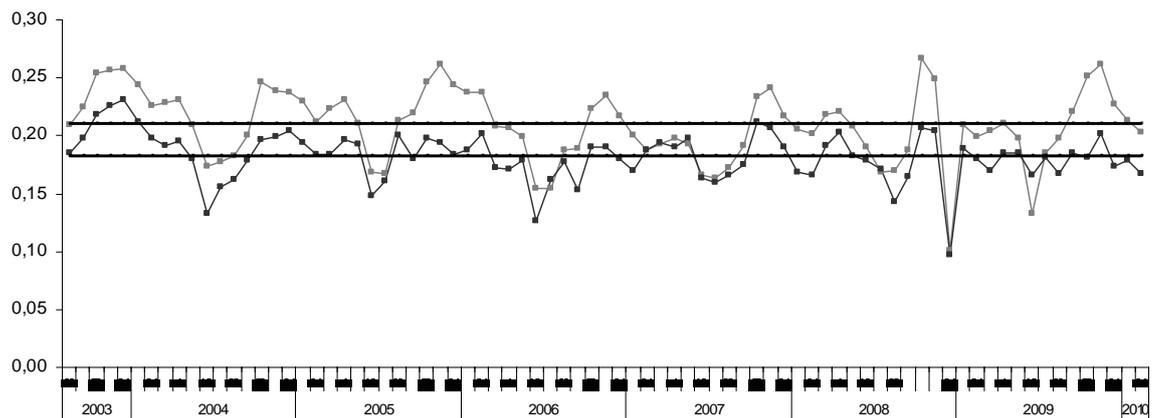
a) SAVI



b) MSAVI



c) OSAVI



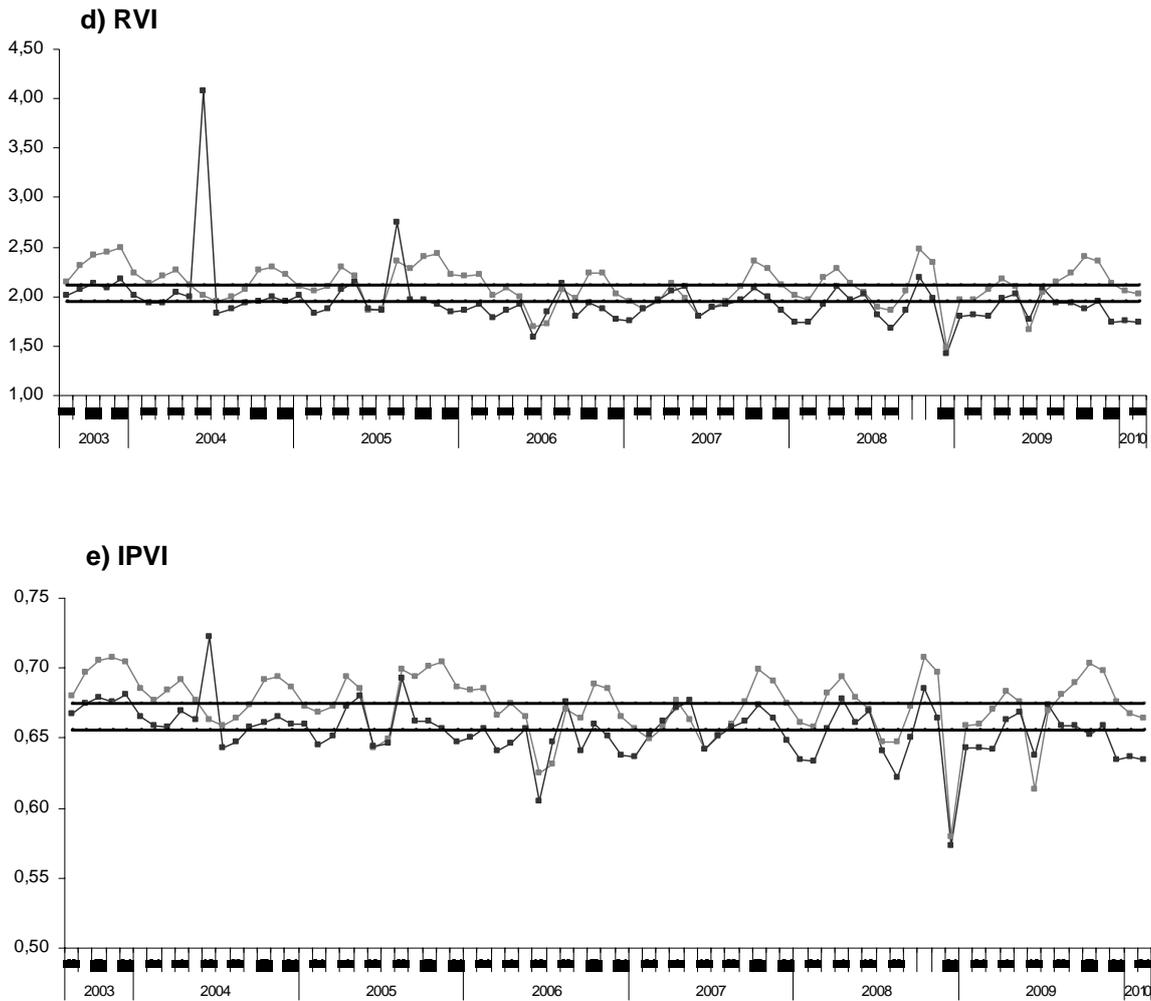


Figura 2. Serie temporal de valores promedio mensuales de a) SAVI, b) MSAVI, c) OSAVI, d) RVI y e) IPVI, para las temporadas de crecimiento analizadas. La línea de color gris corresponde a EMS y la negra a MMN. La línea horizontal representa la integral promedio general para cada área ecológica.

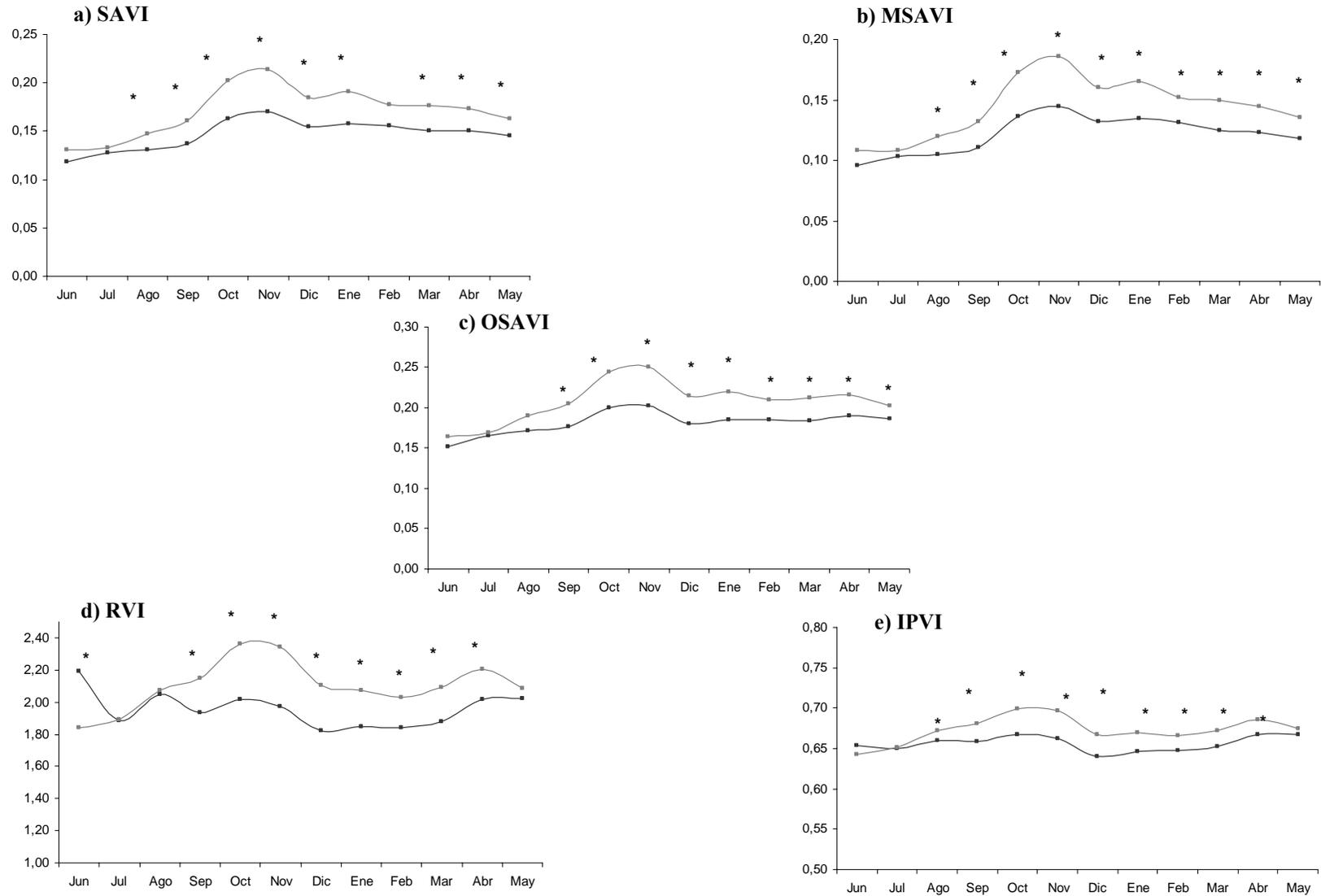


Figura 3. Evolución anual de los índices de vegetación a) SAVI, b) MSAVI, c) OSAVI, d) RVI y e) IPVI, para EMS (gris) y MMN (negro). Asteriscos indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tipos de vegetación. En gris, valores correspondientes a la Estepa Magallánica. En negro, los de el Matorral de Mata Negra.

Tabla 5. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de vegetación e información espectral (bandas e índices calculados) al analizar EMS y MMN en conjunto.

| Atributo | | RVI | SAVI | MSAVI | OSAVI | IPVI | NDWI | RED | NIR | BLUE | MIR | I-NDVI | I-EVI | |
|-----------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| cobertura | Vegetal | 0,276 | 0,149 | 0,134 | 0,194 | 0,248 | 0,243 | -0,25 | -0,11 | -0,11 | -0,31 | 0,057 | -0 | |
| | Mantillo | 0,087 | 0,083 | 0,075 | 0,096 | 0,1 | 0,084 | -0,11 | -0,04 | -0,19 | -0,09 | 0,131 | 0,1 | |
| | Suelo desnudo | -0,45 | -0,32 | -0,292 | -0,372 | -0,43 | -0,41 | 0,383 | 0,105 | 0,301 | 0,439 | -0,291 | -0,22 | |
| | Intercoironal | 0,473 | 0,539 | 0,533 | 0,531 | 0,488 | 0,256 | -0,18 | 0,256 | -0,24 | -0,01 | 0,381 | 0,365 | |
| | Coironal | 0,619 | 0,68 | 0,675 | 0,671 | 0,618 | 0,446 | -0,23 | 0,327 | -0,19 | -0,1 | 0,57 | 0,503 | |
| | Subarbustivo | NN | NN | NN | NN | NN | NN | NN | NN | NN | NN | NN | NN | NN |
| Biomasa | Intercoironal | Verde | 0,288 | 0,026 | -0,009 | 0,128 | 0,261 | 0,085 | -0,49 | -0,37 | -0,46 | -0,38 | 0,075 | 0,021 |
| | | Seco | 0,096 | -0,05 | -0,069 | 0,002 | 0,074 | -0 | -0,22 | -0,21 | -0,16 | -0,17 | 0,034 | -0,01 |
| | | Total | 0,191 | -0,02 | -0,045 | 0,06 | 0,164 | 0,042 | -0,35 | -0,3 | -0,3 | -0,28 | 0,052 | 0,001 |
| | Coironal | Verde | nn | nn | nn | nn | nn | nn | nn | nn | nn | nn | nn | nn |
| | | Seco | 0,515 | 0,558 | 0,545 | 0,566 | 0,526 | 0,267 | -0,14 | 0,29 | -0,08 | 0,047 | 0,431 | 0,466 |
| | | Total | 0,537 | 0,581 | 0,568 | 0,589 | 0,549 | 0,277 | -0,15 | 0,302 | -0,09 | 0,051 | 0,459 | 0,488 |
| | Subarbustivo | Verde | 0,34 | 0,247 | 0,225 | 0,298 | 0,35 | 0,398 | -0,29 | -0,05 | -0,31 | -0,36 | 0,445 | 0,462 |
| | | Seco | 0,241 | 0,192 | 0,178 | 0,224 | 0,255 | 0,386 | -0,2 | -0,01 | -0,27 | -0,32 | 0,4 | 0,427 |
| | | Total | 0,288 | 0,221 | 0,204 | 0,261 | 0,301 | 0,4 | -0,24 | -0,02 | -0,29 | -0,34 | 0,429 | 0,451 |

Valores en negritas corresponden a correlaciones significativas.

RED= Rojo, NIR= Infrarrojo cercano, BLUE= Azul, MIR= Infrarrojo medio. El prefijo "I" indica integral.

Tabla 6. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de vegetación e información espectral obtenida de imágenes MODIS para Estepa Magallánica Seca.

| Atributo | | RVI | SAVI | MSAVI | OSAVI | IPVI | NDWI | RED | NIR | BLUE | MIR | I-NDVI | I-EVI | |
|-----------|---|--------------|--------------|-------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| cobertura | Vegetal | 0,515 | 0,341 | 0,306 | 0,425 | 0,507 | 0,415 | -0,54 | -0,236 | -0,409 | -0,55 | 0,157 | 0,12 | |
| | Mantillo | -0,03 | -0,08 | -0,087 | -0,052 | 0,024 | 0,03 | -0,027 | -0,094 | -0,081 | -0,062 | 0,006 | -0,11 | |
| | Suelo desnudo | -0,55 | -0,37 | -0,328 | -0,462 | -0,55 | -0,5 | 0,561 | 0,244 | 0,471 | 0,614 | -0,286 | -0,2 | |
| | Intercoironal | 0,045 | -0,06 | -0,057 | -0,053 | 0,043 | -0,048 | -0,036 | -0,07 | -0,095 | -0,042 | -0,192 | -0,15 | |
| | Coironal | 0,516 | 0,43 | 0,411 | 0,474 | 0,505 | 0,465 | -0,372 | -0,014 | -0,229 | -0,412 | 0,345 | 0,288 | |
| | Subarbustivo | 0,14 | -0,01 | -0,041 | 0,073 | 0,165 | 0,074 | -0,334 | -0,321 | -0,264 | -0,308 | 0,09 | 0,025 | |
| Biomasa | Intercoironal | Verde | 0,465 | 0,278 | 0,246 | 0,361 | 0,433 | 0,346 | -0,408 | -0,171 | -0,391 | -0,42 | 0,148 | 0,079 |
| | | Seco | 0,035 | -0,13 | -0,148 | -0,078 | 0,002 | 0,142 | -0,152 | -0,227 | -0,126 | -0,292 | -0,087 | -0,17 |
| | | Total | 0,229 | 0,035 | 0,011 | 0,109 | 0,193 | 0,247 | -0,281 | -0,226 | -0,256 | -0,378 | 0,008 | -0,07 |
| | Coirón | Verde | 0,483 | 0,397 | 0,369 | 0,453 | 0,475 | 0,299 | -0,32 | -0,019 | -0,34 | -0,228 | 0,172 | 0,129 |
| | | Seco | 0,443 | 0,325 | 0,291 | 0,396 | 0,44 | 0,21 | -0,365 | -0,108 | -0,308 | -0,239 | 0,087 | 0,092 |
| | | Total | 0,506 | 0,43 | 0,4 | 0,481 | 0,496 | 0,323 | -0,334 | -0,01 | -0,294 | -0,249 | 0,115 | 0,095 |
| | Subarbustivo | Verde | 0,247 | 0,121 | 0,092 | 0,188 | 0,256 | 0,275 | -0,279 | -0,166 | -0,194 | -0,35 | 0,374 | 0,44 |
| | | Seco | 0,225 | 0,178 | 0,159 | 0,215 | 0,245 | 0,322 | -0,186 | -0,043 | -0,149 | -0,292 | 0,49 | 0,55 |
| | | Total | 0,244 | 0,169 | 0,146 | 0,217 | 0,26 | 0,315 | -0,224 | -0,083 | -0,164 | -0,318 | 0,463 | 0,53 |
| | Biomasa total (suma de todas las formas de vida) | Verde | 0,693 | 0,46 | 0,402 | 0,583 | 0,686 | 0,537 | -0,61 | -0,229 | -0,54 | -0,6 | 0,476 | 0,49 |
| | | Seco | 0,734 | 0,54 | 0,488 | 0,647 | 0,721 | 0,634 | -0,57 | -0,145 | -0,48 | -0,61 | 0,41 | 0,407 |
| | | Total | 0,744 | 0,52 | 0,469 | 0,643 | 0,732 | 0,616 | -0,61 | -0,186 | -0,52 | -0,63 | 0,453 | 0,46 |

Valores en negritas corresponden a correlaciones significativas.
 RED= Rojo, NIR= Infrarrojo cercano, BLUE= Azul, MIR= Infrarrojo medio. El prefijo "I" indica integral.

Tabla 7. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables de vegetación e información espectral obtenida de imágenes MODIS para Matorral de Mata Negra.

| Atributo | | NDVI | RVI | IPVI | NDWI | RED | NIR | BLUE | MIR | I-EVI | |
|-----------|--|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------|
| cobertura | Vegetal | -0,172 | -0,14 | -0,172 | -0,087 | 0,25 | 0,183 | 0,323 | 0,213 | -0,283 | |
| | Mantillo | 0,033 | 0,008 | 0,033 | 0,011 | -0,152 | -0,135 | -0,244 | -0,136 | 0,261 | |
| | Suelo desnudo | 0,114 | 0,092 | 0,114 | 0,08 | -0,098 | -0,05 | -0,075 | -0,073 | -0,03 | |
| | Intercoironal | 0,277 | 0,272 | 0,277 | -0,064 | -0,179 | -0,094 | -0,235 | -0,022 | 0,067 | |
| | Coironal | -0,345 | -0,35 | -0,345 | -0,123 | 0,237 | 0,144 | 0,292 | 0,215 | -0,263 | |
| | Subarbustivo | 0,657 | 0,653 | 0,657 | 0,536 | -0,707 | -0,607 | -0,824 | -0,871 | 0,631 | |
| | Arbustivo | -0,095 | -0,08 | -0,095 | -0,115 | 0,149 | 0,118 | 0,273 | 0,178 | -0,065 | |
| Biomasa | Intercoironal | Verde | 0,189 | 0,202 | 0,189 | -0,289 | -0,455 | -0,472 | -0,395 | -0,091 | 0,062 |
| | | Seco | -0,215 | -0,23 | -0,215 | -0,525 | -0,081 | -0,296 | -0,092 | 0,223 | -0,067 |
| | | Total | -0,059 | -0,07 | -0,059 | -0,464 | -0,244 | -0,389 | -0,226 | 0,109 | -0,003 |
| | Coironal | Verde | 0,25 | 0,205 | 0,25 | 0,051 | -0,473 | -0,459 | -0,462 | -0,339 | -0,309 |
| | | Seco | -0,089 | -0,13 | -0,089 | 0,044 | -0,313 | -0,532 | -0,4 | -0,365 | -0,4 |
| | | Total | -0,025 | -0,07 | -0,025 | 0,046 | -0,349 | -0,526 | -0,417 | -0,366 | -0,388 |
| | Subarbustivo | Verde | 0,233 | 0,229 | 0,233 | 0,555 | -0,397 | -0,344 | -0,627 | -0,652 | 0,133 |
| | | Seco | 0,077 | 0,067 | 0,077 | 0,406 | -0,279 | -0,301 | -0,527 | -0,518 | 0,093 |
| | | Total | 0,134 | 0,127 | 0,134 | 0,429 | -0,35 | -0,352 | -0,592 | -0,578 | 0,144 |
| | Arbustivo | Verde | 0,242 | 0,28 | 0,242 | 0,167 | -0,367 | -0,297 | -0,346 | -0,368 | 0,149 |
| | | Seco | 0,247 | 0,293 | 0,247 | 0,264 | -0,457 | -0,424 | -0,48 | -0,516 | 0,244 |
| | | Total | 0,251 | 0,296 | 0,251 | 0,237 | -0,438 | -0,391 | -0,446 | -0,478 | 0,217 |
| | Biomasa total (suma de todas las formas de vida) | Verde | 0,277 | 0,312 | 0,277 | 0,204 | -0,473 | -0,418 | -0,47 | -0,47 | 0,148 |
| | | Seco | 0,255 | 0,3 | 0,255 | 0,326 | -0,513 | -0,5 | -0,575 | -0,603 | 0,24 |
| | | Total | 0,267 | 0,309 | 0,267 | 0,29 | -0,509 | -0,481 | -0,549 | -0,568 | 0,213 |

Valores en negritas corresponden a correlaciones significativas.

RED= Rojo, NIR= Infrarrojo cercano, BLUE= Azul, MIR= Infrarrojo medio. El prefijo "I" indica integral.

Las variables espectrales no mostradas no presentaron correlaciones significativas. Los índices o bandas no mostradas en esta tabla no correlacionaron con ninguna de las variables medidas a campo.