

Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria en recursos forrajeros del este de Uruguay

Baeza Santiago ¹, Paruelo José ², Ayala Walter ³

¹Unidad de Sistemas Ambientales, Facultad de Agronomía, UdelaR Av. Garzón 780, Montevideo, Uruguay. C.P.:12900. Correo electrónico: santiago.baeza@gmail.com

²Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección, IFEVA- Facultad de Agronomía, UBA- CONICET.

³Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Estación Experimental Treinta y Tres.

Recibido: 7/2/11 Aceptado: 2/8/11

Resumen

La productividad primaria neta aérea (PPNA) es uno de los atributos ecosistémicos más importantes, siendo el principal control de la carga ganadera en pastizales. Tradicionalmente se ha estimado a partir de cortes periódicos de biomasa. La información espectral permite estimar la PPNA a bajo costo y en tiempo real sobre áreas extensas. Para ello se requiere la calibración de modelos que relacionen información espectral con la PPNA estimada mediante cortes de biomasa a campo, cuantificando un factor clave en esta relación: la eficiencia de conversión de la radiación en biomasa (Eficiencia en el Uso de la Radiación: EUR). En este trabajo combinamos datos de PPNA estimada a campo, con datos obtenidos de imágenes de satélite y estaciones meteorológicas, para estimar EUR y generar modelos de estimación de la PPNA en tiempo real en pastizales naturales con y sin siembras en cobertura de leguminosas, en la región de Sierras y Lomadas del Este. La EUR para pastizales naturales fue de 0,24 g MS/MJ (Materia Seca/Mega Joules), mientras que en los sitios intersembrados la EUR fue aproximadamente el doble, dependiendo del sistema analizado. Los modelos para estimar PPNA explicaron el 70 y 58% de la varianza de los datos ($p < 0,001$), con r^2 de predicción de 0,67 y 0,55 ($p < 0,001$), para pastizales naturales e intersiembras respectivamente.

Palabras clave: teledetección, Uruguay, pastizales

Summary

Efficiency in the Use of Radiation and Primary Productivity on Forage Resources in Eastern Uruguay

Aboveground Net Primary Productivity (ANPP) is one of the most important ecosystem attributes, and the main control of stock density on grasslands. Traditionally it has been estimated from based on periodical biomass harvest. Spectral information allows estimating ANPP at low cost and in real time over large areas. This requires the calibration of models that relate spectral information and field estimates of ANPP, quantifying a key factor in this relationship: the conversion efficiency of radiation into biomass (Radiation Use Efficiency: RUE). In this work, we combined field ANPP estimates with data from satellite imagery and weather stations to estimate EUR and generate models to estimate ANPP in real time in natural grasslands with and without legumes overseeding, of the «Sierras y Lomadas del Este» region. RUE was 0.24 g MS/MJ for natural grassland, while sowed grassland EUR was approximately twice, depending on the system analyzed. ANPP models explained 70 and 58% of the variance of the data ($p < 0.001$), with prediction r^2 of 0.67 and 0.55 ($p < 0.001$), to natural grasslands with and without legumes overseeding, respectively.

Key words: remote sensing, Uruguay, grasslands

Introducción

La productividad primaria neta aérea (PPNA) (tasa de acumulación de biomasa por unidad de superficie) es uno de los atributos ecosistémicos más importantes ya que determina la cantidad de energía disponible para los niveles tróficos subsiguientes (McNaughton *et al.*, 1989). En pastizales, la PPNA es el principal determinante de la carga animal (Oesterheld *et al.*, 1998). El 83% del territorio uruguayo está cubierto por pasturas permanentes dedicadas a la ganadería (135 millones de ha), la mayor parte por pastizales naturales (DIEA, 2000). Parte de estos pastizales han sido sembrados en cobertura con especies forrajeras, generalmente leguminosas, práctica comúnmente conocida como mejoramientos (de aquí en más «mejoramientos»). La biomasa de forraje generada en estos sistemas es la base de una de las principales actividades económicas del país, la ganadería.

LA PPNA presenta generalmente grandes variaciones estacionales, difíciles de monitorear debido a dificultades metodológicas (Sala *et al.*, 1988; Scurlock *et al.*, 2002). Los métodos tradicionales de estimación de la PPNA se basan en cortes de biomasa. Este proceso es costoso en tiempo y esfuerzo; además, sus resultados responden a situaciones particulares del sitio estudiado, por lo que dificulta las extrapolaciones de carácter regional. La falta de disponibilidad de datos sobre la cantidad de forraje y la enorme variabilidad espacial y temporal (tanto estacional como entre años) encontrada en las mediciones realizadas, ha sido reconocida como uno de los factores que más afecta la eficiencia de los establecimientos ganaderos (Golluscio *et al.*, 1998). Esta alta variabilidad provoca muchas veces una subutilización del recurso forraje, o situaciones de sobreexplotación con el consecuente deterioro del recurso forrajero y edáfico. La investigación sobre pastizales en Uruguay ha estado enfocada a la descripción de la producción primaria, su variación entre y dentro de años, lo cual ha permitido hipotetizar, a partir de cálculos empíricos, sobre la capacidad de carga de ganado con criterio sustentable en el largo plazo (Bermúdez y Ayala, 2005; Berretta y Bemhaja, 1998; Risso, 1998; Soca *et al.*, 2002; Altésor *et al.*, 2005). Sin embargo las dificultades para extrapolar regio-

nalmente los resultados puntuales limitan la capacidad de generar estimaciones de carga a nivel predial.

La información espectral provista por sensores a bordo de satélites, con baja y media resolución espacial, tiene el potencial de ser usada para estimar la PPNA a bajo costo y en tiempo real, sobre grandes extensiones de territorio. Esta estimación se basa en índices espectrales que captan el desempeño fotosintético de la vegetación. El más usado de estos índices es el Índice de Vegetación Normalizado (IVN), calculado a partir de la reflectancia en las porciones roja (R) e infrarroja (IR) del espectro electromagnético ($IVN = (IR-R)/(IR+R)$). La reflectancia en el R se relaciona con la absorción por parte de pigmentos fotosintéticos y la del IR con la estructura foliar. El IVN presenta una relación estrecha y positiva con la fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (fRFAA) por la vegetación verde y por tanto con la productividad (Baret y Guyot, 1991; Paruelo *et al.*, 1997, Gower *et al.*, 1999; Piñeiro *et al.*, 2006). Otro índice de vegetación comúnmente usado, fundamentalmente en los últimos años, es el Índice de Vegetación Mejorado (Enhanced Vegetation Index: EVI). El EVI es un índice espectral similar en su concepción al IVN pero que incorpora en su cómputo la banda del azul. Esto permite mejorar la calidad de las imágenes, evitando la saturación del índice a altos niveles de área foliar y reduciendo el efecto de la señal producida por el suelo (Justice *et al.*, 2002). Al igual que el IVN, el EVI tiene una relación estrecha y directa con la fRFAA (Huete *et al.*, 2002). Esta relación entre los índices espectrales y la fRFAA provee la base teórica para estimar la PPNA a partir del IVN o el EVI.

Convertir la información espectral en estimaciones de la PPNA requiere la calibración de modelos que relacionen los índices de vegetación con la información de biomasa calculada a campo, cuantificando un factor clave en esta relación: la eficiencia de conversión de la energía radiante en biomasa. Monteith (1972) planteó que la PPNA es directamente proporcional a la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel (RFAA), y que la constante de proporcionalidad viene dada por la eficiencia de conversión de energía radiante en biomasa según la siguiente ecuación:

$$PPNA = EUR * RFAA = EUR * RFA \cdot fRFAA \quad (1)$$

donde EUR (Eficiencia en el Uso de la Radiación) es la eficiencia de conversión de energía en biomasa; RFA es la radiación fotosintéticamente activa incidente y fRFAA es la fracción de esa radiación interceptada por la vegetación.

RFA es medida en estaciones meteorológicas y fRFAA puede estimarse a partir de los índices de vegetación (IVN, EVI, etc).

EUR varía entre zonas, principalmente por el tipo de vegetación (composición específica, estructura y metabolismo fotosintético) y, dentro de una misma zona, varía en función de las condiciones ambientales, principalmente la temperatura y el agua disponible (Nouvellon *et al.*, 2000; Bradford *et al.*, 2005). La ecuación 1 puede invertirse para realizar calibraciones empíricas de la eficiencia de conversión de energía en biomasa (EUR):

$$EUR \text{ (g MS/MJ)} = RFAA \text{ (MJ/m}^2\text{*día)} / PPNA \text{ (g/m}^2\text{*día)} \quad (2)$$

donde EUR esta expresada en gramos de materia seca por megajoules (g MS/MJ).

Utilizando mediciones a campo de la PPNA y estimaciones de la radiación fotosintéticamente absorbida por la vegetación (RFAA) realizadas con imágenes satelitales, es posible calcular el parámetro EUR para un tipo de vegetación determinado.

El objetivo general de este trabajo fue generar modelos de estimación de la PPNA en tiempo real en diversos sistemas forrajeros en la región de influencia de INIA Treinta y Tres mediante la utilización de imágenes satelitales. Los objetivos específicos fueron:

- 1) Determinar la eficiencia en el uso de la radiación en pastizales naturales y mejoramientos (según la practica más común en la región) en la zona de Sierras y Lomadas del Este.
- 2) Calibrar modelos de estimación de la PPNA a partir de índices espectrales (EVI) para pastizales naturales y mejoramientos de la zona de Sierras y Lomadas del Este.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio es la zona de influencia de INIA Treinta y Tres, en la región conocida como Sierras y Lomadas del Este. Esta región comprende dos unidades geomorfológicas según la regionalización propuesta por Panario (1987): Sierras del Este e Isla Cristalina de Rivera y Colinas y Lomas del Este. Ambas regiones ocupan 3.37 millones de ha (19,1% de la superficie del país) y se extienden por gran parte por los departamentos de Lavalleja, Treinta y Tres, Maldonado, Cerro Largo, noreste de Florida, centro sur de Rocha y este de Durazno. Se caracterizan por presentar una gran heterogeneidad en cuanto al relieve, afloramientos rocosos, pendiente y profundidad. La vegetación predominante son los pastizales naturales (Baeza *et al.*, 2011, Lezama *et al.*, 2011). Parte de estos pastizales han sido sembrados en cobertura con especies forrajeras. Algunas de las forrajeras más usadas en la región son: *Lotus subbiflorus* cv El Rincón; *Lotus pedunculatus* cv Maku y *Trifolium repens* (Trébol blanco) (Bermúdez *et al.*, 2003); de aquí en mas, Lotus Rincón, Lotus Maku y Trébol Blanco, respectivamente.

Experimentos de corte de biomasa a campo

La información sobre la tasa de crecimiento diario de forraje proviene de dos experimentos previamente realizados en INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria) Treinta y Tres, uno para campo natural y otro con la siembra de las especies forrajeras más comunes en su zona de influencia. Si bien las tasas de crecimiento (diferencias en biomasa entre dos cosechas de biomasa sucesivas) no representan estrictamente al Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA), su cálculo en ausencia de pastoreo y a intervalos de tiempo relativamente cortos, puede representarla razonablemente bien (Oosterheld *et al.*, 2011).

El experimento de campo natural fue instalado en al unidad experimental Palo a Pique de INIA Treinta y Tres durante el periodo 1992-2002. El experi-

mento siguió la metodología propuesta por Anslow y Green (1967) con tres parcelas donde el corte de biomasa se realizó en forma desfasada a intervalos de 15 días (cada parcela era nuevamente cortada a intervalos de aproximadamente 45 días). En cada fecha de corte se realizaron 5 repeticiones por parcela. En cada repetición se cortaba toda la biomasa por encima de los 2,5 cm de altura en parcelas de 0,75 x 0,5 m. La biomasa cosechada se secaba en estufa hasta obtener peso constante. La tasa de crecimiento promedio se estimaba a partir de la producción promedio de biomasa de las tres parcelas y sus cinco réplicas, utilizando la fecha promedio para representar cada valor. Como resultado del experimento se obtuvo una serie temporal de valores promedio de tasa de crecimiento diaria (un estimador de la PPNA) cuyo período de solapamiento con los datos espectrales va desde febrero de 2000 hasta octubre de 2002. Esta serie temporal depurada cuenta con 39 valores de tasa de crecimiento diario a intervalos de aproximadamente 30 días.

El experimento con siembra de forrajeras se instaló en septiembre de 2003 y se cuenta con datos de corte hasta noviembre de 2005. La metodología y diseño experimental es igual a la del experimento sobre campo natural salvo que se realizaron cuatro repeticiones en vez de cinco. Para este trabajo se utilizaron exclusivamente las especies más frecuentemente usadas en los mejoramientos extensivos de la región: Lotus Rincón, Lotus Maku y Trébol Blanco. Las series temporales de tasas de crecimiento diario, en cada uno de los experimentos analizados, cuenta con 19 valores promedio a intervalos de entre 30 y 45 días.

Obtención y procesamiento de imágenes de satélite

Para estimar la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (fRFA, ecuación 1) se utilizaron series temporales de imágenes del Índice de Vegetación Mejorado (EVI: Enhanced Vegetation Index) del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo del satélite EOS Terra. Este satélite cubre una misma porción del territorio aproximadamente cada 24 horas. El MODIS Land Science Team

(<http://modis-land.gsfc.nasa.gov/>) produce una imagen de EVI cada 16 días con una resolución espacial de 250 x 250 m. Cada imagen de EVI posee como producto asociado una imagen de calidad de los datos píxel a píxel, para cada píxel de la imagen de EVI uno conoce la calidad del dato generado en función del tipo de método y datos utilizados, cantidad de aerosoles en la atmósfera, presencia de nubes, etc. (Roy *et al.*, 2002).

Se construyeron series temporales de imágenes EVI-MODIS (período 2000-2009) que fueron filtradas con la banda de calidad para obtener valores de EVI tomados por el satélite en ausencia de nubes, sombras y con bajos niveles de aerosoles en la atmósfera. El procesamiento de las imágenes de satélite fue realizado mediante el software ENVI 4.7.

Debido a que los datos de PPNA obtenidos a campo provienen de parcelas experimentales de pequeño tamaño, para la extracción de datos espectrales se seleccionaron potreros de las diferentes condiciones analizadas en la zona de influencia de INIA Treinta y Tres. Para los pastizales naturales, los potreros se eligieron en base a la similitud florística de las especies dominantes con las encontradas en los experimentos de corte de biomasa. Los datos florísticos de los experimentos de corte fueron relevados por el equipo de INIA Treinta y Tres. Los datos florísticos de los potreros seleccionados para la extracción de datos espectrales, corresponden a censos completos de vegetación realizados por Lezama *et al.* (2011). Se seleccionaron en total 16 potreros distintos distribuidos por el área de estudio. En cada potrero, se eligió el píxel MODIS más cercano al censo para extraer los datos espectrales (Figura 1).

Para los mejoramientos, se seleccionaron potreros implantados con las diferentes especies analizadas. Se eligieron potreros cercanos a los experimentos de corte, en los que el período en que fue realizada la siembra coincidiera con el período para el que había datos de corte. En total se utilizaron 6 píxeles MODIS (en tres potreros diferentes) con Lotus Rincón; 21 píxeles MODIS (2 potreros) con Lotus Maku y 1 píxel MODIS con Trébol Blanco (Figura 1).

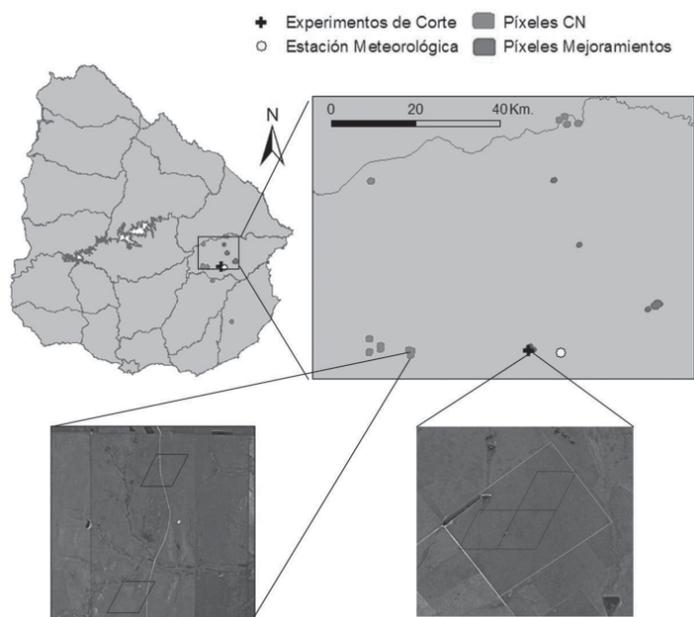


Figura 1. Ubicación de los píxeles MODIS seleccionados en los diferentes potreros, tanto para pastizales naturales (CN) como para mejoramientos. Se indica también la posición de los experimentos de corte de biomasa a campo como de la estación meteorológica de INIA Treinta y Tres. Las imágenes inferiores muestran, a modo de ejemplo, el tamaño de los píxeles MODIS con respecto a los potreros utilizados, superpuestos sobre una imagen de alta resolución del programa Google Earth.

Estimación de la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por la vegetación

La relación entre EVI y la fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada por la vegetación verde (fRFA) fue calibrada mediante una interpolación lineal (Ruimy *et al.*, 1994) con valores para toda la región de pastizales del Río de la Plata (Paruelo *et al.*, 2010). El máximo de EVI se fijó como el 98 percentil de la serie temporal (EVI = 0,62), estableciéndose como el 95% de fRFA interceptada (asumiendo saturación a valores de área foliar mayores). El mínimo de EVI se fijó como el 5 percentil de la serie de datos y corresponde a zonas con suelo desnudo (EVI = 0,05), estableciéndose como fRFA = 0. La relación entre el EVI y fRFA quedó dada por la siguiente ecuación:

$$fRFA = \text{MIN}((-0,0913 + 1,6696 * \text{EVI}); 0,95)$$

La Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por la vegetación (RFAA) se obtuvo de multiplicar

la fracción interceptada (fRFA) por la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA). Se calcularon valores diarios de RFA a partir de valores diarios de heliofanía (horas de sol) con datos de la estación meteorológica de INIA Treinta y Tres. Los valores diarios de RFA fueron promediados utilizando los mismos intervalos temporales de 16 días de la serie EVI-MODIS. En zonas como la de los pastizales del Río de la Plata, donde el relieve es relativamente plano, la radiación acumulada durante un período de tiempo relativamente largo depende principalmente del momento del año y la latitud. Por esta razón se pueden utilizar datos de estaciones meteorológicas que estén a distancias de hasta 300-400 km, incluso en sentido latitudinal (Oyarzabal *et al.*, 2011).

Se generaron series temporales de RFAA correspondientes a cada uno de los potreros seleccionados. Cada valor de RFAA resulta del promedio de los píxeles de cada recurso forrajero analizado, obteniéndose finalmente una serie temporal de RFAA

para cada recurso forrajero estudiado a intervalos de 16 días.

Las series temporales de RFAA se redujeron al período de solapamiento con los experimentos de corte de biomasa. Se generaron promedios temporales de RFAA utilizando todos aquellos valores (a intervalos de 16 días) comprendidos total o mayoritariamente, entre dos fechas consecutivas de corte de biomasa en los experimentos de campo.

Estimación de la Eficiencia en el Uso de la Radiación

La eficiencia en el uso de la radiación (EUR) fue estimada invirtiendo el modelo de Monteith (1972) (ecuación 2) mediante dos aproximaciones. En primer lugar se calculó como el cociente entre la productividad y la radiación absorbida para cada fecha, lo que permite conocer su variabilidad entre meses, estaciones y años (Oyarzabal *et al.*, 2011). La segunda aproximación se basó en ajustar un modelo de regresión lineal entre la productividad y la radiación absorbida en donde la productividad era la variable predicha («y») y la RFAA la variable predictora («x») (Le Roux *et al.*, 1997). Cuando la ordenada al origen del modelo lineal resulta igual o no significativamente distinta de cero, la pendiente del modelo es la EUR (Verón *et al.*, 2005).

Las eficiencias de ambos sistemas (pastizales naturales y mejoramientos) calculadas mediante ajuste de un modelo lineal, así como las eficiencias de los distintos mejoramientos, fueron comparadas según el método propuesto por Zar (1999) usando el software GraphPad Prism 3.0.

Generación y validación de modelos de estimación de la PPNA

Para estimar la productividad primaria neta aérea (PPNA) a partir de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación (RFAA) se utilizó el modelo de Monteith (1972) (ecuación 1). Se utilizaron valores de RFAA estimados a partir de imágenes de satélite y datos meteorológicos como se describe más arriba. La eficiencia en el uso de la radiación (EUR) utilizada fue la resultante de invertir el modelo de Monteith (1972) considerando tanto la pendiente como la ordenada en el origen.

Debido a que el número de pares de datos presentes en los modelos de regresión es relativamente pequeño, se optó por evaluar los modelos generados mediante una aproximación de remuestreo de los datos de tipo «Jackknife». En la aproximación «Jackknife» (Crowley, 1992, Manly, 1997) el conjunto total de datos (en este caso n pares de PPNA y RFAA) es subdividido en dos subconjuntos: uno de ajuste (de tamaño n-1) y otro de validación (de tamaño 1). Con el primer subconjunto se genera un modelo que será utilizado para predecir la variable dependiente del subconjunto de evaluación. Repitiendo este proceso para los n pares de datos, se obtuvieron n predicciones de la PPNA a partir de la RFAA.

Se generaron y evaluaron dos modelos de estimación de la PPNA uno para pastizales naturales y otro para mejoramientos. El modelo para pastizales naturales contó con 39 pares de datos y el de mejoramientos, 57 pares de datos (19 por recurso forrajero). Las evaluaciones mediante aproximación «Jackknife» fueron realizadas mediante el software R 2.11.1.

Resultados y discusión

Pastizales naturales

Los experimentos de corte de biomasa presentaron valores máximos de Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) o tasa de crecimiento, durante marzo del 2002, alcanzando los 2,32 g MS/m²*día. Los valores mínimos ocurrieron en agosto del 2002 (0,28 g MS/m²*día). Los potreros de pastizales naturales cercanos al sitio de corte del cual se extrajeron los valores de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por la Vegetación (RFAA) presentaron un valor promedio máximo de 8,79 MJ/m²*día, en enero de 2001 y un mínimo de 1,48 MJ/m²*día, en junio de 2002 (Figura 2).

La eficiencia en el uso de la radiación (EUR), calculada como el cociente entre PPNA y RFAA para cada fecha, presentó un valor promedio de 0,22 g MS/MJ. El valor máximo de EUR fue 0,48 g MS/MJ y ocurrió en octubre de 2002, mientras que el valor mínimo fue de 0,09 g MS/MJ y ocurrió en agosto del 2000 (Figura 3a).

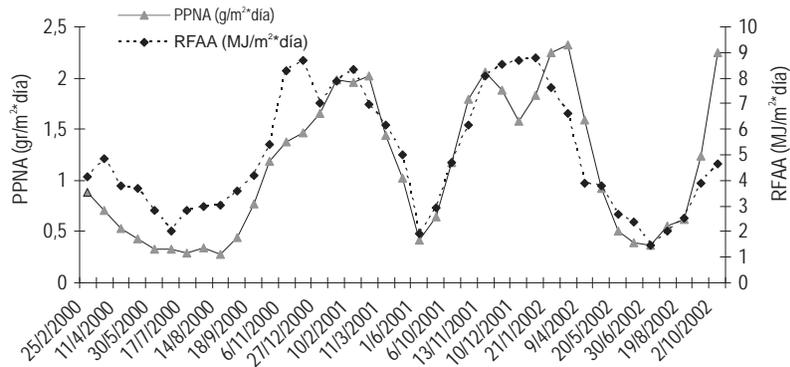


Figura 2. Marcha estacional de la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) (o tasa de crecimiento) y la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por al vegetación (RFAA) para pastizales naturales. Los datos de PPNA corresponden al experimento de corte de biomasa a campo. Los valores de RFAA fueron obtenidos a partir de series temporales de EVI-MODIS y corresponden al promedio de 16 potreros de pastizales naturales cercanos al experimento de corte.

La EUR calculada mediante el ajuste de un modelo lineal entre PPNA y RFAA presentó un valor para pastizales naturales de 0,24 g MS/MJ ($r^2 = 0,7$; $N = 39$; $p < 0,001$) (Figura 3b). Este valor es similar a los reportados por Baeza *et al.* (2010) para pastizales

del Basalto superficial y algo menor a los reportados por Oyarzabal *et al.* (2011) para diferentes tipos de suelo en la región Basáltica. No existen hasta el momento estimaciones de la EUR en pastizales de la zona analizada en este trabajo que permitan la comparación.

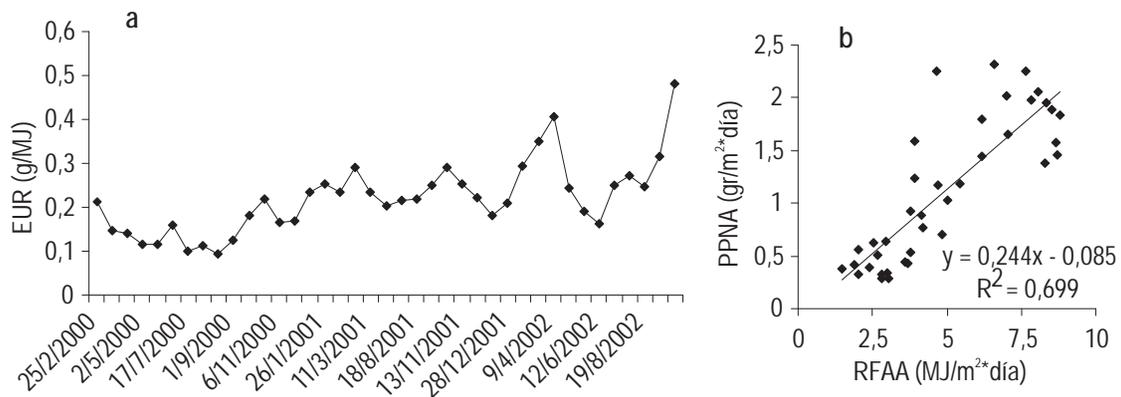


Figura 3: a) Marcha estacional de la Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR) para pastizales naturales. EUR fue calculada como cociente entre la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) y la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por al vegetación (RFAA). b) Modelo lineal entre PPNA y RFAA, la pendiente representa la EUR.

El modelo para estimar la PPNA a partir de RFAA en pastizales naturales fue el siguiente:

$$PPNA = RFAA * 0,244 - 0,085; r^2=0,7; F_{1,37} = 86,17; p<0,0001; \text{Error cuadrático medio (ECM)}=0,14$$

El modelo explicó el 70 % de la varianza de los datos y tuvo un r^2 de predicción de 0,67 (N=39; $F_{1,37}=75,46$; $p<0,0001$; $ECM=0,15$), obtenido mediante «Jackknife» del modelo original. La Figura 4 muestra la dinámica temporal de los valores de PPNA medidos a campo y los estimados a partir del modelo en la simulación Jackknife (o sea, el valor de PPNA predicho se obtuvo sin utilizar el valor de RFAA correspondiente).

Mejoramientos

Para los mejoramientos los valores de tasa de crecimiento (o PPNA) dependieron de la especie analizada. Los valores máximos fueron de 4,29 g MS/m²*día, en noviembre de 2005, para Lotus Rincón; 4,38 g MS/m²*día, en noviembre de 2004, para Lotus Maku; y 4,57 g MS/m²*día, en noviembre de 2004, para Trébol Blanco. Los valores mínimos fueron muy próximos a cero en los tres experimentos y ocurrieron en febrero del 2005, seguramente influidos por los bajos valores de precipitación registrados durante enero de 2005. Los potreros seleccionados para extraer los valores de Radiación Foto-

sintéticamente Activa Absorbida por la Vegetación (RFAA) presentaron valores máximos promedio de 9,3 MJ/m²*día en octubre de 2005, 7,49 MJ/m²*día en noviembre de 2003 y 8,94 MJ/m²*día en noviembre de 2003 para Lotus Rincón, Lotus Maku y Trébol blanco respectivamente. Los valores mínimos de RFAA ocurrieron siempre en junio del 2004 y alcanzaron valores de 2,15, 1,81 y 1,62 MJ/m²*día para Lotus Rincón, Lotus Maku y Trébol blanco respectivamente (Figura 5).

La eficiencia en el uso de la radiación (EUR) presentó valores similares para los mejoramientos con las tres especies analizadas, tanto cuando se calculó como cociente entre PPNA y RFAA, como cuando se calculó como la pendiente que minimiza el error de predicción (Cuadro 1). Las pendientes de los tres tipos de mejoramiento analizados no presentaron diferencias significativas ($F_{2,51}=0,155$, $p=0,857$). Los valores de EUR calculados mediante el ajuste de un modelo lineal entre PPNA y RFAA presentaron valores similares a los reportados en otros trabajos con mejoramientos y pasturas implantadas en pastizales de la región. Piñeiro *et al.* (2006), reportan valores promedio de EUR entre 0,42 y 0,52 g MS/MJ para pasturas implantadas y/o mejoramientos con diferentes especies de gramíneas y leguminosas en la pampa inundable, provincia de Buenos Aires, Argentina; Oyarzabal *et al.* (2011) reportan va-

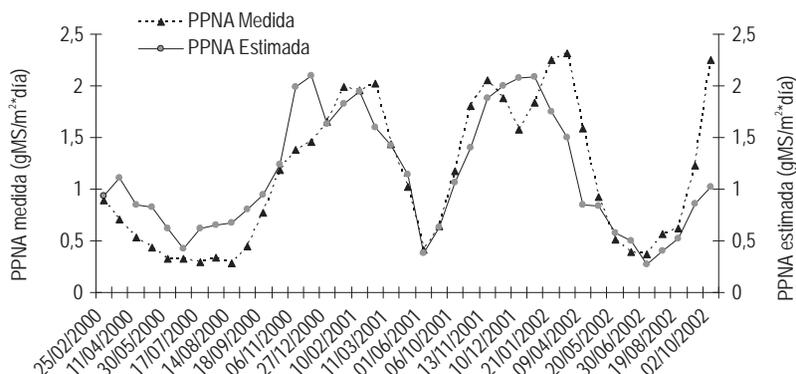


Figura 4. Marcha estacional de la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) para pastizales naturales de la zona de sierras y lomadas del este. Se muestra la PPNA medida a campo en experimentos de cortes de biomasa y la estimada a partir del modelo de Monteith (1972), utilizando datos de imágenes de satélite y datos climáticos (simulación Jackknife del modelo original, ver texto).

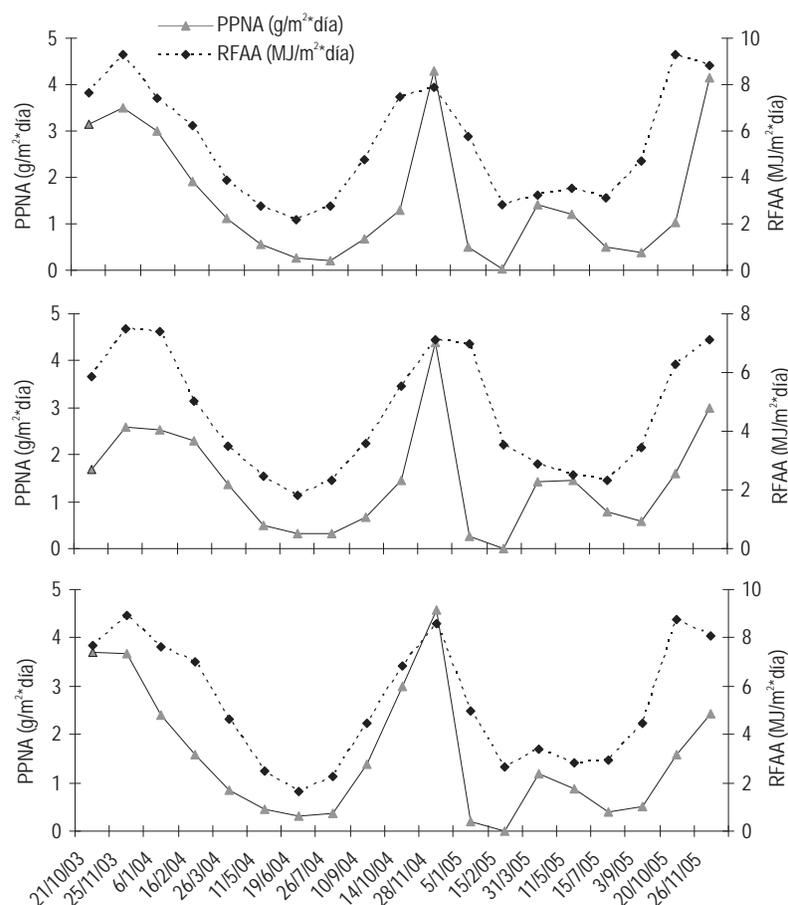


Figura 5. Marcha estacional de la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) (o tasa de crecimiento) y la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por al vegetación (RFAA) para diferentes mejoramientos. a) Lotus Rincón; b) Lotus Maku; c) Trébol blanco. Los datos de PPNA corresponden al experimento de corte de biomasa a campo. Los valores de RFAA fueron obtenidos a partir de series temporales de EVI-MODIS y corresponden al promedio de 28 píxeles MODIS en potreros con los diferentes mejoramientos.

Cuadro 1. Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR) para mejoramientos con diferentes especies. Se muestra el valor promedio, máximo y mínimo de EUR calculada como el cociente entre la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) y la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por al vegetación (RFAA). Pendiente hace referencia al valor de EUR calculado como la pendiente del modelo de ajuste lineal entre PPNA y RFAA.

| | Lotus Rincón | Lotus Maku | Trébol Blanco |
|--------------|--------------|------------|---------------|
| EUR Promedio | 0,250 | 0,300 | 0,256 |
| EUR Máxima | 0,546 | 0,616 | 0,533 |
| EUR Mínima | 0,011 | 0,003 | 0,002 |
| Pendiente | 0,425 | 0,381 | 0,452 |

lores un poco mayores del orden de 0,7 g MS/MJ para pasturas implantadas, también en la región pampeana.

Debido a la similitud en la eficiencia en el uso de la radiación detectada en los mejoramientos con las distintas especies analizadas se optó por calibrar un único modelo que contemplara las tres situaciones (Figura 6).

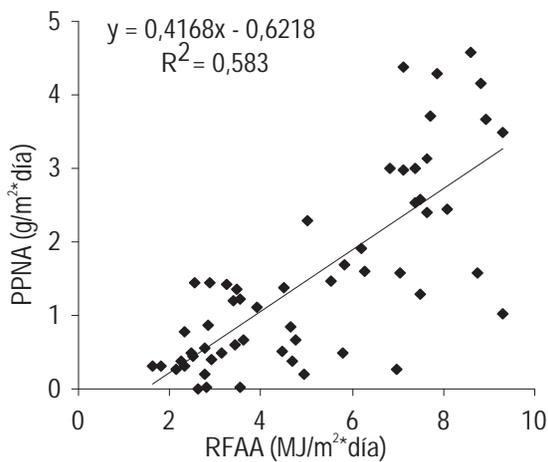


Figura 6. Modelo lineal entre la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) y la Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida por la vegetación (RFAA) para mejoramientos, la pendiente representa la Eficiencia en el uso de la Radiación

El modelo para estimar la PPNA a partir de RFAA en mejoramientos fue:

$$PPNA = RFAA * 0,4168 - 0,622; r^2=0,58; F_{1,55} = 76,9; p<0,0001; ECM=0,69$$

El modelo explicó el 58 % de la varianza y tuvo un r^2 de predicción de 0,55 (N=57; $F_{1,55}=66,42$; $p<0,0001$; ECM=0,75). La Figura 7 muestra la dinámica temporal de los valores de PPNA medidos a campo y los estimados a partir del modelo en la simulación Jackknife.

La Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR), calculada mediante la inversión del modelo de Monteith (1972), de los mejoramientos prácticamente duplica la de los pastizales naturales. Las diferencias entre ambas pendientes fueron altamente sig-

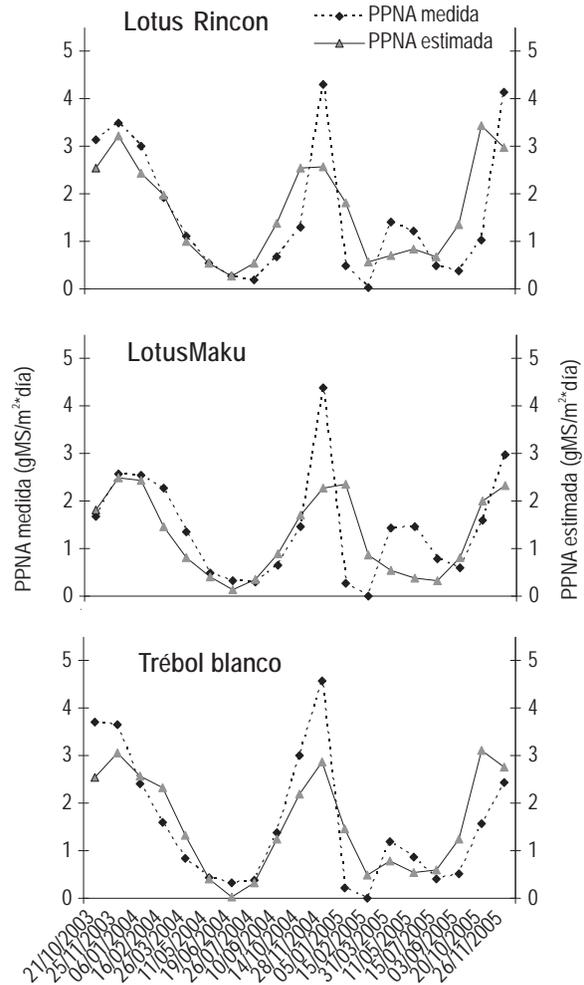


Figura 7. Marcha estacional de la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) para tres tipos de mejoramientos en la zona de sierras y lomadas del este. Se muestra la PPNA medida a campo en experimentos de cortes de biomasa y la estimada a partir del modelo de Monteith (1972), utilizando datos de imágenes de satélite y datos climáticos (simulación Jackknife del modelo original, ver texto).

nificativas ($F_{1,92} = 7,75$; $p<0,01$). Los valores de EUR reportados para la región de pastizales del Río de la Plata también dan cuenta de este patrón, donde la EUR para pasturas implantadas (Pineiro *et al.*, 2006; Grigera *et al.*, 2007; Oyarzabal *et al.*, 2011), duplica a la de pastizales naturales (Baeza *et al.*, 2010; Oyarzabal *et al.*, 2011).

Las estimaciones de la Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR) así como los modelos de estimación de la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) desarrollados en este trabajo descansan sobre una serie de supuestos. En primer lugar, los datos de corte de biomasa y los datos espectrales corresponden a lugares geográficos distintos. Esto implica asumir que el recurso forrajero analizado posee características similares (composición específica, tipo de suelo, régimen climático, etc.) en el lugar donde se corta biomasa y en el que se extraen los datos espectrales. La selección de los potreros para la extracción de datos espectrales realizada tuvo especial cuidado en que ambos sitios tuvieran similar composición de especies. Por otro lado, la cercanía geográfica entre el sitio de los experimentos de corte y los potreros seleccionados, permite controlar razonablemente bien el factor climático. Si bien no se analizó el tipo de suelo de los potreros seleccionados, todos ellos pertenecen a las regiones geomorfológicas «Sierras del Este e Isla Cristalina de Rivera» y «Colinas y Lomas del Este» según la regionalización planteada por Panario (1987). Adicionalmente, se calculó la pendiente de los potreros estudiados de forma de controlar que no hubiera diferencias que afectaran la incidencia de la radiación y por ende los resultados obtenidos. Las pendientes de los potreros utilizados para obtener la información espectral oscilaron entre 1,9 y 7,4 grados (promedio 4,7) para pastizales naturales, y entre 0,8 y 4,8 grados (promedio 3,3), para los mejoramientos. Estas pendientes son de poca magnitud y no generan cambios significativos en la orientación y la radiación reflejada. Idealmente, ambos conjuntos de datos deberían pertenecer al mismo sitio. Debido al alto costo en tiempo y esfuerzo que implican los experimentos de corte de biomasa, la alternativa de utilizar conjuntos de datos previamente realizados disminuye los costos operativos. Una adecuada red de experimentos de cortes de biomasa, en los que el sitio de corte esté dentro de potreros lo suficientemente grandes como para extraer información espectral del sensor MODIS, confirmaría y/o mejoraría las estimaciones realizadas en este trabajo.

Otro de los supuestos es que las tasas de crecimiento utilizadas representan razonablemente bien la PPNA. Si bien ambas mediciones representan flujos de energía distintos -la PPNA involucra además de la biomasa generada, las pérdidas por senescencia, caída y descomposición- el intervalo de tiempo entre dos cortes sucesivos y la exclusión de los grandes herbívoros permite utilizar a la tasa de crecimiento como un estimador razonable de la PPNA.

Las estimaciones de EUR realizadas en este trabajo permiten mejorar las estimaciones de la PPNA a nivel regional a partir de imágenes de satélite. Actualmente se encuentra en marcha en la región un sistema de seguimiento de la PPNA a tiempo real, a escala de potrero de los establecimientos agropecuarios (<http://larfile.agro.uba.ar/lab-sw/sw/gui/Inicial.page>): este sistema se encuentra completamente operativo en distintas áreas de la provincia de Buenos Aires, Argentina. En Uruguay, en el marco del proyecto INIA-FPTA 175, este sistema se implementó en forma piloto. Las aplicaciones de estas estimaciones son variadas y de enorme utilidad: planificación de la carga animal por potrero, balance forrajero, evaluación del impacto de diferentes variables ambientales y las decisiones de manejo sobre la PPNA (Paruelo *et al.*, 2011). Contar con calibraciones locales de la EUR tanto para pastizales naturales como para mejoramientos, mejorará notablemente la implementación de este tipo de seguimiento de la PPNA sobre grandes extensiones de territorio.

Agradecimientos

Felipe Lezama colaboró en la selección de los potreros de pastizales naturales, Marcos Texeira colaboró en la validación de los modelos de PPNA, Ethel Barrios y Virginia Pravia colaboraron en el análisis y depuración de los datos de corte de biomasa. Este trabajo fue parcialmente financiado por ANII-FCE2007_386, INIA-FPTA-175, INIA- FCI_01 y por una subvención del Inter-American Institute for Global Change Research (IAI, CRNII 2031), que es apoyado por US National Science Foundation (Grant GEO-0452325).

Bibliografía

- Altesor A, Oesterheld M, Leoni E, Lezama F, Rodríguez C. 2005. Effect of grazing on community structure and productivity of a Uruguayan grassland. *Plant Ecology*, 179: 83-91.
- Anslow RC, Green JO. 1967. The seasonal growth of pasture grasses. *The Journal of Agricultural Science*, 68: 109-122
- Baeza S, Lezama F, Piñero G, Altesor A, Paruelo JM. 2010. Aboveground Net Primary Production spatial variability of Uruguayan Grasslands: a remote sensing approach. *Applied Vegetation Science*, 13: 72-85.
- Baeza S, Gallego F, Lezama F, Altesor A, Paruelo J. 2011. Cartografía de los pastizales naturales en las regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas. En: Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Ed. Altesor A., Ayala W y Paruelo JM. INIA, Serie FPTA N° 26, Uruguay. pp. 33-54.
- Baret F, Guyot G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35:161-173.
- Bermúdez R, Ayala W, Ferrés S, Queheille P. 2003. Opciones forrajeras para la región Este. En: Seminario de Actualización Técnica: Producción de carne vacuna y ovina de calidad. INIA, Uruguay. (Serie Actividades de Difusión; 317). pp. 1-10.
- Bermúdez R, Ayala W. 2005. Producción de forraje de un campo natural de la zona de lomadas del este. En: Seminario de actualización técnica en manejo de campo natural. INIA, Uruguay (Serie técnica; 151). pp. 33-39
- Berretta EJ, Bemhaja M. 1998. Producción estacional de comunidades naturales sobre suelos de Basalto en la Unidad Queguay Chico. En: Seminario de actualización en tecnologías para Basalto. INIA, Uruguay. (Serie técnica; 102). pp. 11-20.
- Bradford JB, Hickey JA, Lauenroth WK. 2005. The relative importance of light-use efficiency modifications from environmental conditions and cultivation for estimation of large-scale net primary productivity. *Remote Sensing of Environment*. 96: 246-255.
- Crowley PH. 1992. Resampling methods for computation intensive data analysis in ecology and evolution. *Annual Review in Ecology and Systematics*, 23: 405-447.
- Golluscio RA, Deregibus VA, Paruelo JM. 1998. Sustainability and range management in the Patagonian steppes. *Ecología Austral*, 8: 265-284.
- Gower S, Kucharik CJ, Norman JM. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 70:29-51.
- Grigera G, Oesterheld M, Pacin F. 2007. Monitoring forage production with MODIS data for farmers' decision making. *Agricultural Systems*, 94: 637-648.
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83: 195-213.
- Justice CO, Townshend JRG, Vermote EF, Masuoka E, Wolfe RE, Saleous N, Roy DP, Morisette JT. 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment* 83:3-15.
- Le Roux X, Gauthier H, Begue A, Sinoquet H. 1997. Radiation absorption and use by humid savanna grassland: assessment using remote sensing and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85:117-132.
- Lezama F, Altesor A, Pereira M, Paruelo JM. 2011. Descripción de la heterogeneidad florística de las principales regiones geomorfológicas de Uruguay. En: Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Ed. Altesor A., Ayala W y Paruelo JM. INIA, Serie FPTA N° 26, Uruguay. pp. 15-32.
- Manly BFJ. 1997. Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods in biology. Chapman y Hal, United State of America. 424 pp.
- McNaughton SJ, Oesterheld M, Frank DA, Williams JK. 1989. Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature*, 341: 142-144.
- DIEA (Dirección de Estadísticas Agropecuarias). Censo general Agropecuario 2000, <http://www.mgap.gub.uy/Diea/anterior/CENSOVOL2/indice.htm>, mayo 2011.
- Monteith JL. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9:747-766.
- Nouvellon Y, Lo seen D, Rambal S, Bégué A, Moran MS, Kerr Y, Qi J. 2000. Time course of radiation use efficiency in a shortgrass ecosystem: consequences for remotely sensed estimation of primary production. *Remote Sensing of Environment*, 71:43-55.
- Oesterheld M, DiBella CM, Kerdiies H. 1998. Relation between NOAA AVHRR satellite data and stocking rate of rangelands. *Ecological Applications*, 8: 207-212.
- Oesterheld M, Paruelo JM, Oyarzabal M. 2011. Estimación de la productividad primaria neta aérea a partir de diferencias de biomasa y de integración de la radiación absorbida. En: Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Ed. Altesor A., Ayala W y Paruelo JM. INIA, Serie FPTA N° 26, Uruguay. pp. 113-120.
- Oyarzabal M, Oesterheld M, Grigera G. 2011. ¿Cómo estimar la eficiencia en el uso de la radiación mediante sensores remotos y cosechas de biomasa? Un ejemplo local. En: Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Ed. Altesor A., Ayala W y Paruelo JM. INIA, Serie FPTA N° 26, Uruguay. pp. 121-135.
- Panario D. 1987. Geomorfología del Uruguay. Facultad de Humanidades y Ciencias, Uruguay. 44 pp.
- Paruelo JM, Epstein HE, Lauenroth WK, Burke IC 1997. ANPP estimates from NDVI for the central grasslands region of the U.S. *Ecology*, 78: 953-958.
- Paruelo JM, Piñero G, Baldi G, Baeza S, Lezama F, Altesor A, Oesterheld M. 2010 Carbon Stocks and Fluxes in Rangelands of the Rio de la Plata Basin. *Rangeland Ecology & Management*, 63:94-108
- Paruelo JM, Oyarzabal M, Oesterheld M. 2011. El Seguimiento de los recursos forrajeros mediante sensores remotos: bases y aplicaciones. En: Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Ed. Altesor A., Ayala W y Paruelo JM. INIA, Serie FPTA N° 26, Uruguay. pp. 135-146.
- Piñero G, Oesterheld M, Paruelo JM. 2006. Seasonal variation in aboveground production and radiation use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems*. 9: 357-373.
- Risso DF. 1988. Mejoramientos extensivos en Uruguay. En: XIV Reunión del grupo técnico regional del Cono Sur en mejoramiento y utilización de los recursos forrajeros del área tropical y subtropical. Grupo Campos: Anales. INIA, Uruguay. (Serie Técnica; 94). pp. 23-29.
- Roy DP, Borak JS, Devadiga S, Wolfe RE, Zheng M, Descloitres J. 2002. The MODIS Land product quality assessment approach. *Remote Sensing of Environment*, 83: 62-76.
- Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. 1994. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research*, 99: 5263-5283.
- Sala OE, Biondini ME, Lauenroth WK 1988. Bias in estimates of primary production: an analytical solution. *Ecological Modelling*, 44: 43-55.
- Scurlock JMO, Johnson K, Olson RJ 2002. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, 8: 736-753.
- Soca P, Ayala W, Bermúdez R. 2002. The effect of herbage allowance of lotus pedunculatus cv. Grasslands Maku on winter and spring beef heifer performance. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association* 64: 81-84.
- Zar JH 1999. *Biostatistical Analysis*. 4th ed. Prentice Hall, United State of America. 929 pp.