

Mariano Oyarzabal<sup>1,2\*</sup>;  
José M Paruelo<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup> IFEVA, Universidad de Buenos Aires, CONICET, Facultad de Agronomía, Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup> Departamento de Métodos Cuantitativos y Sistemas de Información, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Argentina.

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) La Estanzuela, Colonia, Uruguay.

<sup>4</sup> Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay.

# Capítulo 7

## Dinámica de la productividad primaria de las comunidades de pastizal del Uruguay

### RESUMEN

La productividad primaria neta aérea (PPNA) determina la disponibilidad de forraje en los sistemas ganaderos extensivos, y por lo tanto la carga animal. En los pastizales del Río de la Plata, y en los de Uruguay en particular, se ha generalizado el uso de estimaciones de PPNA a partir de datos provistos por sensores remotos. En este capítulo se caracteriza la dinámica estacional e interanual de la PPNA de las cuatro comunidades de pastizal del Uruguay susceptibles de ser cartografiadas. A diferencia de estudios previos, la estimación de la PPNA, a nivel de sección policial y tipo de pastizal (comunidades I y II, pastizales ralos; III y IV, pastizales densos), incorpora un valor de eficiencia de uso de la radiación (EUR) variable en el espacio y el tiempo.

La PPNA media varió entre 5260 y 5953 kg MS.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> para las comunidades I y IV, respectivamente. Si bien los pastizales densos siempre tuvieron mayor PPNA que los ralos, cuál comunidad dentro de cada tipo presentó valores más altos varió con los años. Dentro de un año y en promedio, la comunidad IV presentó la PPNA más alta, excepto para el invierno, cuando la comunidad I tuvo la mayor PPNA. La EUR estimada a partir de un índice de reflectancia fotoquímica derivada de datos MODIS (resolución 1000 m), muestra una clara estacionalidad, con máximos en invierno y mínimos en primavera tardía. Sin duda, evaluar con mayor resolución las diferencias espaciales de EUR asociadas a comunidades o tipos de recursos forrajeros es uno de los aspectos a trabajar para mejorar las estimaciones de PPNA.

\* oyarzaba@agro.uba.ar

## INTRODUCCIÓN

Estimar la productividad primaria neta de manera precisa y con una resolución espacial y temporal compatible con la escala a la cual se toman decisiones es un punto crítico en el uso y la conservación de los pastizales (Golluscio *et al.*, 1998). La productividad primaria neta aérea (PPNA) es el determinante principal de la disponibilidad de forraje en los sistemas de producción ganadera extensiva y el principal control de la carga animal (Oesterheld *et al.*, 1992; Golluscio, 2009). La PPNA constituye una variable funcional ecosistémica clave, ya que determina la energía disponible para el resto de los sistemas tróficos y fija el límite a la capacidad de secuestrar C (McNaughton *et al.*, 1989). Richmond *et al.* (2007) identifican a la PPN como el proceso que mejor explica las variaciones en el nivel de oferta de servicios ecosistémicos. De hecho, buena parte de las funciones de producción de servicios ecosistémicos finales incluyen a la PPN y a su dinámica estacional como uno de los determinantes de la oferta (Paruelo *et al.*, 2016).

En los pastizales del Río de la Plata, y en los de Uruguay en particular, se ha generalizado el uso de estimaciones de PPNA basadas en índices de vegetación calculados a partir de datos provistos por sensores remotos. Estas estimaciones se apoyan en el uso de índices espectrales y el modelo propuesto por Monteith (1972, ver Running *et al.*, 2004 y Capítulo 10 de este volumen). Varios trabajos describieron la variabilidad espacial y temporal de la PPNA o de alguno de sus determinantes (por ejemplo, la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por tejidos verdes) para distintas zonas del territorio uruguayo (Piñeiro *et al.*, 2006, Baeza *et al.*, 2010, Guido *et al.*, 2014, Texeira *et al.*, 2015). Estos estudios han sido, por otro lado, la base de un sistema de seguimiento forrajero que lleva adelante el INIA, el Instituto Plan Agropecuario y CONAPROLE (Grieger *et al.*, 2007; Paruelo *et al.*, 2011).

El sistema de seguimiento forrajero activo en Uruguay ha permitido identificar algunos de los aspectos sobre los cuales trabajar para mejorar las estimaciones de PPNA. Uno de ellos es la estimación

de la Eficiencia de Uso de la Radiación (EUR), una de las variables en las cuales se basa el cálculo de PPNA propuesto por Monteith (1972). Trabajos previos (Piñeiro *et al.*, 2006, Oyarzabal *et al.*, 2011, Baeza *et al.*, 2011a) generaron estimaciones de EUR para distintos recursos forrajeros a partir de datos de cortes secuenciales de biomasa y mediciones de radiación absorbida (Oesterheld *et al.*, 2011). En el Capítulo 8 se describen las alternativas metodológicas para su estimación a partir de la medición de procesos ecofisiológicos (fluorescencia), o mediante el uso de índices espectrales, particularmente del *Photochemical Reflectance Index* (PRI). El uso de estos índices es particularmente atractivo ya que permitiría la estimación remota de la EUR. Algunas de las bandas espectrales del sensor MODIS permiten el cálculo del PRI, aunque a una baja resolución espacial (1 km).

Otro de los insumos que requiere el sistema de seguimiento forrajero es una adecuada descripción de la heterogeneidad estructural de la vegetación. Esta descripción no sólo involucra distinguir entre recursos forrajeros cultivados y pastizales naturales sino también, dentro de estos últimos, entre comunidades. La delimitación y la cartografía de comunidades vegetales de pastizal presentada en los Capítulos 1 y 2 constituye entonces un insumo clave para describir la dinámica estacional de la PPNA de los pastizales uruguayos.

En este capítulo se caracteriza la dinámica estacional e interanual de la PPNA de las cuatro comunidades de pastizal del Uruguay susceptibles de ser cartografiadas. A diferencia de estudios previos, la estimación de PPNA incorpora un valor de EUR variable en el espacio y el tiempo. Los valores de EUR derivan de datos de PRI calculados a partir de las bandas 11 y 12 del sensor MODIS (Garbulsky *et al.*, 2008).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se estimó la PPNA de cuatro comunidades de pastizal natural en cuatro regiones geomorfológicas de Uruguay: Centro Sur, Cuesta Basáltica, Cuenca Sedimentaria del Noroeste, Sierras del Este e Isla

**Tabla 1.** Comunidades de pastizal del Uruguay para las cuales se estimó la productividad primaria neta aérea, por tipo de pastizal, especies características y región que ocupan (Capítulo 1). B = Cuesta Basáltica, SE = Sierras del Este e Isla Cristalina, CS = Centro Sur, CSNE = Cuenca Sedimentaria del Noreste.

Tipo	Comunidad	Región
Pastizal ralo	I. Comunidad de <i>Selaginella sellowii</i> y <i>Rostrata cristata</i>	B
Pastizal ralo	II. Comunidad de <i>Trachypogon spicatus</i> y <i>Crocatherium brasiliense</i>	SE, CSNE, CS
Pastizal denso	III. Comunidad de <i>Steinchisma hians</i> y <i>Piptochaetium stipoides</i>	B
Pastizal denso	IV. Comunidad de <i>Eryngium horridum</i> y <i>Juncus capillaceus</i>	SE, CSNE, CS

Cristalina. Las comunidades estudiadas se describen brevemente en la Tabla 1, y en detalle en el Capítulo 1. Se utilizó información provista por el sensor satelital MODIS (EVI) y estimaciones de radiación incidente realizadas por el INPE. La resolución espacial más detallada de las estimaciones fue de 5,3 ha (superficie del píxel o mínima área que «releva» el satélite de la que se obtuvo el índice de vegetación), y la temporal de 16 días, aunque como se explica más abajo, otras variables usadas para el cálculo tuvieron una resolución menos detallada (píxeles más grandes y datos mensuales). Las estimaciones de PPNA abarcan el período 2000-2016.

En cada región, los datos de PPNA para cada fecha (prácticamente 2 datos por mes y por píxel), se sintetizaron a nivel de región geomorfológica, comunidad vegetal, tipo de pastizal (denso o ralo) y por sección policial. El número total de registros de PPNA abarcan casi 2 millones de ha (incluyen más de 365 mil píxeles) durante 17 años. Cada dato de PPNA promedio para una fecha y sección policial está acompañado por una medida de variabilidad (desvío estándar espacial o variabilidad entre píxeles) y por el número de píxeles involucrados en la estimación. La base de datos completa a nivel de sección policial (Apéndices 1 y 2, disponibles en <http://pastizales.fcien.edu.uy/>)

Se utilizó el modelo propuesto por Monteith (1972) y, a partir de datos provistos por sensores remotos (Piñeiro *et al.*, 2006), se estimó la PPNA de cada

píxel con pastizal con una resolución espacial de 230 m (5,3 ha):

$$PPNA[(\text{kg MS})/(\text{ha} \cdot \text{mes})] =$$

$$RFA_i[\text{MJ}/(\text{ha} \cdot \text{mes})] \cdot fRFAA \cdot EUR(\text{kgMS}/\text{MJ})$$

donde  $RFA_i$  es la radiación fotosintéticamente activa incidente,  $fRFAA$  es la fracción de la radiación fotosintéticamente activa incidente que es absorbida, y  $EUR$  la eficiencia de uso de la radiación.

La radiación incidente promedio (2000-2015) se obtuvo de las imágenes satelitales del producto «Solar Global» de INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales, Brasil), con detalle mensual y una resolución espacial de 0,4° (el píxel mide aproximadamente 40 km de lado). A partir de la cartografía de coberturas del suelo y de comunidades de pastizal provista por el Grupo de Ecología de Pastizales, UDELAR (Baeza *et al.*, 2011b y Capítulo 1), se seleccionaron los píxeles MODIS que correspondían íntegramente a las distintas comunidades de pastizal, y se extrajeron las series temporales de EVI desde febrero de 2000 hasta diciembre de 2016 (producto MOD13Q1). Se corrigió la serie temporal de EVI de cada píxel por la banda de calidad provista en el mismo producto, y luego cada dato de EVI se transformó a  $fRFA_i$  utilizando un modelo lineal calibrado para la región de los pastizales del Río de la Plata (Grigera *et al.*, 2004). Entonces, la  $fRFAA$  fue estimada a la misma resolución que el EVI, cada 5,3 ha y 16 días.

Por otro lado, se estimó la EUR a partir de calibrar estimaciones a campo

con datos de *Photochemical Reflectance Index* – PRI (Gamon *et al.*, 1992) para todo el período. El PRI se estimó como la diferencia entre la reflectancia en la banda 11 y la banda 12, dividida la suma de ambas reflectancias (Garbulsky *et al.*, 2008). Se utilizaron datos del mismo sensor MODIS, pero en este caso el píxel fue de 1000 m de lado (100 ha; imágenes MOD021KM). A diferencia del producto anterior que se utilizó para extraer datos de EVI, estas imágenes no aseguran que el píxel elegido tenga siempre la misma posición. Entonces, para asegurar la condición que los píxeles de 100 ha estén íntegramente cubiertos por pastizal, primero se delimitaron áreas de pastizal de 400 ha o mayores (185 áreas en total para las regiones bajo estudio). Para cada una de estas áreas de pastizal se contó con un píxel con datos de PRI desde 2000 hasta 2015. Si bien es posible acceder a datos diarios, éstos se obtuvieron cada 16 días en la fecha correspondiente a la fecha modal de todos los píxeles de 5,3 ha (producto MOD13Q1) incluidos en el de 100 ha. De este modo, los datos estimados de PRI tuvieron la mejor calidad dentro de cada período de 16 días. Más allá de esto, las 185 series de PRI durante todo el período presentaron una muy marcada tendencia interanual, producto probablemente de una degradación del sensor. Se eliminó la tendencia a partir de calcular la pendiente del modelo lineal para cada píxel y de re-escalar todos los valores a los del primer año de la serie, de modo de minimizar el efecto de la degradación.

El PRI se transformó a valores de EUR (g/MJ) mediante una interpolación lineal. Para cada píxel de 100 ha se igualaron los percentiles 5 y 95 (serie 2000-2015) con los percentiles 5 y 95 de estimaciones de EUR a campo en pastizales ralos (3 sitios) y pastizales densos (2 sitios) de la Cuesta Basáltica hechas durante el período 2006-2009 (Oyarzabal *et al.*, 2011). Los datos intermedios de EUR se obtuvieron por interpolación lineal. Así, se dispuso de registros de EUR cada 16 días (2000-2015) en 185 píxeles cubiertos por pastizales. Luego, se asignaron los valores de EUR a todos los píxeles de 250 m que quedaran incluidos dentro de las áreas de 400 ha elegidas. Al resto de los píxeles de 250 m sin pertenencia a

una de estas áreas se les asignó el valor de EUR promedio de la región geomorfológica para cada fecha. Por último, los datos de EUR para el año 2016 se obtuvieron a partir del promedio 2000-2015.

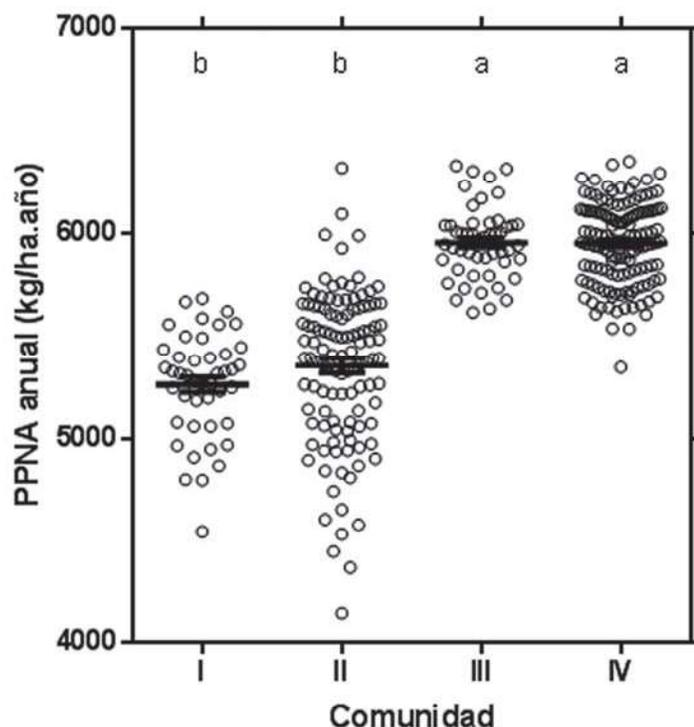
## RESULTADOS

La productividad media anual varió entre 5260 y 5953 kg MS.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> para las comunidades I y IV respectivamente (Figura 1). Las comunidades I y II (ambas de pastizales ralos) no mostraron diferencias significativas entre sí pero resultaron diferentes a las comunidades III y IV (pastizales densos;  $p < 0,001$ ). Estas últimas dos tampoco mostraron diferencias entre sí (Figura 1). Las comunidades de pastizales ralos fueron más variables en el espacio (entre secciones policiales) que las de pastizales densos (Figura 1). El coeficiente de variación espacial fue de 4,7 y 7,0 % para las comunidades I y II (ralos) y de 2,9 y 3,3 % para las III y IV (densos).

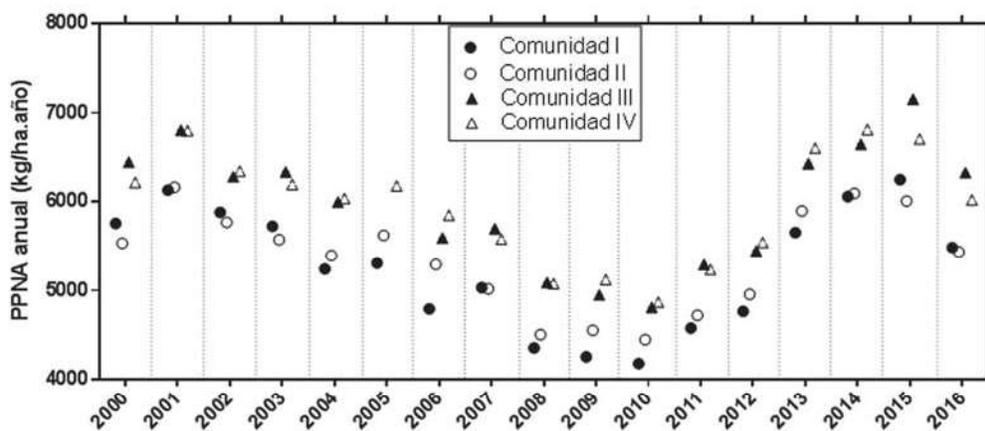
Las diferencias y el orden de las comunidades en cuanto a valores de PPNA anual variaron entre años. Si bien los pastizales densos (comunidades III y IV) siempre tuvieron mayor PPNA que los ralos (comunidades I y II), cuál comunidad dentro de cada tipo presentó valores más altos varió con los años (Figura 2). La figura 3 muestra los patrones regionales de PPNA a nivel de sección policial para las comunidades I y II (pastizales ralos) y III y IV (pastizales densos).

Los valores estacionales de PPNA muestran diferencias importantes y significativas entre comunidades ( $p < 0,05$ ; Figura 4). Excepto para el invierno en donde la comunidad I de pastizales ralos fue la más productiva, los pastizales densos de la comunidad IV presentaron los valores mayores ( $p < 0,05$ ). Las dos comunidades de pastizales tuvieron distinta PPNA solo en invierno y primavera ( $p < 0,05$ ). Las correspondientes a pastizales ralos tuvieron diferencias de PPNA en invierno y verano ( $p < 0,05$ ).

La curva estacional promedio de las distintas comunidades resultó similar debido a la fuerte influencia de la dinámica de la radiación incidente sobre los valores de PPNA (Figura 5; las curvas punteadas no representan un año en



**Figura 1.** Productividad primaria neta aérea anual (PPNA) de cuatro comunidades de pastizal natural de Uruguay. Cada círculo corresponde a la PPNA promedio de una sección policial para el periodo 2000-2016 ( $n=46$ , 115, 52, 135; respectivamente para las comunidades I, II, III y IV). Las líneas indican el promedio general  $\pm$  1 EE. Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).



**Figura 2.** Productividad primaria neta aérea (PPNA) anual de cuatro comunidades de pastizal natural de Uruguay. Cada símbolo corresponde al promedio anual de  $n$  secciones policiales ( $n=46$ , 115, 52, 135; respectivamente para las comunidades I, II, III y IV; no hay datos de la comunidad III en 2005).

particular ya que los valores fueron observados en diferentes años). Se advierten, sin embargo, algunos rasgos distintivos. Por un lado, diferencias en estacionalidad: el coeficiente de variación de los valores promedio mensuales de PPNA

varió entre 0,20 para la comunidad I (menos estacional) y 0,29 para la IV (más estacional). Por otro lado, se observan diferencias en el momento de máxima productividad. Un análisis del momento de ocurrencia de los valores máximos

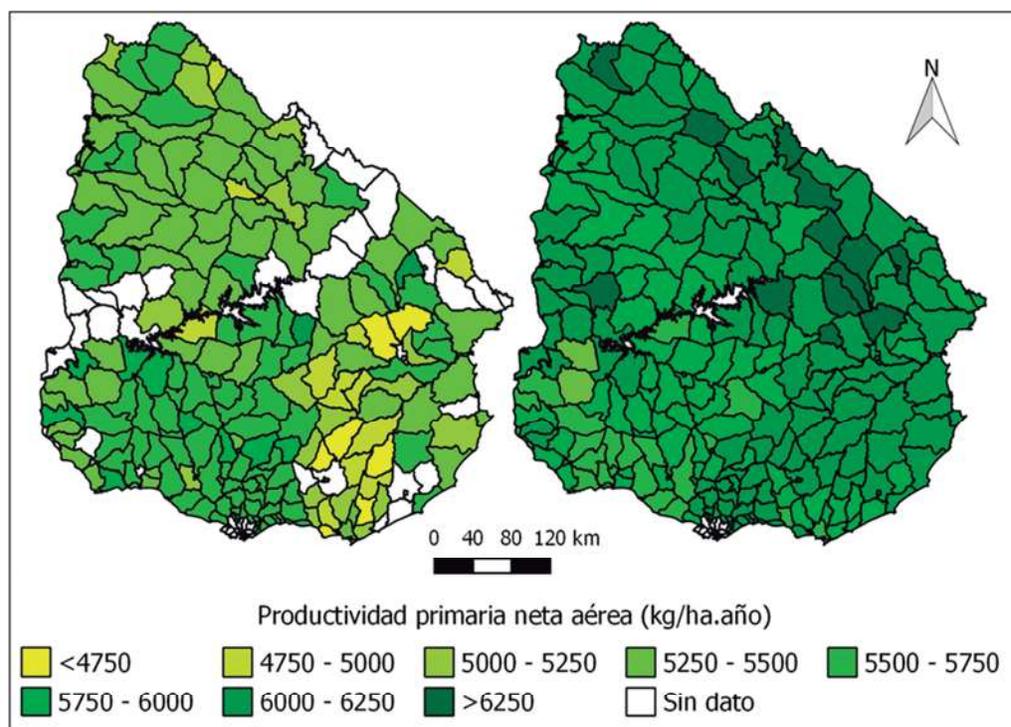


Figura 3. Productividad primaria neta aérea promedio anual (kg/ha.año) de pastizales ralos (izquierda) y densos (derecha) para cada sección policial de Uruguay.

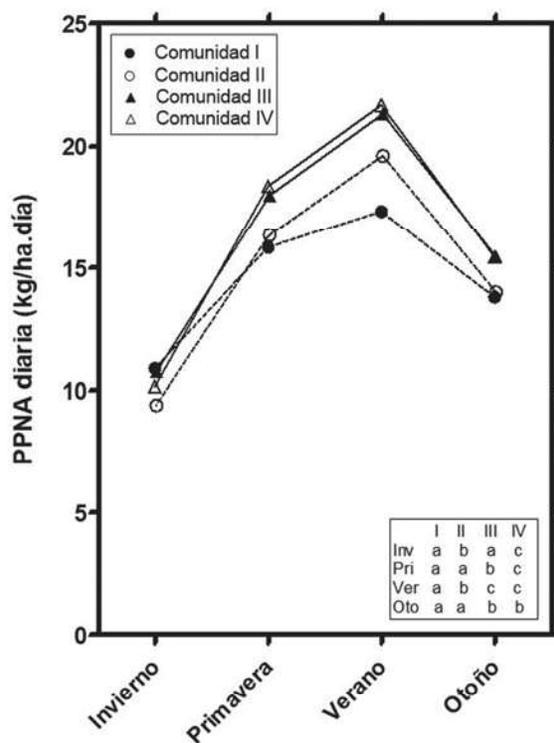
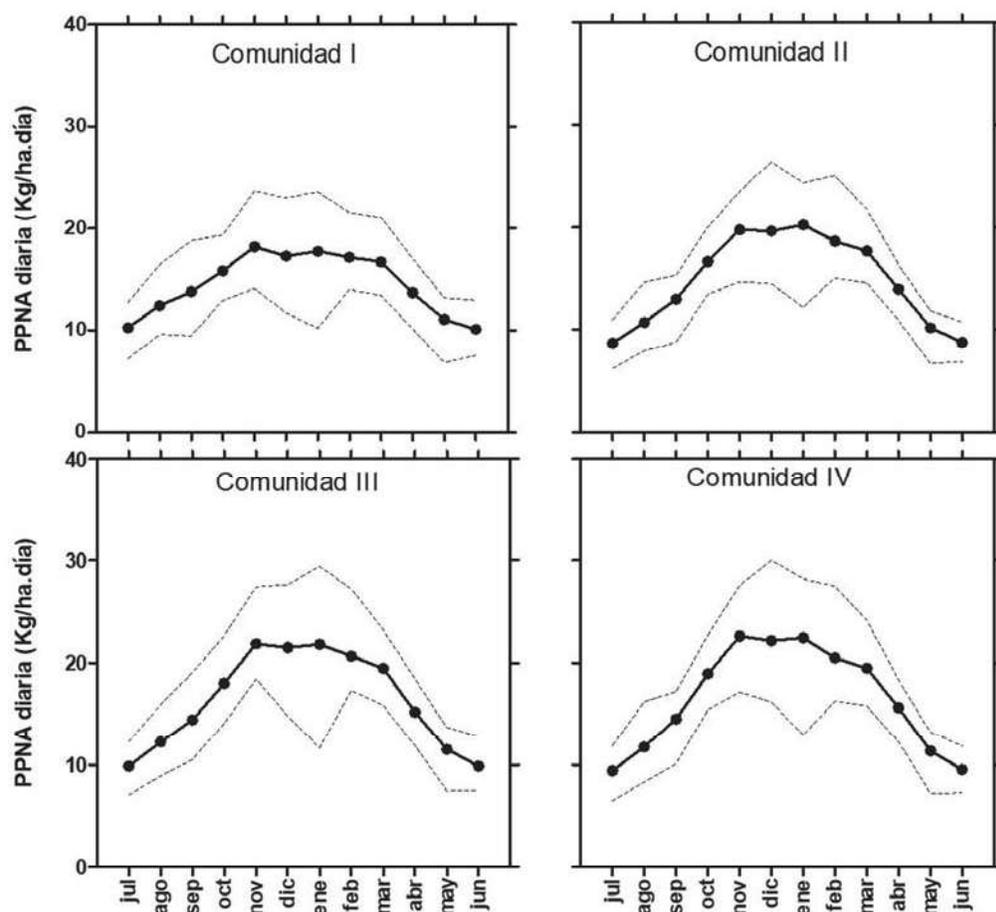


Figura 4. Productividad primaria neta aérea (PPNA) diaria por estación de cuatro comunidades de pastizal natural de Uruguay. Cada símbolo corresponde al promedio 2000-2016 de n secciones policiales (n=46, 115, 52, 135; respectivamente para las comunidades I, II, III y IV). En la tabla, las letras diferentes muestran, para cada estación, diferencias significativas entre comunidades ( $p < 0,05$ ).



**Figura 5.** Productividad primaria neta aérea (PPNA) diaria de cuatro comunidades de pastizal natural de Uruguay a lo largo del año. Las líneas continuas con símbolos muestran la PPNA promedio y las punteadas la PPNA máxima y mínimas, para el período 2000-2016 ( $n=17$ ).

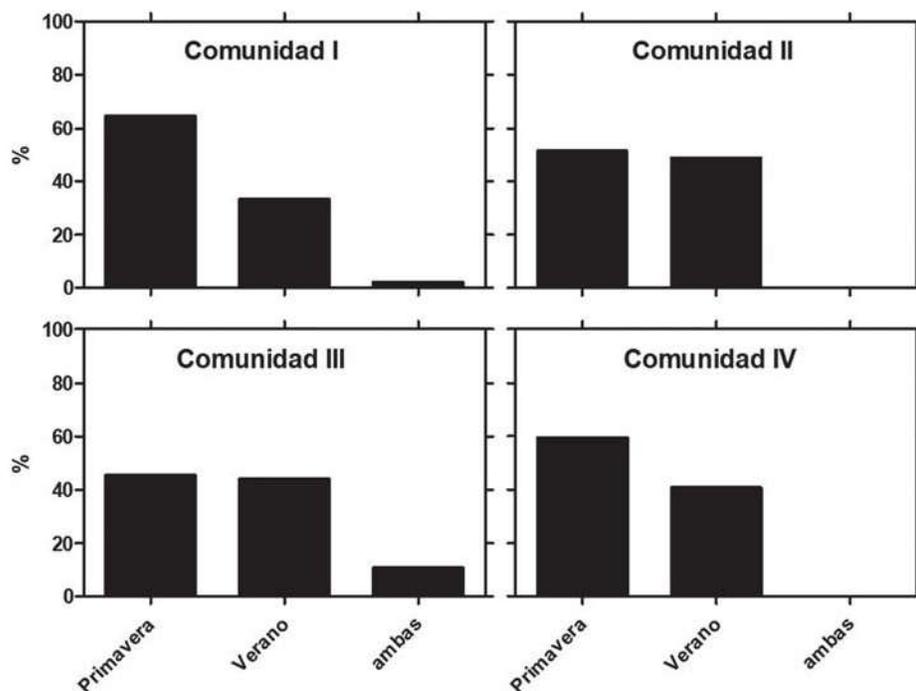
muestra que en el caso de la comunidad II la proporción de años con picos de PPNA en primavera y verano fue muy similar. La comunidad III mostró un comportamiento similar, pero en este caso se observaron en algunos años dos picos anuales. La comunidad I mostró una frecuencia significativamente mayor ( $p<0,005$ ) de años con picos primaverales (Figura 6).

La EUR estimada a partir de valores de PRI derivados de datos MODIS muestra una clara estacionalidad, con valores máximos en junio y julio y mínimos en octubre y noviembre (Figura 7). Este patrón se repite para las áreas ubicadas en distintas regiones. Además de una fuerte variación estacional, la EUR derivada del PRI muestra una importante variación interanual (Figura 8). La EUR a nivel mensual mostró una leve correla-

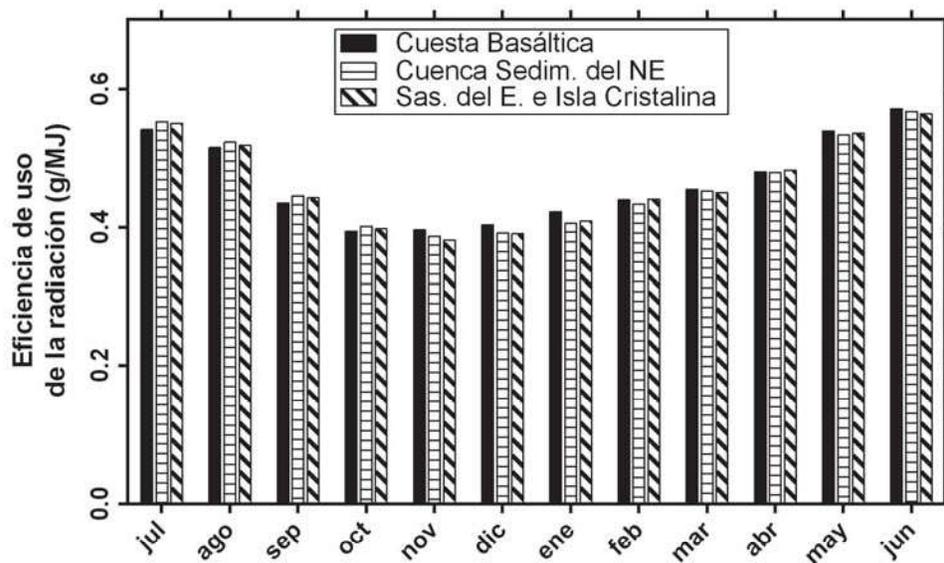
ción negativa con la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por los tejidos verdes ( $fRFAA$ , Figura 9). La intensidad de la correlación negativa fue mayor en el caso de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por los tejidos verdes ( $RFAA$ , Figura 9).

## DISCUSIÓN

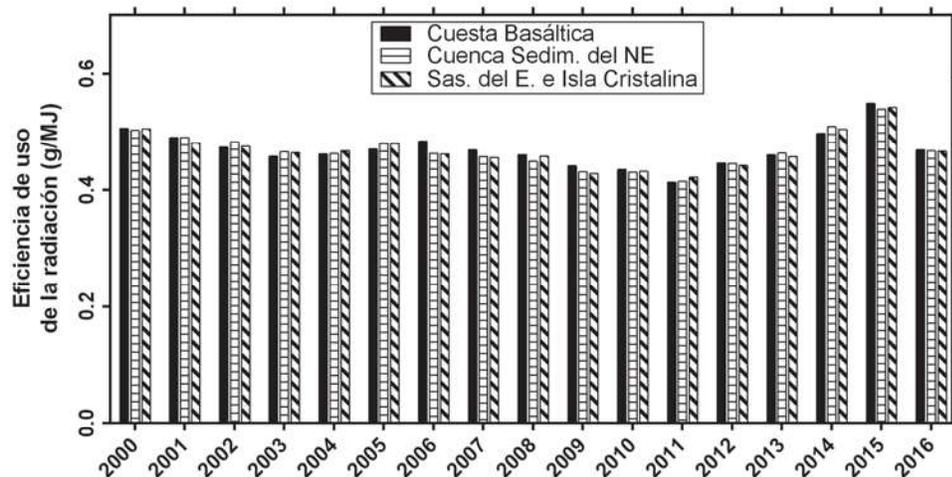
En este capítulo se sintetizan a nivel de todo el territorio uruguayo las diferencias espaciales y temporales en la PPNA de pastizales naturales. A diferencia de estudios previos (Guido *et al.*, 2014, Teixeira *et al.*, 2015) los valores se discriminan por comunidad vegetal según la definición de unidades de pastizal presentada en el Capítulo 1. De las cinco comunidades definidas en ese trabajo se evaluó la



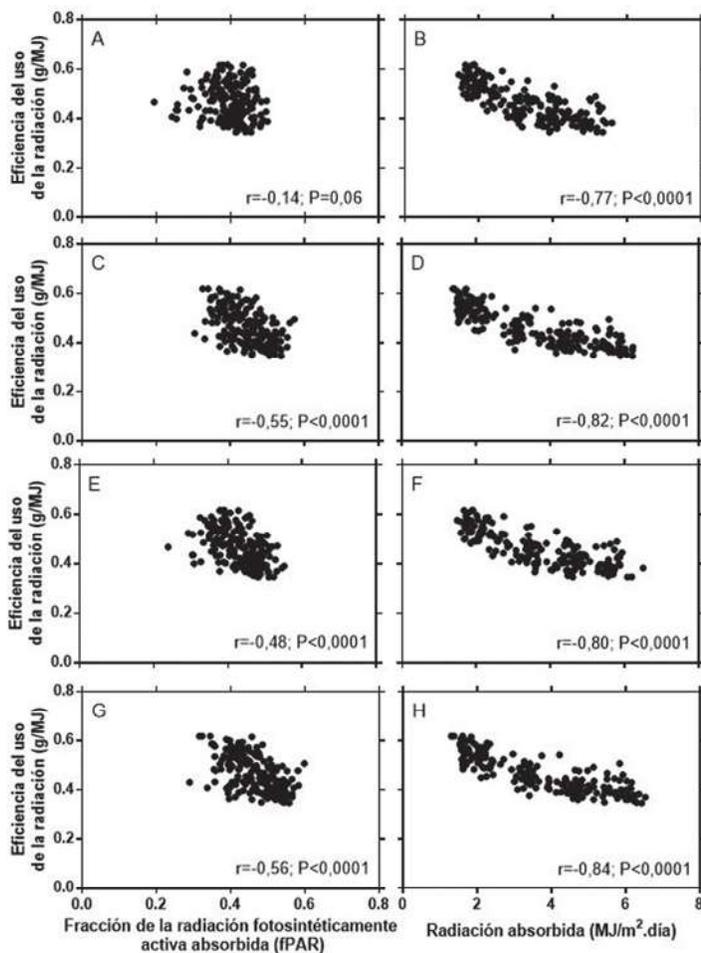
**Figura 6.** Frecuencia relativa (%) de secciones policiales por tipo de comunidad de pastizal natural (n=46, 115, 52, 135; respectivamente para las comunidades I, II, III y IV). Cada columna agrupa a las secciones policiales que tuvieron un pico de productividad primaria neta aérea mayoritariamente en primavera (9 o más años del período 2000-2016 con pico en octubre, noviembre y/o diciembre), en verano (9 o más años del período 2000-2016 con pico en enero, febrero y/o marzo), o en ambas estaciones. La comunidad I tuvo frecuencias en primavera y verano distintas a las esperadas por azar ( $\chi^2$  5,3;  $p=0,02$ ), no así el resto de las comunidades ( $p>0,20$ ).



**Figura 7.** Eficiencia de uso de la radiación de pastizales naturales de tres regiones geomorfológicas de Uruguay a lo largo del año. Cada columna indica la eficiencia promedio (2000-2016) de n pixeles MODIS elegidos en cada región (n=146, 140 y 190; respectivamente en Cuesta Basáltica, Cuenca Sedimentaria del Noreste y Sierras del Este e Isla Cristalina).



**Figura 8.** Eficiencia de uso de la radiación de pastizales naturales de tres regiones geomorfológicas de Uruguay en el período 2000-2016. Cada columna indica la eficiencia anual promedio de  $n$  píxeles MODIS elegidos en cada región ( $n=146$ , 140 y 190; respectivamente en Cuesta Basáltica, Cuenca Sedimentaria del Noreste y Sierras del Este e Isla Cristalina).



**Figura 9.** Relación entre la eficiencia de uso de la radiación (EUR) y la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (fRFAA) o la radiación absorbida (RFAA). Cada símbolo corresponde al promedio para un mes del período 2000-2016 ( $n=192$ ) para las comunidades I (paneles A y B), II (C y D), III (E y F) y IV (G y H). En cada panel se indica el  $r$  de correlación y el valor  $P$ .

PPNA de cuatro de ellas. La restante (Comunidad V, Pastizales altos y densos de *Chascolytrum poomorphum* – *Paspalum pumilum*) se manifiesta en el espacio en áreas de un tamaño tal que impide su evaluación mediante datos MODIS. Las diferencias entre pastizales densos y ralos fueron en promedio del 13%, una diferencia porcentual similar a la reportada por Baeza *et al.* (2011b) para pastizales densos y ralos de la Cuesta Basáltica. Como en ese estudio, las diferencias que aquí se muestran entre comunidades fueron más marcadas y estadísticamente significativas fuera de la estación invernal.

Los resultados presentados destacan diferencias regionales en la PPNA de pastizales densos (Figura 3). Los valores de productividad aumentan de SO a NE reflejando el gradiente de precipitación que se desarrolla en ese espacio geográfico. Las diferencias regionales en los pastizales ralos no se asociaron al gradiente climático sino al tipo al tipo de sustrato, observándose los menores valores promedio en las Sierras del Este e Isla Cristalina.

Las estimaciones de PPNA realizadas en este trabajo presentan una diferencia respecto de trabajos previos (Grigera *et al.*, 2007; Paruelo *et al.*, 2011; Durante *et al.*, 2017), también basadas en el uso del modelo de Monteith (1972): los valores de EUR fueron variables en el tiempo. La variabilidad temporal (tanto estacional como interanual) fue estimada con el índice PRI (*Photochemical Reflectance Index*), calculado a partir de bandas MODIS. Tanto los cambios estacionales como entre años fueron muy marcados. Respecto del mínimo estacional (en primavera tardía), la EUR resultó un 46% más alta en el invierno (Figura 7). Los valores máximos de EUR se observaron cuando el nivel de radiación fue mínimo. Los cambios estacionales observados son similares a las variaciones en valores de EUR calculados a partir de datos de cortes de biomasa (ver Paruelo *et al.*, 2010).

La correlación negativa entre EUR (estimada a partir del PRI) y la radiación absorbida por los tejidos verdes (estimada a partir del EVI y la radiación inciden-

te, Figura 9) sugiere una influencia importante de la disponibilidad del recurso (radiación) sobre la eficiencia de uso. La EUR disminuye marcadamente cuando los valores de radiación son altos y la magnitud de los déficits nutricionales e hídricos son mínimos (primavera tardía).

Los cambios estacionales en EUR tienen consecuencias muy importantes sobre la estimación de la PPNA. Considerar una EUR constante a lo largo del año genera valores 17% menores en invierno y más de 20% mayores en primavera que cuando la EUR se considera variable. La relación entre la máxima y mínima PPNA mensual pasa de 3,4 a 2,3. Las mediciones a campo de PPNA muestran relaciones entre valores máximos y mínimos de 2, o menores (Altesor *et al.*, 2005). Respecto del año con menor EUR promedio (2009) aquel que registró el máximo tuvo un valor 25% mayor. Usar un valor constante de EUR genera sobre y subestimaciones de la PPNA que varían entre -9 y 15%.

A diferencia de lo observado en la dimensión temporal, los valores de EUR resultaron similares entre áreas de pastizales de distintas regiones geomorfológicas. Esto destaca la influencia de factores climáticos. Si bien esto se condice con la ausencia de diferencias significativas entre los valores de EUR de pastizales densos y ralos presentada en el Capítulo 8, las diferencias espaciales y entre tipos de recursos pueden resultar de problemas metodológicos. Por un lado, y cómo se señala en el Capítulo 8, las estimaciones de EUR derivadas de cortes de biomasa a campo tienen una gran variabilidad y desajustes en la escala de las estimaciones de PPNA y de radiación absorbida. Por otro lado, las estimaciones de EUR derivadas de datos del sensor MODIS, dada la resolución espacial de estos, impide percibir diferencias asociadas a comunidades. Sin duda, la evaluación a campo de las diferencias espaciales de EUR asociadas a comunidades o tipos de recursos forrajeros es uno de los aspectos a trabajar para mejorar las estimaciones de PPNA a partir de sensores remotos.

## AGRADECIMIENTOS

El CONICET patrocinó a M. Oyarzabal mediante una beca posdoctoral. Este trabajo fue financiado por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (FPTA 305), la Universidad de Buenos Aires (0265BA 2014-2017) y el Inter-American Institute for Global Change Research (IAI; CRN3095; Bridging Ecosystem Services and Territorial Planning BEST-P: A southern South American initiative; el cual es a su vez financiado por US National Science Foundation-Grant GEO-1128040). Mucho agradecemos a Luciana Staiano, Facundo Della Nave, Paula Galansino y Lucas Suad por colaborar en la elaboración y manejo de la base de datos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 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 (1), 83-91.
- BAEZAS, LEZAMA F, PIÑEIRO G, ALTESOR A, PARUELO JM.** 2010. Spatial variability of above-ground net primary production in Uruguayan grasslands: a remote sensing approach. *Applied Vegetation Science*, 13(1): 72-85.
- BAEZA S, PARUELO JM, AYALA W.** 2011a. Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria en recursos forrajeros de Sierras y Lomas del Este. *Agrociencia Uruguay*, 15(2): 48-59.
- BAEZAS, GALLEGOF, LEZAMA F, ALTESOR A, PARUELO JM.** 2011b. Cartografía de los pastizales naturales en las regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas. En: Altesor A, Ayala W, Paruelo JM [Eds.]. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Serie FPTA-INIA 26. pp 33-54.
- DURANTE M, PIÑEIRO G, IRISARRI JGN, OESTERHELD M.** 2017. Primary Production of Lowland Natural Grasslands and Upland Sown Pastures Across a Narrow Climatic Gradient. *Ecosystems*, 20:543-552.
- GAMON JA, PEÑUELAS J, FIELD CB.** 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41:35-44.
- GARBULSKY MF, PEÑUELAS J, OURCIVAL JM, FILELLA I.** 2008. Estimación de la eficiencia del uso de la radiación en bosques mediterráneos a partir de datos MODIS. Uso del Índice de Reflectancia Fotoquímica (PRI). *Ecosistemas* 17:89-97.
- GOLLUSCIO RA, DEREGIBUS VA, PARUELO JM.** 1998. Sustainability and range management in the Patagonian steppes. *Ecología Austral*, 8:265-284.
- GOLLUSCIO R.** 2009. Receptividad ganadera: marco teórico y aplicaciones prácticas. *Ecología Austral*, 19: 215-232.
- GRIGERAG, OESTERHELD M, PACÍN F.** 2004. Monitoring forage production with MODIS data for farmers' decision making. MODIS Vegetation Workshop II
- GRIGERAG, OESTERHELD M, PACÍN F.** 2007. Monitoring forage production with MODIS data for farmers' decision making. *Agricultural Systems*, 94:637-648.
- GUIDO A, VARELA RD, BALDASSINI P, PARUELO JM.** 2014. Spatial and Temporal Variability in Aboveground Net Primary Production of Uruguayan Grasslands. *Rangeland Ecology and Management*, 67(1): 30-38.
- MCNAUGHTON SJ, OESTERHELD M, FRANK DA, WILLIAMS KJ.** 1989. Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature*, 341: 142-144.
- MONTEITH J.** 1972. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9:747-766.
- 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: Altesor A, Ayala W, Paruelo JM [Eds.]. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Serie FPTA-INIA 26. pp 113-119.
- OESTERHELD M, SALA OE, MCNAUGHTON SJ.** 1992. Effect of Animal Husbandry on Herbivore-Carrying Capacity at a Regional Scale. *Nature*, 356: 234-236.

- OYARZABAL M, OESTERHELD M, GRIGERA G.** 2011. ¿Cómo estimar la eficiencia en el uso de la radiación mediante sensores remotos y cosechas de biomasa? En: Altesor A, Ayala W, Paruelo JM [Eds.]. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Serie FPTA-INIA 26. pp 121-133.
- PARUELO JM, OYARZABAL M, OESTERHELD M.** 2011. El Seguimiento de los recursos forrajeros mediante sensores remotos: bases y aplicaciones. En: Altesor A, Ayala W, Paruelo JM [Eds.]. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Serie FPTA-INIA 26. pp 135-145.
- PARUELO JM, TEXEIRA M, STAIANO L, MASTRÁNGELO M, AMDAN L, GALLEGO F.** 2016. An integrative index of Ecosystem Services provision based on remotely sensed data. *Ecological Indicators*, 71: 145-154.
- PIÑEIRO 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.
- RICHMOND A, KAUFMANN RK, MYNENI RB.** 2007. Valuing ecosystem services: A shadow price for net primary production. *Ecological Economics*, 64(2): 454-462.
- RUNNING SW, NEMANI RR, HEINSCH FA, ZHAO M, REEVES M, HASHIMOTO DH.** 2004. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 54:547-560.
- TEXEIRA M, OYARZABAL M, PIÑEIRO G, BAEZA S, PARUELO JM.** 2015. Land cover and precipitation controls over long-term trends in carbon gains in the grassland biome of South America. *Ecosphere*, 6(10): 196.