

Variación temporal de la productividad primaria neta aérea de un pastizal de la
Depresión de Laprida y su relación con la precipitación

*Trabajo final presentado para optar al título de
Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio
de los recursos naturales y la producción agropecuaria*

Pablo Paparelli

Ingeniero agrónomo - Universidad Nacional de La Pampa - 2005

Lugar de trabajo: Solum Agrotecnología – Carlos Casares



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

TUTOR

Tutor

Mariano Oyarzabal

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO DE TRABAJO FINAL

Jurado

Pablo Baldassini

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Jurado

María Mercedes Vassallo

Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)

Doctora en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Fecha de defensa del Trabajo Final: 11 de diciembre de 2020

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 esta u otra institución.

P. Paparelli

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mi tutor, Mariano Oyarzabal, por sus contribuciones y sus correcciones, incansables.

A mis compañeros de cohorte por su compañía, especialmente a Sol, Carolina, Andrés, Marcos, Bernardo, Tomás, Luis y Juan.

A mi amigo y socio, Gonzalo, por el apoyo y reemplazarme en mis tareas para que pueda hacer esta especialización.

A todos los profesores, por hacer de esta especialización una grata experiencia formativa.

A mis padres, por apoyarme siempre.

Y muy especialmente a Florencia, Camilo y Emilia, mis compañeros de vida.

Variación temporal de la productividad primaria neta aérea de un pastizal de la Depresión de Laprida y su relación con la precipitación.

Resumen. La productividad primaria neta aérea (PPNA) es la principal determinante de la disponibilidad de forraje para el ganado. Es importante conocer y predecir su variabilidad temporal para un adecuado manejo de los recursos forrajeros. Este trabajo exploró la dinámica de la PPNA mensual y el control que ejerce la precipitación sobre su variación estacional e interanual. Los datos de PPNA fueron estimados con un modelo lineal empírico que utiliza como variable la radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA). La RFAA utilizada en el modelo se derivó de información satelital del sensor MODIS. Se generó una serie de 18 años de PPNA mensual de un pastizal de la Depresión de Laprida, provincia de Buenos Aires. La PPNA tuvo una marcada estacionalidad. En invierno, la PPNA mensual mínima fue de 205 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹, y la máxima fue de 411 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹. En primavera, la PPNA mensual mínima fue de 282 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹ y la máxima de 682 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹. En verano, la PPNA mensual mínima fue de 250 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹ y la máxima fue de 633 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹. En otoño, la PPNA mensual mínima fue de 195 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹, y la máxima de 432 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹. La variabilidad interanual de la PPNA media mensual fue mínima en julio (CV=7,7%) y máxima en noviembre (CV=22%). La PPNA anual varió entre 3425 a 4687 kg de MS ha⁻¹.año⁻¹, el promedio fue de 4208 kg de MS ha⁻¹.año⁻¹. Esta variabilidad interanual estuvo positivamente asociada a la precipitación acumulada desde abril a octubre ($R^2 = 0,60$; valor $p < 0,05$). Dentro de cada año, la PPNA de invierno estuvo positivamente asociada a la precipitación de otoño ($R^2 = 0,68$; valor $p < 0,05$), y la PPNA de primavera a la precipitación de invierno ($R^2 = 0,53$; valor $p < 0,05$). En cambio, la PPNA de verano y de otoño no estuvieron asociadas a la precipitación. En síntesis, la PPNA anual, invernal y primaveral podrían predecirse a partir de la precipitación, no así la PPNA de verano y otoño.

Palabras clave: productividad primaria neta aérea, variabilidad temporal, precipitación, sensores remotos; pastizal halófito.

Temporal variation in aboveground net primary production of a grassland and its association with rainfall in Depresión de Laprida

Summary. Aboveground net primary production (ANPP) is the main determinant of the forage availability for livestock. Thus, it is important to know and predict its temporal variability for an adequate forage management. This work explored the dynamics of the monthly ANPP and the control that precipitation exerts on its seasonal and interannual variation. The ANPP data were estimated with an empirical linear model using photosynthetically active absorbed radiation (APAR) as a variable. The APAR used in the model was derived from satellite information from the MODIS sensor. An 18-year series of monthly ANPP was generated from a grassland in Depresión de Laprida, Buenos Aires province, was used. The ANPP had a marked seasonality. In winter, the minimum monthly PPNA was 205 kg MS ha⁻¹.month⁻¹, and the maximum was 411 kg MS ha⁻¹.month⁻¹. In spring, the minimum monthly PPNA was 282 kg of MS ha⁻¹.month⁻¹ and the maximum was 682 kg of MS ha⁻¹.month⁻¹. In summer, the minimum monthly PPNA was 250 kg of MS ha⁻¹.month⁻¹ and the maximum was 633 kg of MS ha⁻¹.month⁻¹. In autumn, the minimum monthly PPNA was 195 kg of MS ha⁻¹.month⁻¹, and the maximum was 432 kg of MS.ha⁻¹.month⁻¹. The interannual variability of the monthly mean PPNA was maximum in November (CV=22%) and minimum in July (CV=7,7%). Annual PPNA varied in range from 3425 to 4687 kg of MS ha⁻¹.year⁻¹, with an average value of 4208 kg of MS ha⁻¹.year⁻¹. Annual ANPP was positively associated with accumulated precipitation from April to October ($R^2 = 0,60$; p value<0,05). Winter ANPP was positively associated with the autumn precipitation ($R^2 = 0,71$; p value<0.05), and spring ANPP with the winter precipitation ($R^2 = 0,52$; <p value0.05). In contrast, both summer and autumn ANPP were not associated with precipitation. In summary, it is possible to predict annual, winter and spring ANPP, but not summer and autumn ANPP.

Keywords: aboveground net primary production; temporal variability; precipitation; remote sensing; halophytic grassland.

Índice

Introducción.....	1
Materiales y métodos.....	3
Resultados.....	7
Discusión.....	10
Conclusiones.....	13
Bibliografía.....	14

Introducción

La productividad primaria neta aérea (PPNA) es una variable integradora del funcionamiento de sistemas pastoriles (McNaughton et al., 1989). La PPNA representa la nueva biomasa generada por las plantas por unidad de espacio y tiempo (Oesterheld et al., 2014). En sistemas pastoriles, la PPNA constituye la principal fuente de energía del ganado, determina la disponibilidad de forraje y controla la productividad secundaria (Holechek, 1989; McNaughton et al., 1989; Oesterheld et al., 1992; Baeza et al., 2011;). Disponer de estimaciones precisas de PPNA permite elaborar balances forrajeros y asignar con mayor exactitud el forraje disponible, de manera de evitar el deterioro de los recursos forrajeros (Golluscio, 2009; Irisarri et al., 2013; Oesterheld et al., 2014). En este sentido, una característica clave es la variación entre estaciones y años. Conocer esta variabilidad reduce la incertidumbre de la disponibilidad de forraje en sistemas pastoriles (Paruelo et al., 1999a).

En general, la PPNA de pastizales naturales tiene una alta variabilidad espacial y temporal. Una parte importante de esa variación ha sido relacionada a las precipitaciones. La variabilidad espacial a nivel regional está lineal y positivamente asociada con la precipitación anual (Sala et al., 1992; Paruelo et al., 1999b; Oesterheld et al., 2014; Durante et al., 2016). Entre años, la variabilidad de la PPNA de un sitio tiene un control menos claro por parte de la precipitación (McNaughton, 1985, Oesterheld et al., 1999, 2001; Paruelo et al., 1999b). Lauenroth y Sala (1992), hallaron para un pastizal de Norte América, que el modelo temporal en función de la precipitación anual explicó la variabilidad de la PPNA anual con pendiente menor que el modelo espacial. La variación entre años y entre estaciones parece tener relaciones de mayor complejidad con la precipitación. Fabricante et al., (2009), en estepas de la Patagonia, hallaron a la PPNA anual poco relacionada con la precipitación anual, pero sí con las precipitaciones de cortos periodos ocurridas en la temporada de crecimiento anterior. Oesterheld et al. (2001), en pastizales de la región central de Estados Unidos, encontraron mayor capacidad explicativa de la variación interanual de la PPNA anual al incluir en los modelos la precipitación del año en curso y la del anterior. La variación temporal parece estar regulada, en parte, por un efecto de retraso del crecimiento de las plantas en respuesta a precipitaciones pasadas (Paruelo et al., 1999b).

La utilización de sensores remotos ha removido problemas asociados a las estimaciones de PPNA mediante cortes. Las estimaciones de PPNA mediante cortes presentan dificultades para generar datos lo suficientemente representativos de la gran variabilidad espacial y temporal que posee la PPNA. Este método basa sus estimaciones en cosecha sucesivas de material de pequeñas áreas con restricción del pastoreo en parcelas o con jaulas. Para que estas estimaciones sean representativas se deben hacer numerosas repeticiones; esto hace al proceso costoso y laborioso (Golluscio et al., 1998; Baeza et al., 2011; Oesterheld et al., 2014). La estimación de la PPNA basada en sensores remotos, por la amplia cobertura espacial y temporal que tienen, resuelve la complejidad de generar relevamientos representativos. La aplicación del modelo de Monteith (1972) ha posibilitado hacer estimaciones precisas de PPNA. Además, este método no requiere generar restricción de pastoreo. En la bibliografía se encuentran numerosos estudios sobre PPNA basados en la utilización de sensores remotos y en particular los que han utilizado datos provistos por el sensor MODIS (Grigera et al., 2007a, 2007b; Paruelo et al., 2008; Irisarri et al., 2013; Pacín y Oesterheld, 2015; Durante et al., 2016). Este sensor posee moderada resolución espacial, revisita diaria y datos desde febrero del año 2000 hasta el presente. Estas características permiten realizar estimaciones periódicas a escala de lote y realizar análisis de condiciones

productivas pasadas hasta prácticamente el presente (Grigera et al., 2007a, 2007b). Así, se resuelve una de las mayores dificultades en el estudio de la variación temporal de la PPNA, que es la disponibilidad de series temporales largas (Fabricante et al., 2009).

La Depresión de Laprida es una región de la provincia de Buenos Aires con importancia ganadera. Ocupa el 7% de la superficie provincial y posee aproximadamente 10% del total de cabezas de bovinos de la provincia (Dillon, 2019). La actividad agropecuaria predominante es la cría bovina, ocupando el 63% de la superficie productiva de la región (Recavarren, 2016). Los recursos forrajeros utilizados por esta actividad, en su mayor proporción, están constituidos por pastizales naturales (Batista et al., 2005; Oyarzabal et al., 2018) y agropiro alargado naturalizado (Recarraven, 2016). Estos sistemas sufren importantes variaciones en su producción secundaria por la variación temporal de la PPNA (Vecchio et al., 2008; Irisarri et al., 2013). Mejorar el entendimiento de la variación temporal de la PPNA de los pastizales naturales de la región permite la mejora en las pautas de manejo agronómico de estos sistemas pastoriles (Paruelo et al., 1999a). Se plantean dos preguntas en relación a la variación temporal: 1) ¿Qué relación hay entre la PPNA estacional y anual con la precipitación? y 2) ¿Es posible generar modelos de pronóstico de la PPNA en base a la precipitación? Para responder estas preguntas, este trabajo propone como objetivos: 1) Caracterizar la dinámica estacional y anual de la PPNA; 2) evaluar la variación temporal de la PPNA anual y estacional en relación con las precipitaciones.

Materiales y métodos

El estudio se realizó sobre lotes correspondientes a establecimientos ubicados en la zona de la Provincia de Buenos Aires conocida como Depresión de Laprida. Esta región se caracteriza por la predominancia de áreas deprimidas, plano-cóncavas, en las cuales se presentan suelos con fuertes limitaciones en el drenaje, condición que, asociada al clima templado húmedo, favorece el desarrollo de procesos de halomorfismo e hidromorfismo (Batista et al., 2005). Los suelos predominantes son del tipo Natrudoles y Natracualfes, los cuales poseen limitaciones por sodicidad y salinidad. Regionalmente se desarrolla una costra de carbonato cálcico (tosca) a moderada profundidad que limita la exploración radical (GeoINTA). El sitio de estudio queda comprendido en la unidad de vegetación denominada pradera de higrófitas y estepa de halófitas (Pampa Deprimida), que está conformada por un complejo de comunidades asociadas a características edáfico-topográficas (Batista et al., 2005). Los sitios de estudio se ubican en posiciones bajas de áreas planas o circundantes a ambientes lénticos. El recurso forrajero es denominado pastizal natural, y está principalmente constituido por especies nativas, como *Sporobolus pyramidatus*, *Hainardia cylindrica*, *Hordeum stenostachys*, *Lepidium parodii*, *Spartina densiflora*, *Sesuvium portulacastrum*, *Sarcocornia ambigua*, *Stipa formicarum* y *Distichlis spicata* (Oyarzabal et al., 2018; Batista et al., 2005). Además, este ecosistema tiene a *Thinopyrum ponticum* (agropiro alargado) como especie naturalizada. La precipitación media anual promedio es 935 mm (2001-2018), con una distribución anual con dos máximos, uno en primavera y otro en otoño. El invierno presenta las mínimas precipitaciones, particularmente durante el mes de junio. La temperatura media máxima mensual es de 22,5° C y ocurre en enero y la mínima de 6,7° C en julio.

Para la caracterización de la PPNA se seleccionaron 210 sitios, los cuales se encuentran distribuidos en 30 lotes que presentan la misma cobertura vegetal de pastizal natural. Los lotes pertenecen a 3 establecimientos (Figura 1). Cada sitio de estimación se corresponde con un píxel MODIS de la escena H13V12. Estos píxeles se seleccionaron considerando que cumplieren las condiciones de abarcar más de 90 % de cobertura dentro del lote, sin presencia de lagunas permanentes, montes, o infraestructura con superficie mayor al 10 % del píxel.

La estimación de la PPNA se realizó aplicando el modelo lineal empírico propuesto por Grigera (2003) y Oyarzabal (comunicación personal) que utiliza la ecuación:

$$PPNA = 0,545 + 0,323 * RFAA$$

Donde PPNA es la productividad primaria neta aérea, expresada en g.m².día⁻¹ y RFAA es la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación como MJ.m⁻².día⁻¹.

La radiación fotosintéticamente activa absorbida es el resultado del producto entre la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA) y la fracción (fRFA) de esta, que es interceptada por la cubierta vegetal;

$$RFAA = RFA * fRFA$$

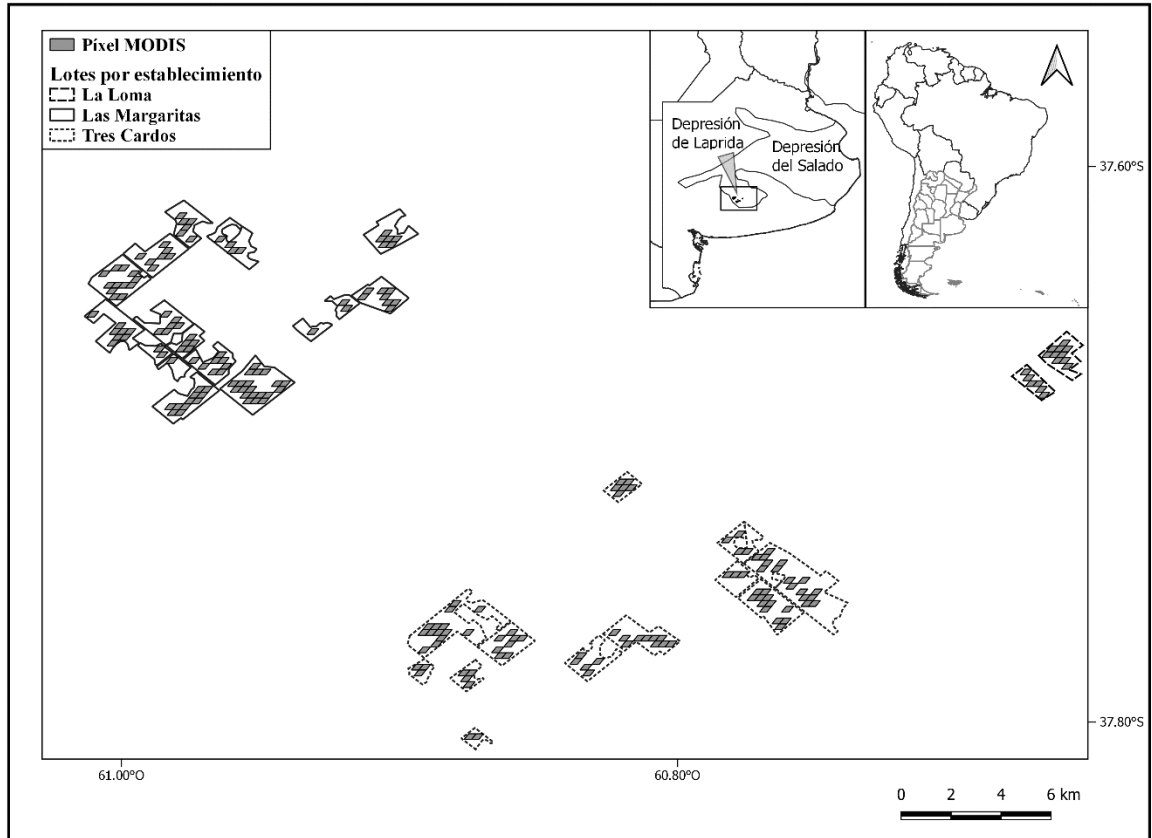


Figura 1: Mapa de la zona de estudio, representando los 30 lotes agrupados por establecimiento. Dentro de cada lote, en gris, se muestran los píxeles MODIS utilizados para estimar productividad primaria neta aérea.

Para la estimación de la radiación fotosintéticamente activa se utilizaron valores de radiación total incidente publicados por NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) (disponible en <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>) a los que se los multiplicó por un factor de 0,48 para convertirlos en radiación fotosintéticamente activa (McCree, 1972; Blackburn y Proctor, 1983). Los datos de radiación total incidente poseen una resolución espacial de 0,5°, quedando comprendidos en dicha área todos los sitios de estimación de PPNA. La resolución temporal de estos datos es diaria. Para realizar la estimación de PPNA se promediaron los valores de 16 días de radiación fotosintéticamente activa. Los periodos de 16 días se corresponden con los de la información satelital de MODIS.

La fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada se estimó con información satelital proveniente del sensor MODIS-TERRA. Se utilizó el índice de vegetación mejorado (EVI del inglés, Enhanced Vegetation Index) (Huete et al., 2002), del producto MOD13Q1.006 (disponible en <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>). El cálculo de EVI corresponde a la fórmula:

$$EVI = 2.5 * (IR-R) / (IR+6 * R-7.5 * A+1)$$

Donde A, R e IR corresponden a las reflectancias en la porción del azul (459-479 nm), del rojo (620-670 nm) y del infrarrojo cercano (841-876 nm) del espectro electromagnético, respectivamente. Los coeficientes incluidos en la fórmula minimizan el efecto de contaminantes de la atmósfera, y desacoplan la señal del suelo y la vegetación, mejorando la señal de ésta. MOD13Q1.006, es un producto sintético, con correcciones atmosféricas y por calidad de la observación, que conforma la mejor observación de un periodo de 16 días, definiendo 23 datos de EVI por año para cada píxel con una resolución espacial de 231 metros (~5 ha). La estimación de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada se realizó como una función lineal de EVI de MODIS, la cual se encuentra calibrada para la región (Oyarzabal com. pers.). La relación se encuentra parametrizada asignando absorción nula ($fRFA=0$) a valores de $EVI \leq 0,016$; correspondiente a píxeles sin cobertura vegetal (suelo desnudo o peladares) y para píxeles con alta cobertura vegetal, se fija un valor máximo de $fRFA=0,95$ correspondiente a los valores de $EVI \geq 0,84$.

Las estimaciones de PPNA fueron convertidas a valores mensuales. La PPNA diaria estimada para cada fecha del producto MOD13Q1.006 se asignó a todo el período de 16 días y luego se obtuvo la PPNA mensual por la suma de la PPNA diaria. Las unidades de expresión utilizadas son kg de $MS\ ha^{-1}.mes^{-1}$. Los valores mensuales de los 210 sitios de estimación se agruparon por lote correspondiente y se promediaron, obteniéndose la PPNA media mensual por lote.

Con los valores de PPNA media mensual por lote se generaron dos series de datos, la PPNA media mensual del conjunto total de lotes y la PPNA media mensual de los lotes coincidentes con la resolución espacial de los datos precipitación. Las dos series corresponden al periodo julio de 2000 a junio de 2018. Para estudiar la variación temporal de la PPNA se generaron series acumulando valores de medias mensuales. Los acumulados de julio a junio se llamaron PPNA anual mientras que los acumulados de tres valores mensuales se denominaron PPNA estacional, conformando la PPNA de invierno los meses de julio a septiembre, primavera de octubre a diciembre, verano, de enero a marzo y otoño, de abril a junio.

Las precipitaciones fueron obtenidas del producto 3B43 de la Misión de Mediciones de Lluvias Tropicales (TRMM, Tropical Rainfall Measuring Mission, en inglés) (disponible en <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). El producto provee valores de precipitación media mensual con una resolución espacial de $0,25^\circ$, aproximadamente 62.500 hectáreas, expresados en milímetros por hora (mm/hr), y se convirtieron a mm/mes. El área de estudio quedó comprendida por 4 píxeles TRMM. La precipitación acumulada anual no fue diferente entre los píxeles (valor $p = 0,93$). Entonces, se utilizó un dato promedio de los 4 píxeles para el periodo abril de 2000 a junio de 2018.

Las precipitaciones medias mensuales se agruparon para generar series acumuladas, de 1 a 12 meses, desde julio, hasta obtener la precipitación anual y trimestrales para obtener las estacionales, quedando invierno (julio-septiembre), primavera (octubre-diciembre), verano (enero-marzo) y otoño (abril-junio).

Para evaluar la variabilidad entre años de la PPNA anual se ajustaron regresiones lineales con las diferentes series de precipitación acumulada de 1 a 12 meses, anual del año en curso más la del año anterior y la acumulada de 1 a 12 meses más otoño del año anterior. Para

estudiar la variación entre años de la PPNA estacional, las regresiones se hicieron con la precipitación de la estación de crecimiento actual, de la estación anterior y estaciones combinadas, actual más anterior. Se seleccionaron los modelos de regresión significativos y con un mayor coeficiente de determinación (R^2).

Resultados

La PPNA mensual mostró una marcada estacionalidad. En invierno, la PPNA mensual mínima fue de 205 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹, y la máxima fue de 411 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹. La PPNA acumulada mínima fue de 682 kg de MS ha⁻¹.estación⁻¹, mientras que la máxima fue de 1027 kg de MS ha⁻¹.estación⁻¹. En primavera, la PPNA mensual mínima fue de 282 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹ y la máxima de 682 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹. La PPNA acumulada mínima fue de 955 kg de MS ha⁻¹.estación⁻¹, y la máxima de 1735 kg de MS ha⁻¹.estación⁻¹. En verano, la PPNA mensual mínima fue de 250 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹ y la máxima fue de 633 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹. La PPNA acumulada tuvo una mínima de 899 kg de MS ha⁻¹.estación⁻¹ y una máxima de 1436 kg de MS ha⁻¹.estación⁻¹. En otoño, la PPNA mensual mínima fue de 195 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹, y la máxima de 432 kg de MS ha⁻¹.mes⁻¹. La PPNA acumulada mínima fue de 695 kg de MS ha⁻¹.estación⁻¹, y la máxima de 1036 kg de MS ha⁻¹.estación⁻¹. El patrón general mensual de la PPNA mostró, con mayor frecuencia, una distribución bimodal. En 14 de los 18 años de la serie ocurrieron dos picos, uno primaveral y otro verano-otoñal. El máximo mensual fue en 7 años el pico de primavera, en 3 años el pico de verano-otoño y en 4 años no hubo diferencias. Los restantes 4 años de la serie mostraron un único pico primavera-estival. (Figura 2).

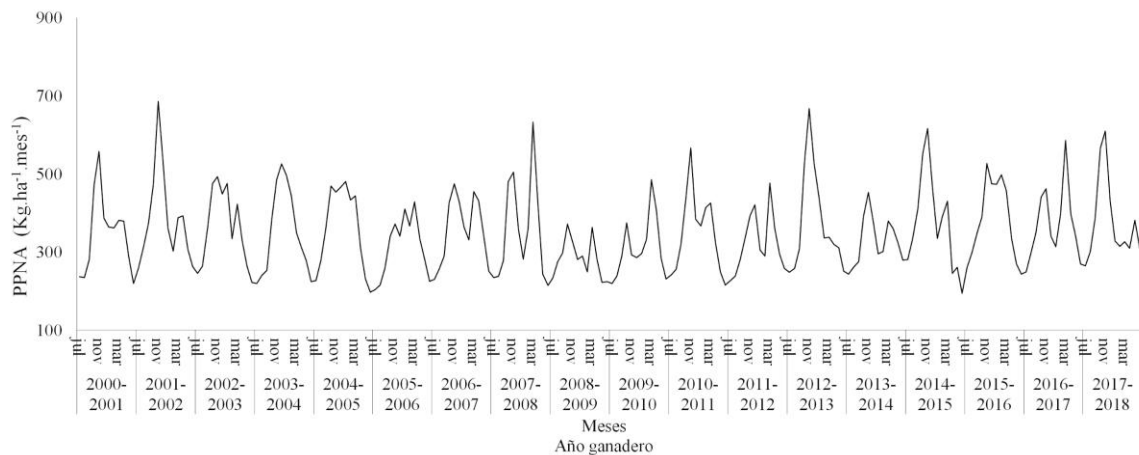


Figura 2: Dinámica de la PPNA media mensual de un pastizal natural de la Depresión de Laprida, en el período julio de 2000 - junio de 2018. La curva corresponde al promedio de las estimaciones de PPNA de 30 lotes.

La variabilidad interanual de la PPNA media mensual fue mínima en julio (7,7%) y máxima en noviembre (22%). La dinámica mensual tuvo una marcha ascendente continua desde el mes de julio (mínimo) hasta el mes de noviembre (máximo). El período noviembre a marzo mostró los mayores valores de coeficiente de variabilidad, oscilando entre 17,3 y 22%. A partir de marzo (CV=18,5%) se observó una marcha decreciente de la variabilidad hasta junio (CV=12,5%). (Figura 3)

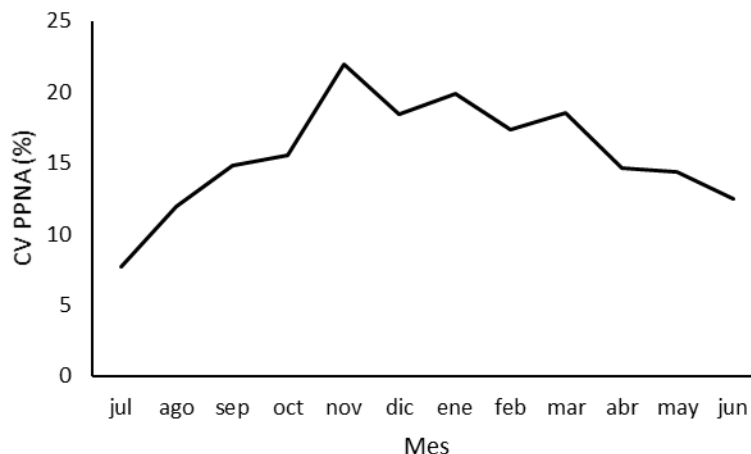


Figura 3: Dinámica mensual de la variación interanual de la PPNA media mensual de un pastizal natural de la Depresión de Laprida, en el período julio de 2000 - junio de 2018.

La PPNA anual media fue de 4208 kg de MS ha⁻¹.año⁻¹, con un mínimo de 3428 kg de MS ha⁻¹.año⁻¹ y un máximo de 4687 kg de MS ha⁻¹.año⁻¹. El 60% de la variación interanual de la PPNA anual fue explicada por la precipitación acumulada entre abril y octubre (valor p = 0,0001; Figura 4).

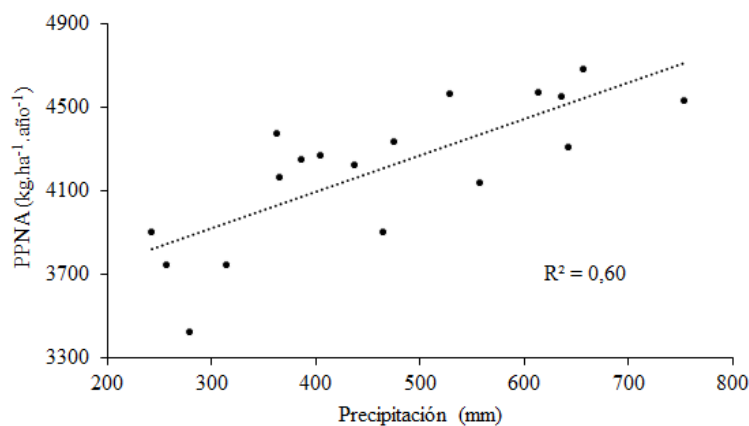


Figura 4: Productividad primaria neta aérea anual (PPNA acumulada de julio a junio) en función de la precipitación acumulada entre abril y octubre (PP abr-oct). La línea representa el modelo de regresión lineal ($PPNA_{\text{anual}} = 1,75 * PP(\text{abr-oct}) + 3395,07$; $R^2 = 0,60$; valor $p = 0,0001$; $n = 18$). Cada punto corresponde a la PPNA anual promedio de 4 píxeles TRRM por año.

El 31% de la variación interanual de la PPNA anual fue explicada por la precipitación anual (valor p = 0,0172).

El 68% de la variación interanual de la PPNA de invierno fue explicada por la precipitación de otoño (valor p < 0,0001; Figura 5). El 53% de la variación interanual de la PPNA de primavera fue explicada por la precipitación de invierno (valor p = 0,0007; Figura 5). La variación interanual de la PPNA de estas estaciones también se pudo explicar

significativamente con las precipitaciones de la estación de crecimiento, pero con menores coeficientes de determinación.

La variación interanual de la PPNA de verano y otoño no pudo explicarse significativamente por la precipitación. La PPNA de estas estaciones no estuvo asociada a la precipitación de la estación actual, ni de la estación anterior, tampoco con la acumulada entre la estación anterior más la actual.

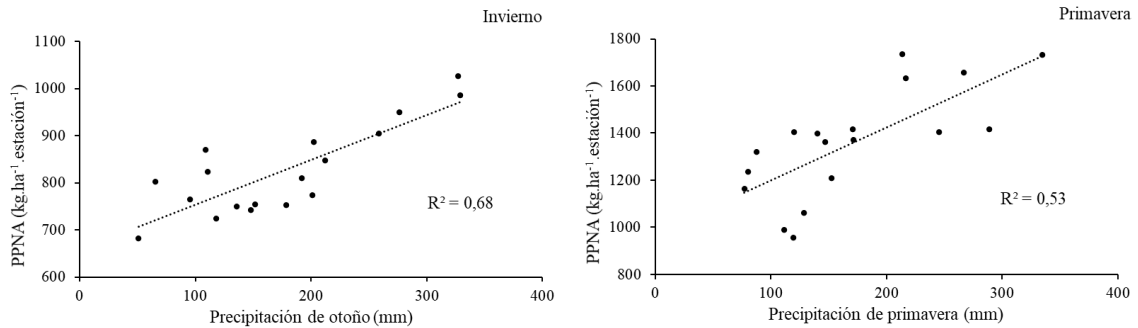


Figura 5: Productividad primaria neta aérea (PPNA) estacional de invierno y primavera en función de la precipitación (PP) de la estación anterior. Las líneas punteadas representan los modelos de regresión lineal. ($PPNA_{Invierno} = 0,95 * PP \text{ Otoño} + 657,9$; $R^2 = 0,68$; valor $p < 0,0001$; $n = 18$ y $PPNA_{Primavera} = 2,26 * PP \text{ Invierno} + 975,39$; $R^2 = 0,53$; valor $p = 0,0007$; $n = 18$). Cada punto corresponde a la PPNA anual de 4 píxeles TRRM promediados por año.

Las regresiones de la PPNA de invierno y primavera con la precipitación de la estación anterior mostraron diferencias estacionales para la pendiente. La pendiente invernal fue de $0,95 \text{ kg MS.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$, mientras que la primaveral fue de $2,26 \text{ kg MS.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$.

DISCUSIÓN

La PPNA mensual de los pastizales naturales de la Depresión de Laprida mostró una marcada estacionalidad (Figura 2). La PPNA de primavera presenta importantes diferencias de magnitud en relación a la del periodo invernal. La relación PPNA de primavera/PPNA de invierno, en promedio fue de 1,6; con un rango de variación interanual entre un mínimo de 1,2 y máximo de 2,1. La relación entre la PPNA media mensual de julio y junio, en relación a la de noviembre, mostró que la PPNA media de noviembre fue 2,1 veces mayor que la PPNA media de julio y junio. Resultados similares han sido encontrados por Oesterheld y León (1987) para pastizales naturales del Río de la Plata a partir de cosechas secuenciales de biomasa. Durante (2013) e Irisarri (2012) muestran dinámicas estacionales similares para pastizales de bajo en la Pampa Deprimida, estimadas en base al sistema de monitoreo forrajero del Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección (LART) (Grigera et al., 2007b). Durante el inicio del periodo estival frecuentemente ocurre una disminución de la PPNA, que mantiene la tendencia hasta el mínimo estacional en el mes de febrero (Figura 2). Este comportamiento se observa en el mayor número de años de la serie, 14 de 18. La PPNA promedio mensual de enero registró una disminución de 27,7% y 25,3% en relación al mes de noviembre y diciembre, respectivamente. Es probable que la disminución de la PPNA pueda explicarse por los frecuentes déficits hídricos que ocurren en la región durante el verano, particularmente en enero (Sala et al., 1981; Sierra y Montecinos, 1990).

La PPNA anual estuvo relacionada con la precipitación. Las precipitaciones acumuladas que mejor explicaron la variabilidad fueron las ocurridas en el periodo abril a octubre (Figura 3). Ha sido frecuente reportar la relación entre PPNA anual de pastizales con la precipitación anual para explicar la variabilidad entre años. Lauenroth y Sala (1992) y Oesterheld et al. (2001) en pastizales de Norte América, como Paruelo et al., 2010b y Guido et al., 2014 en pastizales del Río de la Plata, mostraron a la precipitación media anual como variable explicativa de variabilidad temporal de la PPNA, con modelos lineales con R^2 entre 0,37 y 0,42; superiores a los hallados en este estudio. Por otra parte, en pastizales de Pampa Deprimida (Argentina), Piñeiro (2006a), halló a la eficiencia de transformación de luz absorbida a biomasa, componente de la estimación de PPNA en modelos radiativos, positivamente relacionada con la precipitación anual. Con menor profundidad se han explorado los efectos de precipitaciones de periodos cortos y anteriores al ciclo de crecimiento sobre la PPNA anual. Este tipo de relaciones han sido utilizadas en otros estudios con buenos resultados. Por ejemplo, Fabricante et al. (2009) y Jobbágy y Sala (2000) utilizaron relaciones de este tipo para explicar variaciones interanuales de la PPNA de diferentes ecosistemas de la Patagonia. Posse et al. (2005) muestra a las precipitaciones de verano como variable explicativa de parte de la variación interanual del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI del inglés, Normalized Difference Vegetation Index; como estimador de la PPNA) de pastizales de halófitas de la Pampa Deprimida. En contraposición a los hallazgos de Posse et al. (2005), en este trabajo, las precipitaciones de verano no explicaron la variación interanual de la PPNA anual. Esta diferencia podría estar explicada por las características metodológicas de ambos estudios. Los datos que utilizó Posse et al. (2005) corresponden a un sensor de menor resolución espacial, por lo que la señal integrada en cada píxel podría corresponder a una mezcla de coberturas de suelo mayor a la de este estudio. Los estudios también analizan periodos diferentes.

La PPNA estacional mostró relaciones variables con la precipitación. La PPNA de invierno y de primavera estuvo fuertemente asociada con la precipitación acumulada en la estación anterior. En cambio, la PPNA de verano y otoño no estuvo asociada a la precipitación de la estación actual, ni de la estación anterior. Este tipo de relaciones entre PPNA estacional y precipitaciones acumuladas en periodos anteriores, han sido exploradas por Fabricante et al. (2009) para explicar el NDVI estacional de diferentes ecosistemas de la Patagonia. La relación entre la PPNA estacional y la precipitación de la correspondiente estación explicó la variación en menor medida que la precipitación de la estación anterior. Es probable que la variabilidad temporal de PPNA de verano y otoño deba ser explicada por variables ambientales más integradoras. Durante (2013) muestra mejoras en la capacidad explicativa de la variabilidad espacial de la PPNA estacional en base al balance hídrico, considerando esto, es posible que esta mejora pueda extrapolarse a explicar la variación temporal.

La capacidad de las precipitaciones pasadas para explicar la variabilidad interanual de la PPNA anual o estacional parece aportar a la idea de “retraso” en la respuesta de la PPNA. Paruelo et al. (1999b) describieron el efecto de retraso en el ajuste estructural y funcional del ecosistema ante cambios en la precipitación, para diferentes pastizales del mundo. Este retraso en la respuesta del pastizal natural a las precipitaciones podría deberse a restricciones estructurales de la vegetación, como el número de meristemas de crecimiento. Además, en primavera son factibles efectos debidos a restricciones biogeoquímicos, como variaciones en la disponibilidad de nitrógeno por incrementos en la tasa de mineralización, proceso que se encuentra regulado por la humedad del suelo y la temperatura. Se encuentra documentado en la bibliografía, que aumentos en la disponibilidad de nitrógeno incrementan la PPNA de pastizales (Rodríguez et al., 2007; Pacente, 2011, Iturralde Elortegui et al., 2018).

La sensibilidad de la PPNA estacional del pastizal natural a la variación de las precipitaciones mostró marcadas diferencias. La pendiente de los modelos estacionales representa la respuesta marginal a la precipitación (RMP; Verón et al., 2005). La RMP de primavera fue 2,4 veces mayor a la de invierno. La PPNA de invierno respondió a la precipitación en una relación cuasi aritmética, $\sim 1:1$, ($0,95 \text{ kg MS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$), en cambio para primavera esta relación es de tipo geométrica ($2,26 \text{ kg MS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$). Esta diferencia posiblemente radica en la utilización del agua disponible que hace el pastizal en la diferenciación y crecimiento de las estructuras vegetales en cada estación. También es factible que el cambio estacional en la RMP puede ser controlado por la dominancia estacional de diferentes especies vegetales. Se debe contemplar que el pastizal natural es una comunidad compleja y al transcurrir el tiempo se suceden los diferentes estadios fenológicos de las especies que lo componen. Otra condición que podría explicar la diferencia estacional en la RMP es la presencia de especies gramíneas C_4 entre el conjunto que componen el pastizal, como *Sporobolus pyramidatus*, *Spartina densiflora*, y *Distichlis spicata*. Estas especies tienen un crecimiento primavero estival y su sistema fotosintético le permite hacer una utilización de mayor eficiencia del agua en relación a las especies C_3 .

Los modelos temporales generados, que explicaron la variabilidad de la PPNA anual y la estacional de invierno y primavera con las precipitaciones acumuladas en períodos anteriores al de crecimiento, representan un aporte al desarrollo de modelos predictivos de la PPNA, en base a una variable de simple medición, como la precipitación. Predecir la PPNA

anual y estacional, como la de invierno y primavera, con antelación de varios meses permitiría mejorar la planificación y la gestión de los recursos forrajeros y anticipar el manejo de la carga ganadera (Paruelo et al., 1999a; Oesterheld et al., 2001; Grigera et al., 2007b). Sin embargo, la ausencia de relación de la PPNA de verano y otoño con la precipitación, muestra una mayor complejidad en la respuesta a factores ambientales en la PPNA de estos periodos. La PPNA de verano y otoño representó el 48% de la PPNA media anual, destacándose como periodos con una producción relevante de forraje. Esto marca la importancia de mejorar los modelos de predicción para estas estaciones.

Las regresiones generadas para evaluar la relación de la PPNA con la precipitación, tanto anual como estacional, tienen una limitación intrínseca en la capacidad de explicar la variabilidad temporal debida al modelo utilizado para hacer las estimaciones de PPNA. Este modelo se basa en la relación lineal de la RFAA con la PPNA, lo que supone una eficiencia de uso de la radiación (EUR) constante en el tiempo (pendiente del modelo lineal) para realizar una estimación diaria. Sin embargo, hay referencias de diferentes autores sobre variaciones temporales, tanto interanuales como estacionales, de la EUR para diferentes pastizales naturales y pasturas implantadas (Piñeiro, 2006; Piñeiro et al., 2006; Baeza et al. 2011; Oesterheld et al., 2011; Oyarzabal et al., 2011). En este sentido, resultan interesantes los hallazgos de Piñeiro (2006) sobre pastizales de la Depresión de Laprida que mostraron variaciones estacionales de la EUR entre valores de 0,2 a 1,2 g de biomasa.MJ⁻¹. Esa variabilidad temporal de la EUR se encontró asociada a la precipitación y la temperatura. Esto pone en discusión la necesidad de plantear mejoras en los modelos de estimación estacional de la PPNA que contemplen las variaciones en la EUR.

Conclusión

Se probó la relación de la precipitación con la variabilidad temporal de la PPNA. Resultan de particular relevancia los modelos que relacionan la PPNA anual y la estacional de invierno y primavera con las precipitaciones ocurridas en meses anteriores al período de crecimiento. Estos modelos presentan la oportunidad de realizar la predicción de la PPNA acumulada con la antelación suficiente para generar modificaciones en el manejo del sistema pastoril. En relación a la PPNA de verano y de otoño, periodos que producen una parte importante de la producción de forraje anual, es importante remarcar que no se asociaron con la precipitación. Trabajos futuros deberán estudiar las variables a las que responde la variabilidad interanual de la PPNA de verano y otoño.

Bibliografía

Baeza, S., Paruelo, J. y Ayala, W. 2011. Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria en recursos forrajeros del este de Uruguay. *Agrociencia*, 15:48-59.

Batista, W. B., Taboada, M. A., Lavado, R. S., Perelman, S. B., y León, R. J. C. 2005. Asociación entre comunidades vegetales y suelos en el pastizal de la Pampa Deprimida. Pp. 113-129 en: Oesterheld, M., Aguiar, M., Ghersa, C., y Paruelo, J. M. (eds.). *La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas*. Editorial Facultad de Agronomía.

Blackburn W. J. and Proctor J. T. A. 1983. Estimating photosynthetically active radiation from measured solar irradiance. *Solar Energy*, 31 (2): 233-234.

Dillon, J. H. 2019. Caracterización de la producción vacuna en la Provincia de Buenos Aires para 2019. Colegio de Veterinarios de la provincia de Buenos Aires. Recuperado de: <http://cvpba.org/noticias/institucionales/caracterizacion-la-produccion-vacuna-la-provincia-buenos-aires-ano-2019/>

Durante, M. 2013. Modelos explicativos y predictivos de la productividad, disponibilidad y calidad de forraje basados en sensores remotos. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano. Facultad de Agronomía. 91p.

Durante, M., Piñeiro, G., Irisarri, G. N., and Oesterheld, M., 2016. Primary Production of Lowland Natural Grasslands and Upland Sown Pastures Across a Narrow Climatic Gradient. *Ecosystems*. 20: 543–552

Fabricante, I., Oesterheld, M., and Paruelo, J. M. 2009. Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across northern Patagonia. *Journal of Arid Environments*, 73: 745-53.

GeoINTA: <http://visor.geointa.inta.gob.ar/>

Golluscio, R. A., Deregibus A., y Paruelo, J. 1998. Sustentabilidad y manejo de pastizales en la Estepa Patagónica. *Ecología Austral* 8:265-284.

Grigera, G. 2003. Seguimiento de la productividad forrajera mediante teledetección: desarrollo de una herramienta de manejo para sistemas de producción ganaderos. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano. Facultad de Agronomía. 93p.

Grigera, G., Oesterheld, M. O., Durante, M. y Pacín F. 2007a. Evaluación y seguimiento de la productividad forrajera. *Revista Argentina de Prod Anim* 27:137–48.

Grigera G., Oesterheld M. and Pacín F. 2007b. Monitoring forage production for farmers' decision making. *Agric Syst* 94:637–48.

Guido A., Varela, R. D., Baldassini, P. and Paruelo J. M. 2014. Spatial and Temporal Variability in Aboveground Net Primary Production of Uruguayan Grasslands. *Rangeland Ecology and Management*, 67(1): 30-38.

Holechek, J. (1989). An approach for setting the stocking rate. *Rangelands*, 10: 10-14.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X. and Ferreira, L. G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices.

Remote Sensing of Environment, 83(1-2):195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).

Irisarri, J. G. N. 2012. Variación espacial y temporal de la producción primaria neta aérea y secundaria neta. [Tesis de Doctorado]. Escuela para graduados Ing. agr. Alberto Soriano- Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires. 146p.

Irisarri, J. G. N., Gundel, P. E., Clavijo, M. P., Durante, M. y Sosa, P. 2013. Estimación de la PPNA y la capacidad de carga por ambientes mediante información satelital en un establecimiento ganadero en la Pampa Deprimida. *Revista Argentina de Producción Animal*. 33(1): 11-20.

Iturralde Elortegui, M. R., Recavarren, P., Martinefsky, M. J., Leaden, K. y Sacido, M. 2018. Fertilización nitrogenada y fosforada en un pastizal natural de la depresión de Laprida. VIII Congreso Nacional. IV Congreso del Mercosur sobre Manejo de Pastizales Naturales: resúmenes. En: Blanco, L.; Quiroga, E.; Agüero, J. editores. Ediciones INTA. ISBN 978-987-521-965-6.

Jobbágy, E. and Sala, O. E., 2000. Controls of grass and shrub aboveground production in the Patagonian steppe. *Ecological Applications* 10: 541–549.

Lauenroth, W. K. and Sala, O. E. 1992. Long-term forage production of North American shortgrass steppe. *Ecol. Appl.* 2: 397-403

McCree, K. J. 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology*. 10:443–453.

against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology*, 10 (C): 443-453.

McNaughton, S. J., 1985. Ecology of a grazing ecosystem: the Serengeti. *Ecological Monographs* 55, 259–294.

McNaughton, S. J., Oesterheld, M., Frank, D. A., and Williams, K. J. 1989. Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature* 341:142–4.

Monteith, J. L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology* 9:747-66.

Oesterheld, M. y León, R. J. C. 1987. El envejecimiento de las pasturas implantadas: su efecto sobre la productividad primaria. *Turrialba* 37: 29-35.

Oesterheld, M., Sala, O., and McNaughton, S.J. 1992. Effect of animal husbandry on herbivore-carrying capacity at a regional scale. *Nature* 356:234-236.

Oesterheld, M., Loreti, J., Semmartin, M., and Paruelo, J. M. 1999. Grazing, fire, and climate effects on primary productivity of grasslands and savannas. En: Walker, L. [Eds]. *Ecosystems of disturbed ground*. Amsterdam, Netherlands. Elsevier. pp 287-306.

Oesterheld, M., Loreti, J., Semmartin, M. and Sala, O. E. 2001. Inter-annual variation in primary production of a semi-arid grassland related to previous-year production. *Journal of Vegetation Science*, 12(1): 137-142.

Oesterheld, M., Paruelo, J. M. y 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., y Paruelo, J.M., editores. *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales*. Serie FPTA N° 26, INIA.

Oesterheld, M., Oyarzabal, M. y Paruelo, J.M. (2014). Aplicación de la teledetección y los sistemas de información geográfica al estudio y seguimiento de los sistemas ganaderos. En: *Percepción remota y sistemas de información geográfica. Sus aplicaciones en Agronomía y Ciencias Ambientales*. Paruelo, J.M., Di Bella, C.M., Mylkovic, M. Hemisferio Sur, pp. 283-302.

Oyarzabal, M., Oesterheld, M. y Grigera, G. 2011. ¿Cómo estimar la eficiencia en el uso de la radiación mediante sensores remotos y cosechas de biomasa? Un ejemplo local. En Altesor, A., Ayala, W. y Paruelo, J. M., editores. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Serie FPTA N° 26, INIA

Oyarzabal, M., Clavijo, J., Oakley, L.; Biganzoli, F., Tognetti, P., Barberis, I., Maturo, H. M., Aragón, R., Campanello, P. I., Prado, D., Oesterheld, M. y León, R. J. C. 2018. Unidades de vegetación de la Argentina. *Ecología Austral* 28:040-063

Pacin, F., and Oesterheld, M. (2015). Closing the technological gap of animal and crop production through technical assistance. *Agricultural Systems*, 137: 101– 107.

Paruelo, J. M., Garbulsky, M. F., Guerschman, J. P. y Oesterheld, M. 1999a. Caracterización regional de los recursos forrajeros de las zonas templadas de Argentina mediante imágenes satelitarias. *Revista Argentina de Producción Animal*, 19: 125-131

Paruelo, J., Lauenroth, W. K., Burke, I. and Sala, O.E. 1999b. Grassland precipitation-use efficiency varies across a resource gradient. *Ecosystems* 2:64-68.

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

Paruelo, J. M., Oyarzabal, M. y Oesterheld, M. 2010. El seguimiento de los recursos forrajeros mediante sensores remotos: bases y aplicaciones. En: Altesor, A., Ayala, W., Paruelo J. M., editores. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Serie FPTA, INIA. Serie FPTA, INIA. pp 135-145.

Paruelo, J. M., Piñeiro, G., Baldi, G., Baeza, S., Lezama, F., Altesor, A. and Oesterheld, M. 2010b. Carbon Stocks and Fluxes in Rangelands of the Río de la Plata Basin. *Rangeland Ecosystem Management*, 63(1): 94-108.

Piñeiro, G. 2006. Biogeoquímica del carbono y nitrógeno en los pastizales pastoreados del Río de la Plata: Un análisis basado en modelos de simulación, sensores remotos y experimentos a campo [Tesis de Doctorado]. Escuela para graduados Ing. agr. Alberto Soriano- Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires. 146p.

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., Oesterheld, M., Di Bella, C. y Marcelo, C. 2005. Landscape, soil and meteorological influences on canopy dynamics of northern flooding Pampa grasslands, Argentina. *Applied Vegetation Science*, 8(1): 49-56.

Recavarren, P. 2016. La producción agropecuaria en Olavarría, Benito Juárez, Laprida y Gral. La Madrid: evolución y desafíos a futuro. 1a ed. – Balcarce, Buenos Aires: Ediciones INTA, 2016. Libro digital, PDF. Archivo Digital: descarga y online ISBN 978-987-521-767-6.

Rodríguez, A., Jacobo, E., Scardaoni, P. and Deregibus, V. (2007). Effect of Phosphate Fertilization on Flooding Pampa Grasslands (Argentina) Rangeland Ecol. Manage. 60:471–478.

Sala, O. E., Lauenroth, W. K. and Parton, W. J. 1992. Long-term soil water dynamics in the shortgrass steppe. *Ecology* 73: 1175-1181.

Sala, O. E., Soriano, A. y Perelman, S. 1981. Relaciones hídricas de algunos componentes de un pastizal de la depresión del Salado. *Rev. Fac. Agron.* 2: 1-10.

Sierra, E. M. y Montecinos, E. R. 1990. Cronología de inundaciones y sequías en la Depresión del Salado. *Rev. Fac. Agron.* 11: 35-45.

Vecchio, M. C., Golluscio, R. A. y Cordero, M. I. 2008. Cálculo de la receptividad ganadera a escala de potrero en pastizales de la Pampa Deprimida. *Ecología Austral* 18:213-222.

Verón, S., Oesterheld, M., and Paruelo, J. M. 2005. Production as a function of resource availability: slopes and efficiencies are different. *Journal of Vegetation Science*, 16: 351-354.