

***Variabilidad de la productividad primaria neta aérea de pastizales
de la Depresión del Salado (Prov. Bs. As.) y su relación con la
temperatura y 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*

Gonzalo Sciortino

Ingeniero Agrónomo – Universidad de Buenos Aires

Lugar de trabajo: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación



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

TUTOR

Mariano Oyarzabal

Ingeniero Agrónomo – Universidad de Buenos Aires
Doctora en Ciencias Agropecuarias – Universidad de Buenos Aires

JURADO DE TRABAJO FINAL

Carlos Marcelo Di Bella

Ingeniero Agrónomo – Universidad de Buenos Aires
Doctor del Institut National Agronomique Paris-Grignon

Adriana Mabel Rodríguez

Ingeniero Agrónoma – Universidad de Buenos Aires
Magister en Recursos Naturales – Universidad de Buenos Aires
Doctora en Ciencias Agropecuarias – Universidad de Buenos Aires

Fecha de defensa del Trabajo Final: 7 de octubre de 2021

Agradecimientos

A mi familia entera, a mis compañeros que me bancaron en el año y medio de cursada, a mis camaradas que también me bancaron en las ausencias y a todos los luchadores por una economía planificada al servicio de la clase obrera.

INDICE GENERAL

1. Resumen.....	6
2. Introducción.....	7
3. Materiales y métodos.....	9
4. Resultados	13
5. Discusión.....	17
6. Conclusión.....	20
7. Bibliografía.....	20

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. El Mapa de la provincia de Buenos Aires y provincias limítrofes muestra el área de estudio, que se encuentra ubicada en la unidad de vegetación correspondiente a praderas higrófitas y halófitas. En 1, 2 y 3 se muestran los tres sitios de estudio. El cuadrículado regular muestra la grilla de pixeles utilizados para el análisis, y los polígonos irregulares indican el perímetro de cada potrero. Los sitios 1 y 2 están ubicados en el partido de San Miguel del Monte, y 3 en el partido de Pila. La imagen de alta resolución pertenece al servidor Bings Maps..... 10

Figura 2. PPNA promedio anual por potrero para el periodo 2001-2019. Los segmentos representan un desvío estándar interanual, calculado para el período 2001-2019. Se ordenan los potreros de mayor a menor PPNA anual. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,02$)..... 12

Figura 3. PPNA anual promedio de potreros para cada año de estudio (línea verde). Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,01$). Coeficiente de variación de la PPNA anual (CV PPNA) entre potreros para cada año de estudio (línea azul)..... 13

Figura 4. Relación entre la PPNA anual y la precipitación anual acumulada (PP). Cada punto es un año del periodo 2001-2019. El R^2 fue 0,21 ($p < 0,05$). La línea corresponde al modelo lineal $PPNA \text{ anual} = 1,07 * pp \text{ (mm)} + 3250 \text{ (kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1} \text{ mm}^{-1})$ 13

Figura 5. Dinámica de la PPNA mensual promedio calculado para el período 2001-2019 en los diferentes potreros. Los asteriscos indican los meses donde existen diferencias entre potreros. Se ordenan los potreros de mayor a menor PPNA anual..... 14

Figura 6. Coeficiente de variación interanual de la PPNA mensual (CV %) calculado para el periodo 2001-2019..... 15

Figura 7. Relación entre PPNA mensual promedio de cada mes y la Temperatura mensual promedio de cada mes para el periodo (2001-2019). Cada punto representa un mes del calendario. $R^2 = 0,89$ ($p < 0,001$). La línea corresponde al modelo lineal $PPNA \text{ mensual} = 18,56 \text{ temperatura (}^\circ\text{C)} + 19,71 \text{ (kg ha}^{-1} \text{ mes}^{-1} \text{ /}^\circ\text{C)}$ 15

Figura 8. Relación entre los coeficientes de variación interanual de la PPNA mensual (CV PPNA) y los coeficientes de variación de la temperatura media mensual (CV temperatura). Cada punto corresponde a un mes calendario. El R^2 fue de 0,58. La línea corresponde al modelo lineal que surge $CV \text{ PPNA} = -0,70 \text{ CV temperatura} + 0,39$ 16

1. Resumen

La productividad primaria neta aérea (PPNA) es una variable importante para conocer la oferta forrajera de la ganadería pastoril. Muchos trabajos han descrito cómo estimar la PPNA a través del modelo radiativo utilizando información satelital. Se ha observado que la PPNA muestra variaciones en el espacio y tiempo, asociadas a la temperatura y precipitación. Para conocer la oferta forrajera con resolución de potrero, es necesario estimar la PPNA con ese nivel de detalle. Los objetivos de este trabajo fueron dos: 1) estimar la PPNA de 6 potreros de pastizales naturales de la Depresión del Salado, provincia de Buenos Aires, y 2) explicar su variabilidad temporal y espacial a través de la temperatura y precipitación. Para ello, se estimó la PPNA para el período 2001-2019 con un modelo que utiliza información satelital y fue ajustado para pastizales de la Depresión de Laprida (Grigera et al., 2007). La PPNA anual tuvo un mínimo de 4103 y máximo 4555 kg ha⁻¹ año⁻¹. La variabilidad interanual fue del 10% (CV), y se relacionó de forma lineal y positiva con la precipitación anual acumulada ($R^2=0,21$; $P<0,05$). Además, la variabilidad relativa de la PPNA anual fue menor que la variabilidad relativa de las precipitaciones. La PPNA mensual promedio tuvo un mínimo de 199 en el invierno y un máximo de 528 kg ha⁻¹ mes⁻¹ en el verano. La variabilidad de la PPNA mensual se relacionó de forma lineal y positiva con la temperatura mensual promedio ($R^2= 0,90$; $P<0,05$). La variabilidad interanual (CV) de la PPNA mensual tuvo un mínimo de 9-10% en julio y junio, y un máximo de 42% en octubre, y se relacionó negativa y linealmente con la variabilidad interanual de la temperatura mensual. Conocer la PPNA y sus variabilidades es útil para estimar la receptividad animal, decidir la carga animal, planificar el uso del forraje y analizar resultados productivos de campañas anteriores.

1. Abstract

Net aerial primary productivity (NAPP) is an important variable for determining forage offer in pasture-based livestock, cattle-farming. Many studies have described how to estimate NAPP through the radiative model using satellite information. It has been observed that the NAPP presents variation in space and time, associated with temperatures and precipitation. In order to know the forage offer with a parcel resolution, it is necessary to estimate the NAPP with that same level of detail. This study had two different objectives: 1) To estimate the NAPP of 6 parcels of natural pasturelands in the “Depresión Del Salado” region in the Buenos Aires province, and 2) to explain it’s variability in time and space through temperature and precipitation. For that end, the

NAPP has been estimated for the 2001-2019 period using a model that uses satellite information and has been adjusted for pasturelands of the “Laprida” lowlands region (Grigera et al., 2007). The yearly NAPP registered a 4103 minimum and a 4555 maximum kg ha⁻¹ year⁻¹. Inter annual variability was 10% (CV) and was linear and positively related to the accumulated yearly precipitation ($R^2=0,21$; $P<0,05$). Additionally, the relative variability of the yearly NAPP was lower than the relative variability of the precipitations. The average monthly NAPP showed a 199 winter minimum and a 528 kg ha⁻¹ month⁻¹ summer maximum. The variability of the monthly NAPP was linear and positively related to the average monthly temperature ($R^2= 0,90$; $P<0,05$). Cross-year variability (CV) of monthly NAPP had a 9-10% minimum in June- July and a 42% maximum in October, and related linear and negatively to the cross-year monthly temperature variability. Knowing the NAPP and it's variabilities is useful for estimating animal receptivity, deciding animal load, planning the use of forage and analyzing yield results from previous campaigns.

2. Introducción

La productividad primaria neta aérea (PPNA) es una variable importante para conocer la oferta forrajera de los sistemas ganaderos pastoriles. La PPNA es la tasa a la que se produce biomasa aérea por unidad de área y tiempo (Flombaum & Sala 2007). La importancia de la PPNA en los sistemas pastoriles radica en que impone el límite máximo de la cantidad de animales en pastoreo en un sitio dado (Sala & Austin 2000), por lo que establece restricciones tanto biofísicas como económicas (Oesterheld *et al.*, 1992, 1998; Díaz-Solis *et al.*, 2006). En los sistemas pastoriles de la Pampa Deprimida, entre el 33% y el 51% de la energía requerida por el ganado proviene de pastizales de bajo o pasturas naturalizadas, y de pasturas de loma (Rearte, 2010). Por ende, conocer la PPNA es una herramienta de diagnóstico clave que permite a los ganaderos y asesores planificar y evaluar las decisiones de gestión de una manera más objetiva (Grigera *et al.*, 2007).

La PPNA muestra variabilidad espacial y temporal en la región de la Pampa Deprimida. La variabilidad espacial de la PPNA es función de la heterogeneidad ambiental (Irisarri *et al.*, 2013), y del tipo de recurso forrajero. En este sentido, la PPNA anual de pasturas de zonas relativamente altas fue entre 60 y 80% mayor que la PPNA de pastizales naturales de bajos (Durante *et al.*, 2016). La variabilidad espacial de la PPNA anual fue del 12%, que surgió de comparar praderas de mesófitas, praderas húmedas de mesófitas, praderas de higrófitas y estepas de halófitas (Irisarri *et al.*, 2013). En todas las praderas, la PPNA anual promedio fue un 27% mayor a la de otros

pastizales de la misma región (Sala *et al.*, 1981; Irisarri *et al.*, 2013). La variabilidad temporal de la PPNA es función de las diferencias ambientales entre años y entre estaciones dentro de un año (Irisarri *et al.*, 2013). Entre años, la PPNA varía entre un 8-10 % (Durante *et al.*, 2016), o entre 12-19% (Irisarri *et al.*, 2013). Entre estaciones, la PPNA mensual fue mínima en invierno y máxima en primavera, verano y/u otoño, con diferencias de un 80% entre la PPNA mínima y máxima (Sala *et al.*, 1981; Irisarri *et al.*, 2013; Semmartin *et al.*, 2007).

La variabilidad espacial y temporal de la PPNA está muy relacionada con la temperatura y la precipitación. Diferentes trabajos han mostrado que la variabilidad espacial y temporal de la PPNA de pastizales se relacionó linealmente con la precipitación media anual (Lauenroth, 1979, Sala *et al.*, 1988; Milchunas y Lauenroth, 1993). También, se han observado variaciones espaciales de la PPNA asociada con la precipitación anual para diferentes texturas de suelo en pastizales del centro de EEUU (Sala *et al.*, 1988). Dicho trabajo, mostró que la PPNA para suelos de textura arenosa fue mayor que para suelos de textura arcillosa ante precipitaciones menores a 370 mm año⁻¹, mientras que se observó lo contrario con precipitaciones mayores a 370 mm año⁻¹. Las variaciones temporales de la PPNA ocurrieron tanto interanual como estacionalmente. A nivel interanual, la PPNA mostró variaciones asociadas a la precipitación. En un año donde la precipitación disminuyó un 25% (año seco), la PPNA se redujo un 23%, mientras que cuando la precipitación aumentó un 50% (año húmedo), la PPNA se incrementó un 19% (Irisarri *et al.*, 2013). A nivel estacional, la variabilidad de la PPNA se ha asociado tanto a la temperatura como a la precipitación para el caso de las estepas patagónicas (Jobbagy *et al.*, 2000). En cambio en pastizales de Corrientes, la variabilidad estacional de la PPNA se asoció linealmente con la temperatura hasta los 23 °C, aunque este límite mostró ser distinto entre años. Además, la PPNA se relacionó de forma positiva con la temperatura en los meses de invierno, excepto agosto, y en forma negativa en los meses de enero y marzo (Arias Usandivaras, 2006).

Para estimar la PPNA, existen diferentes metodologías directas e indirectas. En el primero de los casos la PPNA se obtiene como la división de la biomasa acumulada por el tiempo transcurrido entre cortes de biomasa (Sala y Austin, 2000). La principal desventaja de dicha técnica es su carácter destructivo (que no permite repeticiones en la misma área), además de ser lento y costoso, y por lo tanto su uso en grandes extensiones resulta muy dificultoso. En el segundo caso, las metodologías indirectas, se caracterizan por estimar una variable sin entrar en contacto directo

con la vegetación (Fontán, 2009). La PPNA se puede estimar a través de datos aportados por sensores remotos usando como base el modelo radiativo de Monteith (1972):

$$PPNA \text{ (g m}^{-2} \text{ año}^{-1}\text{)} = RFAi \text{ (MJ m}^{-2} \text{ año}^{-1}\text{)} \times fRFAA \times EUR \text{ (g MJ}^{-1}\text{)} \quad \text{Ecuación 1}$$

El modelo propone que la PPNA es el resultado del triple producto entre la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFAi), la fracción de esta que es absorbida por la vegetación (fRFAA) y el coeficiente de conversión de energía en biomasa aérea, llamado eficiencia de uso de la radiación (EUR; Oesterheld et al., 2013). La RFAi representa el 50% de la radiación global (Monteith 1972). La fRFAA puede ser estimada con razonable precisión a partir de teledetección utilizando el índice de vegetación normalizada (IVN), debido a que se relaciona de forma no lineal con el IVN (Gallo et al., 1985; Potter et al., 1993; Sellers et al., 1996; Le Roux et al., 1997; Los et al., 2000; Piñeiro et al., 2006). Por otro lado, la EUR presenta un comportamiento relativamente estable regionalmente y para períodos de un mes o más. Para estimar la PPNA en la Depresión de Laprida se ha utilizado un modelo lineal para pastizales de esta región (Grigera et al., 2007) que, aunque impone una limitación por no tener una calibración específica para el sitio de estudio del trabajo, sería un muy indicador de la variabilidad espacial y temporal del recurso y puede ser utilizado para todos los meses y años.

En la región pampeana existen estimaciones de la PPNA, pero es tal la variabilidad temporal y espacial que es necesario hacerlo con resolución de potrero para ajustar la planificación de la empresa ganadera extensiva. Los objetivos de este trabajo fueron dos: 1) estimar la PPNA de 6 potreros de pastizales naturales de la Depresión del Salado, provincia de Buenos Aires, y 2) explicar su variabilidad temporal y espacial a través de la temperatura y precipitación. La importancia de alcanzar los objetivos radica en el valor que significa para la empresa ganadera el poder planificar con mayor anticipación el manejo de los recursos forrajeros. La hipótesis que surge de este trabajo, es que la variación espacial y temporal de la PPNA se verá relacionada de forma positiva con la precipitación y la temperatura.

3. Materiales y métodos

Se seleccionaron 6 potreros de uso ganadero pastoril desde 2000 al presente, sin roturación del suelo, pertenecientes a la Depresión del Salado (Figura 1) ubicados dentro de los municipios de

Pila y San Miguel del Monte, en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. El potrero Monte 1 tiene una superficie de 202 ha, Monte 2 183 ha, Monte 3 896 ha Monte 4 219 ha Monte 5 100 ha y Pila 1088 ha. Estos potreros pertenecen a la comunidad de pastizales llamada pradera húmeda de higrófitas, que se caracteriza por ubicarse en posiciones bajas del terreno, con anegamiento prolongado y suelos ácidos. Allí abundan especies como *Solanum glaucophyllum*, *Glyceria multiflora*, *Paspalidium paludivagum*, *Leersia hexandra* y *Gratiola peruviana* (Oyarzabal et al., 2018).

La estimación de la PPNA se realizó a través de un modelo lineal (Grigera et al., 2007). Este modelo adaptó a pastizales de bajos de la Depresión de Laprida el modelo ecofisiológico de Monteith (1972). El modelo utilizado fue:

$$\text{PPNA (g m}^{-2} \text{ 60 días}^{-1}\text{)} = 0,27 \text{ RFAA (MJ m}^{-2} \text{ 60 días}^{-1}\text{)} + 26 \quad \text{Ecuación 2}$$

La RFAA es la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel y se calculó como el producto entre la RFAi y fRFAA. El periodo analizado fue entre 2001 y 2019.

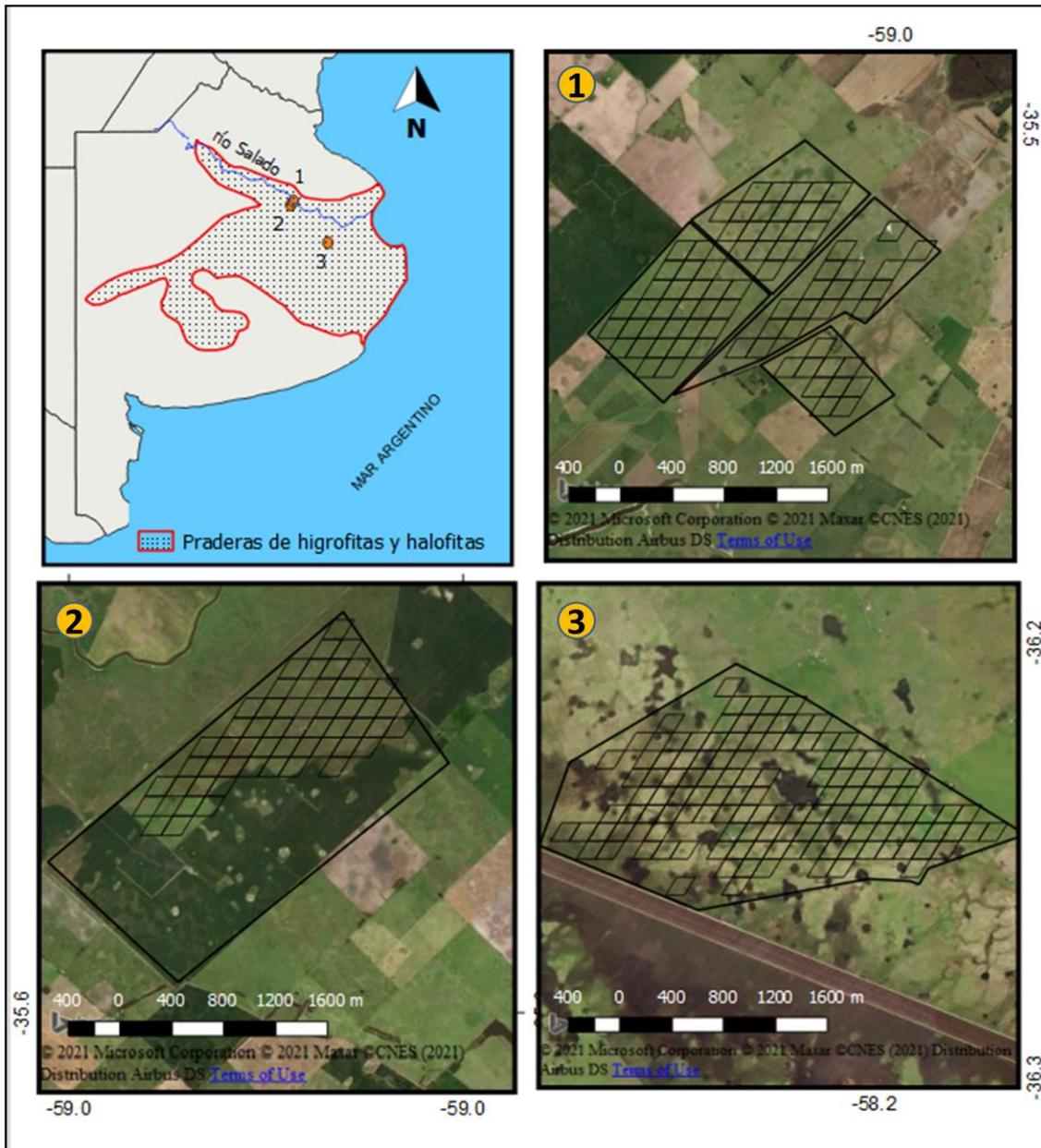


Figura 1. El Mapa de la provincia de Buenos Aires y provincias limítrofes muestra el área de estudio, que se encuentra ubicada en la unidad de vegetación correspondiente a praderas higrofitas y halófitas. En 1, 2 y 3 se muestran los tres sitios de estudio. El cuadrículado regular muestra la grilla de píxeles utilizados para el análisis, y los polígonos irregulares indican el perímetro de cada potrero. Los sitios 1 y 2 están ubicados en el partido de San Miguel del Monte, y 3 en el partido de Pila. La imagen de alta resolución pertenece al servidor Bing Maps.

La RFA total fue estimada a partir de datos satelitales mediante el producto FLASHFlux TISA (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>) con resolución temporal diaria y espacial de 1° . Se utilizó un solo píxel de RFA ya que el mismo cubrió toda el área de estudio. La RFAi se estimó como el 50% de la RFA total (Monteith 1972).

La fRFAA se calculó mediante un modelo curvilíneo (Oyarzabal com. per.), utilizando el Índice de Vegetación Normalizado (IVN) del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Los valores de IVN fueron extraídos de las imágenes del producto MOD13Q1 de la plataforma MODIS, a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA, cuya resolución temporal es de 16 días y la resolución espacial es de 6 ha. A través de una grilla que indicaba la superficie cubierta por cada píxel de la imagen, se seleccionaron aquellos píxeles que se encontraban totalmente dentro del área de los potreros (excluyendo los montes y cuerpos de agua permanente, que fueron identificados por imágenes satelitales de alta resolución espacial de Google Earth) resultando 257 píxeles, en 6 potreros, y un área total relevada de 1542 ha.

La temperatura y precipitación diarias se obtuvieron de la plataforma MERRA2 (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>), con datos a partir de 1980. La resolución espacial es de 2500 km² y la temporal es diaria. Se eligieron los 3 píxeles que abarcaron toda la zona de estudio, uno para cada sitio de estudio.

La variabilidad espacial de la PPNA anual se analizó comparando la PPNA promedio anual entre potreros. La variabilidad intraanual de la PPNA se analizó calculando para cada campaña el coeficiente de variación de la PPNA anual entre potreros. La variabilidad interanual se analizó comparando la PPNA anual promedio de potreros entre campañas. La relación entre la variabilidad espacial y temporal de la PPNA anual con la temperatura y precipitación se analizó mediante análisis de regresión, utilizando los valores de PPNA anual estimada, la precipitación anual acumulada y la temperatura media anual. La variabilidad espacial de la PPNA mensual se analizó comparando la PPNA promedio por mes entre potreros. Mientras que para analizar la variabilidad temporal de la PPNA mensual se calculó el coeficiente de variación entre años para cada mes. Para determinar si existieron diferencias significativas, se realizaron análisis de varianza con test de Tukey para todos los casos anteriormente descriptos. Para estudiar la relación entre la variabilidad espacial y temporal de la PPNA mensual con la temperatura y precipitación, se hicieron análisis de regresión utilizando los valores de PPNA mensual estimada, la precipitación acumulada por mes y temperatura media mensual. Además, se usó el análisis de regresión para estudiar la relación entre los coeficientes de variación interanual por mes de la PPNA y los coeficientes de variación interanual de la precipitación promedio de todos los potreros.

4. Resultados

La PPNA anual mostró variabilidad espacial (Figura 2). La PPNA mínima correspondió al potrero “Monte3”, con un promedio de 4103 kg ha⁻¹ año⁻¹. La PPNA máxima correspondió a “Monte2” y “Monte4”, que en promedio fue de 4555 kg ha⁻¹ año⁻¹. La variabilidad interanual de cada potrero mostró un mínimo de 368 kg ha⁻¹ año⁻¹ correspondiente a “Pila”, y un máximo de 591 kg ha⁻¹ año⁻¹ correspondiente a “Monte3”.

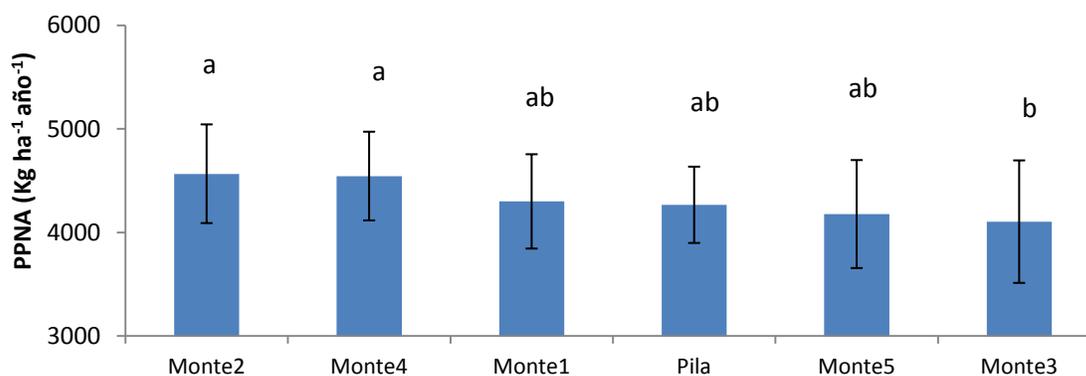


Figura 2. PPNA promedio anual por potrero para el periodo 2001-2019. Los segmentos representan un desvío estándar interanual, calculado para el período 2001-2019. Se ordenan los potreros de mayor a menor PPNA anual. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,02$).

La variabilidad espacial de la PPNA anual (figura 2) no fue explicada por la temperatura promedio anual como tampoco por la precipitación promedio acumulada anual ($p > 0,1$; datos no mostrados).

La PPNA anual mostró variabilidad interanual (Figura 3). La PPNA mínima fue en promedio de 3993 kg ha⁻¹ año⁻¹, en los años 2001, 2002, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2011, 2015 y 2016. La PPNA máxima fue en promedio de 4845 kg ha⁻¹ año⁻¹, en los años 2010, 2012, 2014, 2017, 2018 y 2019.

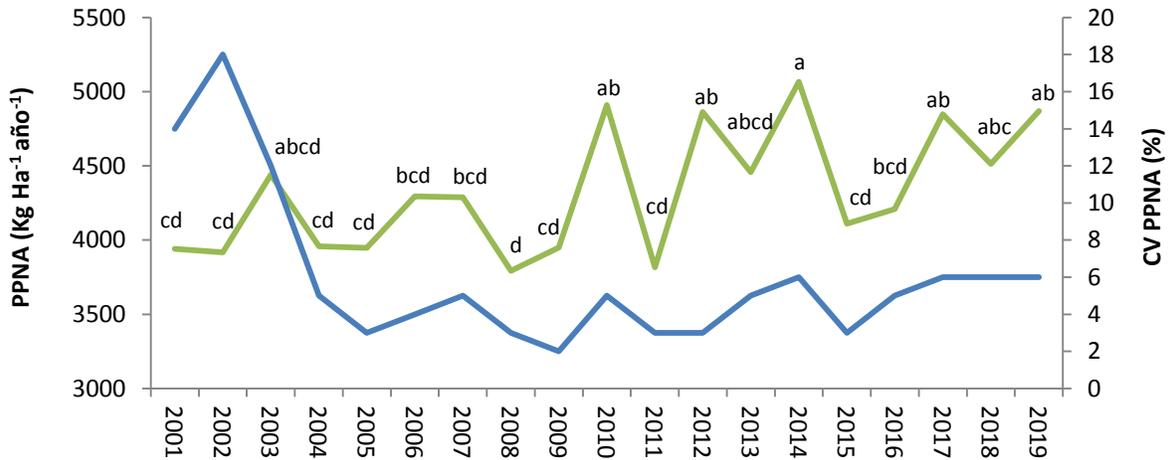


Figura 3. PPNA anual promedio de potreros para cada año de estudio (línea verde). Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,01$). Coeficiente de variación de la PPNA anual (CV PPNA) entre potreros para cada año de estudio (línea azul).

La variabilidad intraanual de la PPNA entre potreros fue distinta entre años (Figura 3). En los años 2001, 2002 y 2003 se registró la máxima variabilidad, mientras que en 2008, 2009, 2011, 2012 y 2015 la mínima variabilidad.

La variabilidad interanual de la PPNA anual se relacionó linealmente y positivamente con la precipitación anual acumulada (figura 4; $R^2=0.21$). La variabilidad interanual de la PPNA anual no estuvo asociada a la temperatura media anual ($p > 0,1$; no mostrado).

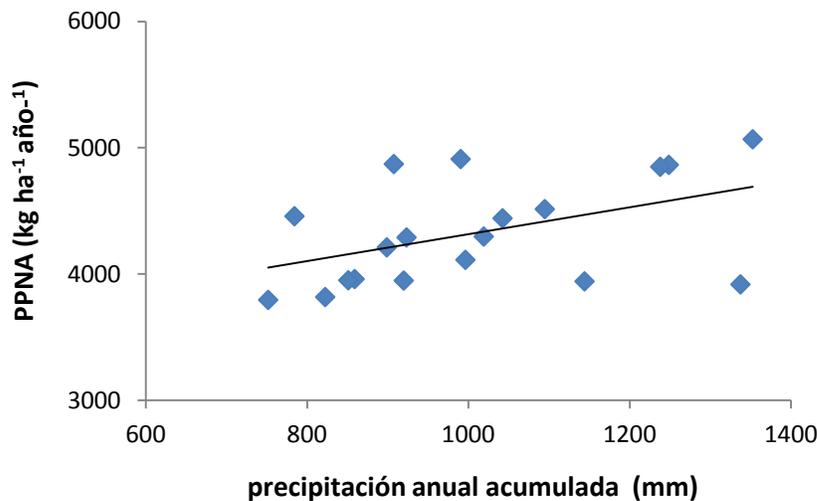


Figura 4. Relación entre la PPNA anual y la precipitación anual acumulada (PP). Cada punto es un año del periodo 2001-2019. El R^2 fue 0,21 ($p < 0,05$). La línea corresponde al modelo lineal $PPNA\ anual = 1,07 * pp\ (mm) + 3250\ (kg\ ha^{-1}\ año^{-1}\ mm^{-1})$.

La PPNA mensual mostró una dinámica estacional (Figura 5). Los mínimos se observaron en los meses de julio y junio con valores promedio de $199 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$. Los máximos de PPNA se dieron en los meses de febrero, marzo y diciembre, con un valor promedio de $528 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$.

La dinámica de la PPNA mensual mostró diferencias entre potreros para los meses de mayo ($p < 0,05$) y septiembre ($p < 0,01$; Figura 5). El potrero de mínima PPNA mensual para mayo fue "Monte3" con $239 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$ y el de máxima fue "Monte2" con $274 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$. Para el mes de septiembre fueron los mismos potreros. En el caso de "Monte 3" presentó una PPNA de $291 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$ mientras que para "Monte2" la PPNA fue de $351 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$.

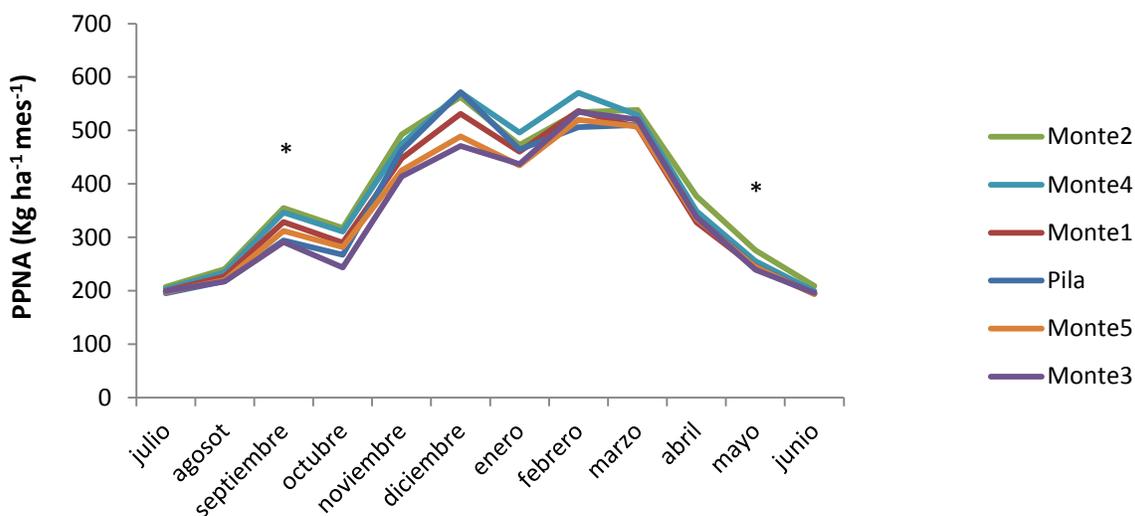


Figura 5. Dinámica de la PPNA mensual promedio calculado para el período 2001-2019 en los diferentes potreros. Los asteriscos indican los meses donde existen diferencias entre potreros. Se ordenan los potreros de mayor a menor PPNA anual.

La PPNA mensual tuvo una variabilidad interanual y además describió una dinámica estacional (Figura 6). Los meses invernales presentan una menor variabilidad entre años, con mínimo en julio, mientras que los meses de primavera presentan la mayor variabilidad entre años, con máximo en octubre.

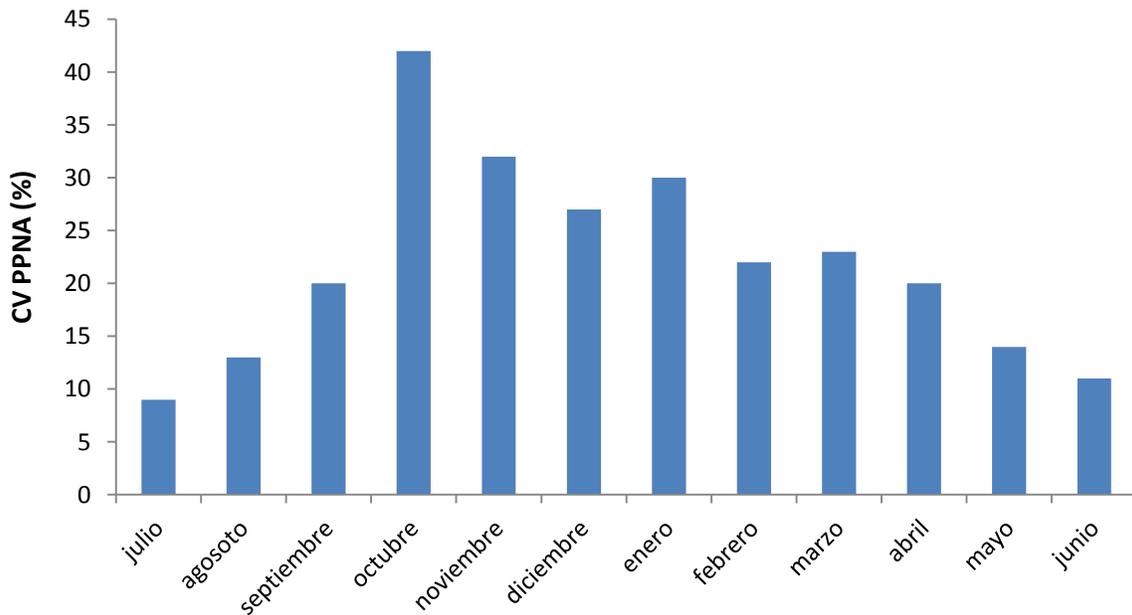


Figura 6. Coeficiente de variación interanual de la PPNA mensual (CV %) calculado para el periodo 2001-2019.

La variabilidad de la PPNA mensual mostró una relación positiva y lineal con la temperatura mensual (Figura 7; $R^2 = 0,89$). La PPNA mensual no estuvo asociada con la precipitación mensual ($p > 0,1$; no mostrado).

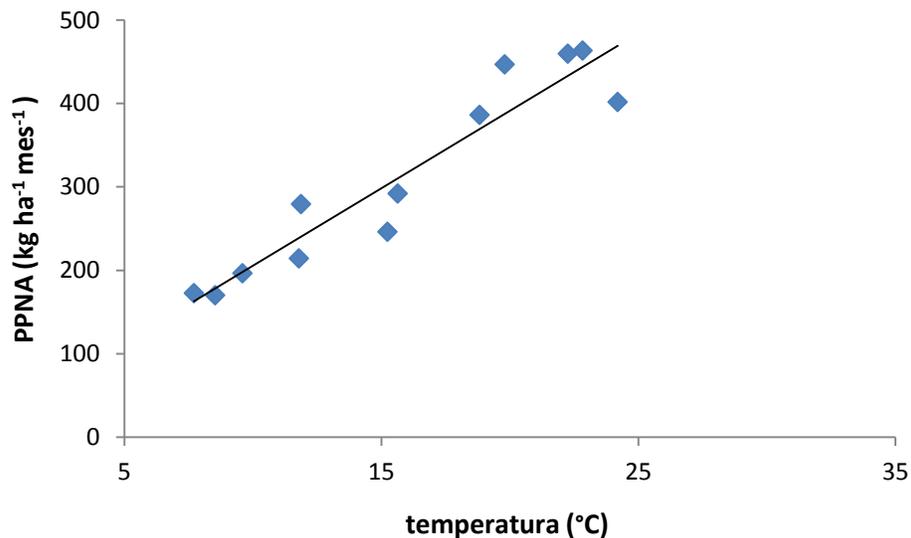


Figura 7. Relación entre PPNA mensual promedio de cada mes y la Temperatura mensual promedio de cada mes para el periodo (2001-2019). Cada punto representa un mes del calendario. $R^2 = 0,89$ ($p < 0,001$). La línea corresponde al modelo lineal $PPNA \text{ mensual} = 18,56 \text{ temperatura } (^\circ\text{C}) + 19,71 \text{ (kg ha}^{-1} \text{ mes}^{-1} / ^\circ\text{C)}$.

La variabilidad interanual de la PPNA mensual (CV PPNA) mostró una relación negativa y lineal con la variabilidad interanual de la temperatura mensual (CV Temperatura; Figura 8; $R^2 = 0,57$; $P < 0,05$).

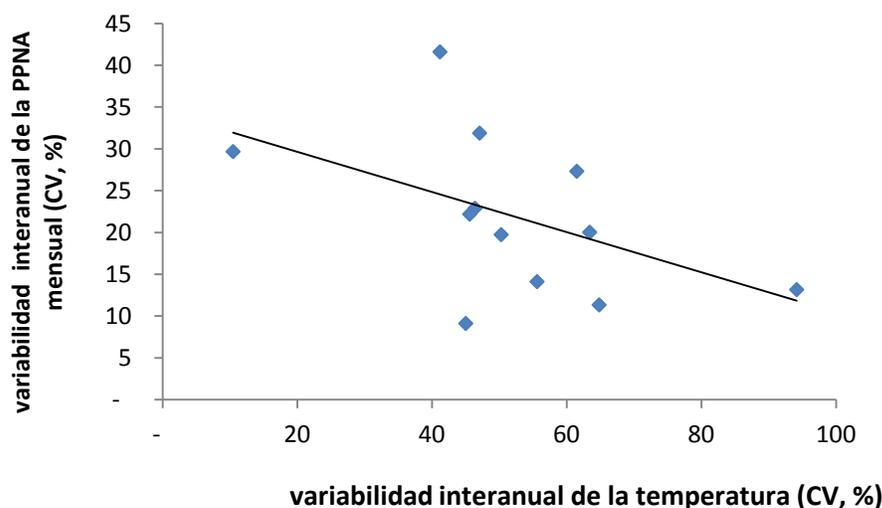


Figura 8. Relación entre los coeficientes de variación interanual de la PPNA mensual (CV PPNA) y los coeficientes de variación de la temperatura media mensual (CV temperatura). Cada punto corresponde a un mes calendario. El R^2 fue de 0,58. La línea corresponde al modelo lineal que surge fue $CV\ PPNA = -0,70\ CV\ temperatura + 0,39$.

El CV interanual de la PPNA mensual no mostró relación con el CV interanual de la precipitación ($p > 0,1$; no mostrado).

5. Discusión

Conocer la magnitud de la PPNA y su variabilidad temporal y espacial es útil para planificar la empresa ganadera pastoril. Esta información tiene al menos tres aplicaciones. En primer lugar, las estimaciones realizadas sirven para explicar los resultados productivos utilizando información de campañas anteriores (Grigera *et al.*, 2007). Un ejemplo de esto es el cálculo de la eficiencia de uso de pasto que relaciona la PPNA anual con la producción de carne por ha (Grigera *et al.*, 2007). Esta eficiencia es posible compararla con valores regionales y así detectar posibles problemas de manejo. Además, la PPNA anual sirve para evaluar la composición alimentaria y por ejemplo descubrir diferencias entre años donde la PPNA anual y la producción de carne fueron similares pero no así la necesidad de suplementar, lo que habla de un desequilibrio en algún mes dentro de la campaña que derivo en una baja eficiencia (Grigera *et al.*, 2007). En segundo lugar, es posible utilizar las estimaciones realizadas para calcular la receptividad, y con ella decidir la carga animal,

probablemente la variable de mayor impacto en los sistemas de ganadería pastoril (Walker, 1995; Diaz-Solis *et al.*, 2003; Diaz-Solis *et al.*, 2006). Se puede utilizar el siguiente modelo (Golluscio, 2009):

$$R = \text{PPNA} \cdot \text{IC} / \text{CIA} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde la receptividad (R) que se define como la carga animal que soporta el sistema sin degradarse, es función de la PPNA, el consumo individual (CIA), estimado como 3% del peso vivo, y el índice de cosecha (IC) estimado como (Oesterheld *et al.*, 1992):

$$\text{IC (\%)} = -5,71 + 0,7154 \times (\text{PPNA (kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}\text{)})^{0,5} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para este trabajo y considerando un animal de 400 kg de peso vivo, los años de máxima PPNA la receptividad promedio podría ser de 0,5 animales ha⁻¹, mientras que los años de mínima PPNA la receptividad promedio fue 0,36 animales ha⁻¹. En tercer lugar, y por último, el análisis de la marcha de la PPNA mensual dentro de un año permite cuantificar el déficit acumulado de PPNA y, en base a eso, definir por ejemplo la compra de suplementos o la confección de reservas.

La PPNA anual y la dinámica estacional presentan similitud con lo observado en trabajos anteriores (Sala *et al.*, 1981; Durante *et al.*, 2016). En este trabajo, el valor mínimo de PPNA anual promedio fue de 4103 kg ha⁻¹ año⁻¹ y máximo de 4555 kg ha⁻¹ año⁻¹, lo que resultó un 20% más alto que el mínimo y un 9% más alto que el máximo de lo observado en pastizales naturales de bajos (Durante *et al.*, 2016). También, resultó un 14% más bajo que la PPNA anual medida en pasturas mesofíticas de la pampa deprimida (Sala *et al.*, 1981). En cuanto a la dinámica estacional de la PPNA mensual, la misma registró mínimo en invierno y máximos en primavera, verano y otoño, de forma similar a los registrados en otros trabajos realizados en la región (Sala *et al.*, 1981; Irisarri *et al.*, 2013; Semmartin *et al.*, 2007). Sin embargo, estos autores midieron diferencias entre los meses de máxima y mínima PPNA un 20% más alto de lo observado en este trabajo.

La variabilidad de la PPNA anual fue explicada por la precipitación anual acumulada y no por la temperatura media anual. Esto se puede deber a que la variabilidad interanual de la temperatura media anual fue solo un 2% mientras que la precipitación anual acumulada varió un 18%. Una

respuesta similar fue observada en pastizales naturales de la provincia de Santa Fe (Martin *et al.*, 2011). La asociación entre la PPNA y la precipitación fue registrada por diversos trabajos (Murphy, 1970; Sala *et al.*, 1988; Lauenroth & Sala, 1992; Jobbágy y Sala, 2000; Oesterheld *et al.*, 2001; Martin *et al.*, 2011).

La variación relativa de la PPNA anual fue menor que la variación relativa de la precipitación. Cuando la precipitación disminuyó un 25% (año 2008, el más seco de la serie), la PPNA lo hizo en un 12%. En cambio, cuando la precipitación aumentó un 33% (año 2014, el más húmedo de la serie), la PPNA lo hizo en un 17%. Este patrón fue similar al observado en pastizales naturales de bajos (Durante *et al.*, 2016). Por otro lado, los valores de este trabajo difieren de lo observado en pastizales de la pampa deprimida (Irisarri *et al.*, 2013) en los cuales la PPNA fue un 11% menor ante una disminución relativa de la precipitación acumulada similar. La razón de esto se podría explicar por una limitante estructural para un mayor aprovechamiento de las precipitaciones de estos pastizales, probablemente determinada por la calidad y fertilidad de los suelos.

La variabilidad de la PPNA mensual estuvo explicada por temperatura y no por la precipitación. Esto concuerda con lo observado en pastizales de la provincia de Corrientes (Arias Usandivaras, 2006), y contrasta con lo observado para pastizales de Santa Fe, donde la precipitación es la que mayormente explica la estacionalidad (Martin *et al.*, 2011). Las razones por las cuales la variabilidad mensual de la PPNA no estuvo explicada por la precipitación pueden deberse a dos motivos: 1) que la precipitación en el área de estudio se encuentra distribuida de manera uniforme sin una estacionalidad marcada (Sala *et al.*, 1981) y 2) que los máximos de PPNA mensual no coinciden con los máximos de precipitaciones mensual, algo que también fue observado en pastizales de Corrientes (Arias Usandivaras, 2006).

La variabilidad interanual de la PPNA mensual se relacionó con la variabilidad interanual de la temperatura mensual. La mayor variabilidad interanual de la PPNA ocurrió en los meses más cálidos, que a su vez presentaron la menor variabilidad interanual de temperatura. En cambio, la PPNA presentó la menor variabilidad en los meses más fríos, que a su vez tuvieron la mayor variabilidad interanual de temperatura. Esto podría traducirse en que los meses más variables y de mayor PPNA se ven afectados por pequeñas variaciones en la temperatura. Mientras que en aquellos meses de menor variabilidad y menor PPNA existen otras limitaciones asociadas al

comportamiento estacional de las especies vegetales del pastizal como por ejemplo *Leersia hexandra* que se seca en el invierno, o permanece viva su parte subterránea (Mayer, 2020), o como en el caso de *Paspalidium paludivagum* donde se ha registrado una disminución de producción de material verde en los meses invernales (Bissio, et al 1994).

6. Conclusión

La PPNA es la variable que define la oferta de alimento en la ganadería pastoril. Gracias a la utilización de información satelital fue posible determinar dicha variable a nivel de potrero. Además fue posible diferenciar cual de las variables climáticas analizadas (precipitación o temperatura) tiene una relación con la variación de la PPNA mensual o anual. Esto es de suma importancia en la tarea de la planificación de la empresa ganadero pastoril frente a los escenarios que impone el cambio climático y la demanda de alimentos a nivel mundial.

La estimación de la PPNA y su variabilidad asociada a la temperatura y precipitación pueden ser la base para futuros trabajos que incorporen otras variables como pueden ser mapas de fertilidad de suelos o topográficos y modelos de EUR variable que permita explicar por ejemplo porque se da una diferencia entre la variación relativa de la PPNA y las precipitaciones.

7. Bibliografía

- Arias Usandivaras, L.M. 2006. Controles climáticos de la productividad primaria de pastizales de la provincia de Corrientes. (Tesis de Ing Agr). Facultad de Agronomía de Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Recuperada de www.agro.uba.ar/users/garbulsk/pdfs/Arias_Tesiscompleta_.pdf
- Bissio, J. C. ; Luisoni, L. O. ; Batista, W. B. 1994. Fenología de las principales Forrajeras Nativas de los Bajos Submeridionales Santafesinos. Publicaciones Tecnicas INTA. Recuperada de : https://www.produccionanimal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_naturales_especies/105-forrajeras_bajos_submeridionales.pdf
- Diaz-Solis, H.; Kothmann, M.M.; Hamilton, W.T; and Grant, W.E. 2003. A simple ecological sustainability simulator (SESS) for stocking rate management on semi-arid grazinglands. *Agricultural Systems*, 76: 655- 680.
- Diaz-Solis, H.; Kothmann, M.M.; Grant, W.E.; and De Luna-Villarreal, R. 2006. Application of a simple ecological sustainability simulator (SESS) as a management tool in the semi-arid rangelands of northeastern Mexico. *Agricultural Systems*, 88: 514-527.

- Durante, M. 2006. Modelos explicativos y predictivos de la productividad, disponibilidad y calidad de forraje basados remotos. (Tesis de Dr Cs Agr). Facultad de Agronomía de Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Recuperada de <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2013durantemartin.pdf>
- Durante, M; Gervasio P; Irisarri, N.G; and Oesterheld, M. 2017. Primary production of lowland natural grasslands and upland sown pastures Across a narrow climatic Gradient. *Ecosystems*, 20: 543–552.
- Fontán, A. R. 2009. Estimación de la productividad primaria de pasturas en la región pampeana. Evaluación del modelo de simulación Graze. (Tesis de Ing Agr). Facultad de Agronomía de Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Recuperada de www.agro.uba.ar/users/garbulsk/pdfs/Tesis%20Adriana%20Font%C3%A1n.pdf
- Flombaum, P; and Sala, O.E. 2007. A non-destructive and rapid method to estimate biomass and aboveground net primary production in arid environments. *Journal of Arid Environments*, 69: 52-358.
- Fernández Mayer, A. E. 2020. Producción de carne con forrajes naturales : estrategias prácticas para mejorar el futuro de la ganadería en regiones áridas, semiáridas y subhúmedas, transformando las malezas o buenazas en carne : incluye recetas de cocinas y propiedades medicinales . Ediciones INTA. Recuperada de : https://inta.gob.ar/sites/default/files/produccion_de_carne_con_forrajes_naturales_-_inta_bordenave.pdf
- Gallo, K.P.; Daughtry, C.S.T.; and Bauer, M.E. 1985. Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Remote Sensing of Environment*, 17: 221–232.
- Golluscio, R. 2009. Receptividad ganadera: marco teórico y aplicaciones prácticas. *Ecología Austral*, 19: 215-232.
- Grigera, G.; Oesterheld, M.; and Pacín, F. 2007. Monitoring forage production for farmers' decision making. *Agricultural Systems*, 94: 637–648
- 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: 11-20
- Jobbágy, E.G.; and Sala, O.E. 2000. Controls of Grass and Shrub aboveground production in the Patagonian steppe. *Ecological Applications*, 10(2): 541- 549
- Lauenroth, W.K.; and Sala, O.E. 1992. Long-term forage production of North American shortgrass steppe. *Ecological Applications*, 2(4): 397-403.
- Lauenroth, W. 1979. Grassland primary production: North American grasslands in perspective. In *Perspectives in grassland ecology*, French, N. (eds). pp 3- 24. Springer-Verlag, New York.

- Le Roux, X.; Gauthier, H.; Begue, A.; and Sinoquet, H. 1997. Radiation absorption and use by humid Savanna grassland: assessment using remote sensing and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85: 117–132.
- Los, S.O.; Collatz, G.J.; Sellers, P.J.; Malmstrom, C.M.; Pollack, N.H.; DeFries, R.S.; Bounoua, L.; Parris, M.T.; Tucker, C.J.; and Dazlich, D.A. 2000. A global 9-Yr biophysical land surface dataset from NOAA AVHRR data. *Journal of Hydrometeorology*, 1: 183–199.
- Martin, B.; Galleano, V.; Spliller, L.C.; Vilche, M.S.; y Montico, S. 2011. Evaluación de la productividad primaria de un pastizal templado en Santa Fe, Argentina. *Archivos de Zootecnia*, 60(232): 965-975.
- Milchunas, D.G.; and Lauenroth, W.K. 1993. Quantitative effects of grazing on vegetation and soils over a global range of environments. *Ecological Monographs*, 63(4): 327-366.
- Monteith, J. 1972. Solar radiation and productivity in tropical. *Journal of Applied Ecology*, 9: 747-766.
- Murphy, A.H. 1970. Predicted forage yields based on fall precipitation in California annual grasslands. *Journal of Range Management*, 23(5): 363-365.
- Oesterheld, M.; Sala, O.E.; and McNaughton, S.J. 1992. Effect of animal husbandry on herbivore-carrying capacity at a regional scale. *Nature*, 356: 234-236
- Oesterheld, M.; Di Bella, C.; and Herdiles, K. 1998. Relation between Noaa-AVHRR satellite data and stocking rate of rangelands. *Ecological Applications*, 8: 207-212.
- Oesterheld, M.; Loreti, J.; Semmartin, M.; and Sala, O.E. 2001. Interannual variation in primary production of a semi-arid grassland related to previous year production. *Journal of Vegetation Science*, 12: 137-142.
- Oesterheld, M.; Oyarzabal, M.; y Paruelo, J. 2013. Aplicación de la Teledetección y los sistemas de información geográfica al estudio y seguimiento de los sistemas ganaderos. Percepción remota y sistemas de información geográfica. Sus aplicaciones en Agronomía y Ciencias Ambientales. Paruelo, J.M.; Di Bella, C.M. y Milkovic, M (eds).Editorial: Hemisferio sur. Buenos Aires, Argentina. Capítulo 12, páginas 283-301.
- Piñeiro, G.; Oesterheld, M.; and Paruelo, J.M. 2006. Seasonal variation of aboveground production and radiation use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems*, 9: 1–19.
- Potter, C.S.; Randerson, J.T.; Field, C.B.; Matson, P.A.; Vitousek, P.M.; Mooney, H.A.; and Klooster, S.A. 1993. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Geochemistry Cycles*, 7: 811–841.
- Rearte, D.H. 2010. Perfil de las cadenas: bovina, aves, cerdos, ovinos y caprinos. Programa nacional de carne. INTA Balcarce. Pp 110.

- Sala, O.E.; Deregibus, V.A.; Schlichter, T.; and Alippe, H. 1981. Productivity dynamics of a native temperate grassland in Argentina. *Journal of Range Management*, 34(1): 48-51.
- Sala, O.E., Parton, W.J., Joyce, L.A.; and Lauenroth, W.K. 1988. Primary production of the Central Grassland Region of the United States. *Ecology*, 69(1): 40-45
- Sala, O.E.; and Austin, A.T. 2000. Methods of estimating aboveground net primary productivity. Pp. 31-43. En: Sala, O.E.; Jackson R.B.; Mooney, H. and Howarth, R.H. (eds.) *Methods in Ecosystem Science*. Springer, New York.
- Sellers, P.J.; Los, S.O.; Tucker, C.J.; Justice, C.O.; Dazlich, D.A.; Collatz, G.J.; and Randall, D.A. 1996. A revised land surface parameterization (Sib2) for atmospheric Gcms. Part II: the generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *Journal of Climate*, 9: 706-737
- Semmartin, M.; Oyarzabal, M.; Loreti J.; and Oesterheld, M.2007. Controls of primary productivity and nutrient cycling in a temperate grassland with year-round production. *Austral Ecology*, 32: 416-428
- Walker, J. 1995. Viewpoint: Grazing Management and Research Now and in the Next Millennium. *Journal of Range Management*, 48: 350-357.