



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Estimación de la productividad primaria neta aérea de sistemas forrajeros con distinto grado de intensificación

Santiago Regueiro

Maestría en Ciencias Agrarias

Opción Ciencias Vegetales

Diciembre, 2025

**Estimación de la productividad primaria
neta aérea de sistemas forrajeros con
distinto grado de intensificación**

Santiago Regueiro

Maestría en Ciencias Agrarias
Opción Ciencias Vegetales

Diciembre, 2025

Esta tesis de maestría se distribuye bajo licencia Creative Commons **reconocimiento**
- no comercial – sin obra derivada.



Tesis aprobada por el tribunal integrado por la Ing. Agr. PhD. Amabelia Del Pino, el Ing. Agr. Dr. Mariano Oyarzabal y el Ing. Agr. PhD. Martín Jaurena el 19 de diciembre de 2025. Autor: Santiago Regueiro. Director: Lic. PhD. Santiago Baeza. Codirector: Lic. PhD. Felipe Lezama.

Agradecimientos

Este trabajo está dedicado a mis padres, cuyo incondicional apoyo me permite hoy tener el orgullo de ser el primer profesional de la familia. También incluyo a familiares y amigos, sin cuya ayuda este trabajo hubiera sido francamente imposible de sacar adelante.

Quisiera agradecer especialmente al Secretariado Uruguayo de la Lana —Juan Pablo y Haroldo—, a Martín Umpierrez, Santiago Scarlato y Familia García, que generosamente han permitido realizar los experimentos en sus predios y han proporcionado información valiosa sobre el manejo de los campos. En la misma línea, va mi sentido agradecimiento a Martín Báez, Cecilia Ríos y Pedro Pañella por el trabajo de campo y la mano tendida. A Gonzalo Rama por su compañerismo y escucha activa a lo largo del proceso, así como a Verónica Pinelli por el método pomodoro —entre otras cuestiones—.

Agradezco especialmente a los miembros del tribunal, verdaderas referencias en sus disciplinas, por su disposición y por los valiosos aportes con los que he tenido el privilegio de contar.

Finalmente, gracias a Felipe y Santiago por abrirme las puertas de la institución, por su ayuda y su paciencia.

Tabla de contenido

	Página
Página de aprobación.....	IV
Agradecimientos	V
Resumen	VIII
Summary.....	X
1. <u>Introducción general</u>	1
1.1. Importancia del bioma pastizal en Uruguay y la región	1
1.2. Pastizales intersembrados	2
1.3. Importancia de la Productividad Primaria Neta Aérea	4
1.4. Descripción de la región geomorfológica Centro-Sur	5
1.5. Situación problema, objetivos e hipótesis	7
2. <u>Intersiembrado de <i>Lotus suaveolens</i> en pastizales naturales y efectos sobre la Productividad Primaria Neta Aérea</u>	8
2.1. <i>Lotus suaveolens</i> overseeding in Natural Grasslands: effects on Aboveground Net Primary Productivity	8
2.2. Resumen	8
2.3. Introducción	9
2.3.1. <u>Relevancia de la estimación de la productividad Primaria de pastizales mediante cortes de biomasa y antecedentes</u>	9
2.3.2. <u>Estacionalidad de la producción forrajera, grupos funcionales e implicancias de la intersiembrado</u>	11
2.3.3. <u>Situación problema y objetivos</u>	13
2.4. Materiales y métodos	14
2.4.1. <u>Área de estudio y diseño experimental</u>	14
2.4.2. <u>Obtención de datos</u>	16
2.4.3. <u>Análisis de datos</u>	17

2.5. Resultados	18
2.5.1. <u>Grupos funcionales de plantas en los sitios experimentales</u>	18
2.5.2. <u>Productividad primaria neta aérea</u>	19
2.6. Discusión	24
2.6.1. <u>Diferencias en PPNA acumulada entre tratamientos</u>	25
2.6.2. <u>Modificaciones en la estacionalidad de la producción y en la composición de tipos funcionales de plantas</u>	26
2.6.3. <u>Comparación de PPNA acumulada de CN y CN-LP con antecedentes</u>	27
2.6.4. <u>Alcances y limitaciones</u>	29
2.7. Referencias	30
3. <u>Estimación de la eficiencia de uso de la radiación y calibración de modelos de estimación remota de PPNA a partir de índices espectrales</u>	36
3.1. Introducción	36
3.1.1. <u>Relevancia de la estimación de PPNA de pastizales mediante sensores remotos</u>	36
3.1.2. <u>Antecedentes regionales y locales</u>	38
3.1.3. <u>Situación problema y objetivos</u>	39
3.2. Materiales y métodos	39
3.2.1. <u>Estimación de RFAA</u>	40
3.2.2. <u>Estimación de PPNA</u>	41
3.2.3. <u>Estimación de EUR</u>	41
3.2.4. <u>Generación y validación de modelos de estimación remota de productividad</u>	42
3.3. Resultados	43
3.3.1. <u>Radiación fotosintéticamente activa absorbida</u>	43
3.3.2. <u>Eficiencia de uso de la radiación</u>	45

3.3.3. <u>Estimación de la PPNA a partir de datos derivados de satelites remotos</u>	46
3.4. Discusión	49
3.4.1. <u>Análisis de fRFA y RFAA</u>	49
3.4.2. <u>Evaluación de la EUR</u>	51
3.4.3. <u>Validación y limitaciones del modelo</u>	53
3.4.4. <u>Implicacias de los resultados y proyecciones futuras</u>	54
4. Síntesis y discusión general	56
5. Bibliografía general	58

Resumen

La ganadería uruguaya se sustenta en el campo natural (CN), que se caracteriza por una marcada estacionalidad productiva y una calidad nutricional limitada. La interseembra de leguminosas con fertilización fosfatada (CN-LP) busca mejorar estos aspectos. La productividad primaria neta aérea (PPNA) es una variable central de los ecosistemas pastoriles, ya que determina, entre otras cuestiones, la capacidad de carga animal. La estimación precisa de la PPNA mediante teledetección optimizaría la eficiencia ganadera y la evaluación de pastizales. Este estudio generó modelos para estimar la PPNA en CN y CN-LP en el largo plazo y en predios comerciales. Se realizaron cortes de biomasa y análisis espectrales, los cuales revelaron una PPNA anual similar entre CN y CN-LP, pero mayor contribución primaveral en CN-LP. Se elaboró un modelo validado que combinó datos de cortes de biomasa de ambos recursos forrajeros con información espectral adquirida simultáneamente por sensores remotos durante las fechas de corte, con el cual se estimó la eficiencia de uso de la radiación (EUR) de 0,90 g MS/MJ única para los tipos de pastizal bajo estudio. Este valor es superior al reportado en los antecedentes directos del presente trabajo. El modelo permite la estimación remota de la productividad de materia seca de ambos tipos de pastizal de la región centro-sur, lo que mejora las capacidades de manejo ganadero y la conservación de pastizales, por citar algunas aplicaciones.

Palabras clave: campo natural, interseembras, teledetección, leguminosas, región centro-sur

Summary

Remote Sensing-Based Modeling of Aboveground Net Primary Productivity in Forage Systems with Varying Intensification Levels

Uruguayan livestock farming relies heavily on native grasslands (NG), characterized by seasonal production and limited nutritional quality. Interseeding with legumes and phosphate fertilization (NG-LF) aims to improve these aspects. Aboveground net primary productivity (ANPP) is a central variable in pastoral ecosystems, determining animal carrying capacity among other factors. Accurate estimation of ANPP through remote sensing would optimize livestock efficiency and grassland assessment. This study developed models to estimate ANPP in NG and long-term NG-LF in commercial farms. Biomass clippings and spectral analyses were conducted, revealing similar annual ANPP between treatments, but higher spring contribution in NG-LF. A validated model was developed, integrating biomass clipping data from both treatments with spectral information acquired concurrently by remote sensors during clipping dates, yielding a radiation use efficiency (RUE) of 0.90 g DM/MJ of intercepted radiation, which was the same for both treatments. This value exceeds those reported in previous studies. This model allows for remote estimation of dry matter productivity in both forage resource types in the south-central region, enhancing livestock management and grassland conservation capabilities, among other applications.

Keywords: grasslands, overseeding, remote sensing, legumes, south central region

1. Introducción general

1.1. Importancia del bioma pastizal en Uruguay y la región

El pastizal es el bioma más extendido del planeta, ocupando un 30 % de la superficie terrestre total (Gibson, 2009; Lemaire et al., 2011). El secuestro de carbono, la purificación del agua y la regulación del clima, los altos niveles de biodiversidad y un incalculable valor cultural son algunos de los numerosos servicios ecosistémicos que este brinda con base en su extensión, heterogeneidad y biodiversidad. Asimismo, el pastizal tiene un rol trascendental para el aprovisionamiento de alimentos, fibras y combustible (Baeza et al., 2011b; Briske, 2017; Gibson, 2009; McNaughton et al., 1989).

Los pastizales se encuentran representados en la totalidad de los continentes, a excepción de la Antártida. Uno de sus principales exponentes en términos de extensión y relevancia son los denominados pastizales del Río de la Plata (PRP), praderas templadas con una superficie aproximada de 700.000 km² abarcando el centro-este de Argentina, el sur de Brasil y la totalidad de Uruguay (Soriano, 1991).

Los pastizales naturales uruguayos, comúnmente denominados *campo natural* (CN), ocupan en la actualidad el 59 % del territorio nacional en una superficie de 11,3 millones de hectáreas (Baeza et al., 2022; Mapbiomas Uruguay, 2024) y presentan una marcada variabilidad asociada a las características edáficas y topográficas de los suelos donde se desarrollan (Lezama et al., 2019). Las regiones de la cuesta basáltica, la cuenca sedimentaria del noreste, las sierras y lomadas del este y la región centro-sur, según la regionalización propuesta por Panario et al. (2015), se caracterizan por una amplia presencia de estos pastizales. Lezama et al. (2019) describen la composición florística de estos pastizales e identifican cinco comunidades y catorce subcomunidades en la totalidad del territorio uruguayo. Según estos autores, las características edáficas y topográficas son los principales factores que determinan la heterogeneidad florística a escala de paisaje, seguidos por el material geológico, que opera a una escala regional. De esta caracterización, dos de las comunidades se

restringen a la cuesta basáltica y el resto se distribuyen a través de las regiones de Sierras y Lomadas del Este, Cuenca Sedimentaria del Noreste y la región Centro-Sur.

El pastizal natural es relevante para el Uruguay no solamente por su diversidad y los servicios ecosistémicos que provee, sino por constituir la base forrajera para la ganadería nacional. Esta fue históricamente una de las principales actividades productivas del país, en una tendencia que sigue hasta nuestros días representando alrededor del 8 % del producto bruto interno, constituyendo el principal rubro de exportación nacional (Uruguay XXI, 2024) y posicionándose en el mercado mundial como pieza clave de la marca país (Dirección de Estadísticas Agropecuarias, 2023; Instituto Nacional de Carnes, 2023). Además de su importancia ecológica y económica, los pastizales naturales uruguayos son un pilar fundamental de la identidad cultural del país. Han inspirado a artistas, escritores y músicos, además de sostener tradiciones rurales, el turismo y la vida comunitaria, integrándose profundamente en la historia, la economía y el paisaje uruguayo (Guido et al., 2025).

1.2. Pastizales intersebrados

Todas las comunidades del pastizal natural uruguayo se caracterizan por la dominancia de gramíneas estivales de metabolismo fotosintético C_4 , acompañadas por hierbas y graminoides subordinados de metabolismo C_3 (Altesor et al., 2005, 2006). Estas especies están adaptadas a desarrollarse en suelos con bajo contenido relativo de nitrógeno (N) y fósforo (P) (Hernández et al., 1995). Como consecuencia, la mayor parte de la productividad de materia seca se concentra en el período primavera-estival (Altesor et al., 2005; Formoso, 1997). Además, la producción forrajera presenta variaciones marcadas en calidad y cantidad tanto entre años como dentro de un mismo año (Beretta et al., 2000; Millot et al., 1987), lo cual representa una importante restricción para los sistemas de producción ganadera (Beretta, 1998; Risso et al., 2002).

El pastizal natural intersebrado con leguminosas y fertilizado con fósforo (CN-LP), comúnmente llamado *mejoramiento extensivo de campo natural*, es un paquete tecnológico introducido en el país hace décadas que busca mitigar estas restricciones

(Medero et al., 1958; Scaglia, 1995). Consiste en la incorporación de semillas de leguminosas sembradas sobre el tapiz existente acompañadas de la aplicación de fertilizantes fosfatados (Risso et al., 2002).

La fertilización en P es un componente esencial, ya que las leguminosas presentan mayores requerimientos de este nutriente para sostener su crecimiento y su capacidad de fijación biológica de N (Risso, 1991; Risso y Carámbula, 1998), mientras que los suelos ganaderos del Uruguay presentan niveles generalmente bajos de fósforo disponible (Zamalvide, 1992). Históricamente se han utilizado superfosfatos simples, triples, y de rocas fosforadas, siendo necesaria una refertilización periódica —cada uno a cuatro años— para mantener niveles adecuados de P en el suelo y asegurar la persistencia de las leguminosas (Morón, 2002; Risso, 1991; Risso et al., 2002).

La interseembra es típicamente realizada en cobertura, siendo las especies del género *Lotus* (*corniculatus*, *pedunculatus* y *suaveolens*) las más ampliamente utilizadas, seguidas en menor medida por el trébol blanco (*Trifolium repens*) (Risso et al., 2002). Entre ellas, destaca *L. suaveolens* — representado en su mayor parte por el cultivar ‘El Rincón’— ampliamente incorporado en los esquemas de interseembra debido a sus bajos requerimientos de fósforo (Risso et al., 2002), su elevada rusticidad, persistencia sin requerimientos específicos de manejo (Risso y Carámbula, 1998) y adaptabilidad a un amplio rango de suelos (Carámbula y Ayala, 2009).

Lotus suaveolens (anteriormente *subbiflorus*) es una especie anual, de semilla pequeña y crecimiento invernal muy lento, con bajo aporte de forraje durante esta etapa del año, y cuya producción se concentra en primavera (Risso y Carámbula, 1998), particularmente entre agosto y diciembre (Ayala y Bermudez, 2001; Carámbula y Ayala, 2009). Su período de floración es amplio y abundante, permitiendo mediante manejos específicos su resiembra natural (Carámbula y Ayala, 2009), lo que le confiere gran habilidad para ocupar espacios intersticiales dentro de la vegetación (Carámbula et al., 1994). Este proceso de resiembra y colonización es particularmente sensible a las condiciones ambientales, requiriendo condiciones de humedad prolongada y temperaturas benignas para alcanzar poblaciones adecuadas y una mayor producción de forraje (Carámbula et al., 1994; Risso y Carámbula, 1998).

Debido a su bajo costo y fácil implementación (Risso, 1991), CN-LP ha sido una tecnología ampliamente incorporada a los esquemas de producción ganadera, en particular durante en la década de 1990 (Risso et al., 2002; Scaglia, 1995) alcanzando en la actualidad una superficie cercana a las 823.000 hectáreas en el país (Dirección de Estadísticas Agropecuarias, 2023). Son diversos los antecedentes que reportan aumentos en la productividad anual y estacional del pastizal intersembrado respecto del campo natural (Ayala y Bermudez, 2001; Formoso y Colucci, 2008; Risso y Carámbula, 1998) así como mejoras en la calidad nutricional del forraje (Beretta, 1998; Del Pino et al., 2016; Rodríguez Palma et al., 2024). Esto explica la optimización de varios índices productivos de la ganadería en los últimos años (Baeza et al., 2011a; Carámbula et al., 1994; Jaurena et al., 2016; Salvo et al., 2008). No obstante, la mayoría de estos estudios se han realizado en condiciones experimentales y en intersiembras de reciente implementación. Existe muy poca información sobre el efecto de esta estrategia en intersiembras con más de doce años de antigüedad y su desempeño en predios comerciales bajo pastoreo, lo que dificulta la extrapolación de los resultados a sistemas productivos reales.

1.3. Importancia de la productividad primaria neta aérea

La productividad primaria neta aérea (PPNA) representa la tasa de generación de nueva biomasa vegetal aérea por unidad de superficie y tiempo y es un estimador directo de la energía disponible para los niveles tróficos superiores (McNaughton et al., 1989), por lo que es una variable clave del funcionamiento ecosistémico (Blumetto et al., 2019; Lobell et al., 2002; Scurlock et al., 2002). Para el caso de pastizales como los del Río de la Plata, la PPNA es el principal control de la carga de ganado en sistemas de ganadería extensiva (Oesterheld et al., 1998; Oyarzabal y Paruelo, 2019). Su correcta determinación contribuye a aumentar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas ganaderos mediante el ajuste de la carga animal para, por un lado, aumentar la productividad de carne, leche y lana por tonelada de materia seca producida y, por otro, preservar los niveles de provisión de servicios ecosistémicos —como el secuestro

de carbono o el mantenimiento de la biodiversidad, por citar algunos ejemplos— (Guido et al., 2014; Paruelo et al., 2011).

La estimación de la PPNA de pastizales ha recurrido tradicionalmente a métodos basados en cosechas de biomasa, los cuales presentan desafíos significativos. Capturar los flujos de biomasa entre crecimiento, consumo, senescencia y descomposición requiere un gran esfuerzo de muestreo intensivo en mano de obra (Scurlock et al., 2002; Oesterheld et al., 2011). Además, su carácter destructivo limita su aplicación en estudios a largo plazo y dificulta la extrapolación de resultados a escalas mayores, especialmente en ecosistemas tan heterogéneos como los pastizales naturales (Baeza et al., 2011b; Sala et al., 1981; Scurlock et al., 2002).

Ante las limitaciones de los métodos tradicionales, el uso de sensores remotos ha emergido en las últimas décadas como una alternativa para estimar la PPNA. Esta aproximación se basa en la capacidad de los índices espectrales, captados por sensores remotos, para reflejar el desempeño fotosintético de la vegetación (Baret y Guyot, 1991; Paruelo et al., 1997; Piñeiro et al., 2006; Ruimy et al., 1994). El modelo de Monteith (1972) proporciona la base teórica para estimar la PPNA a partir de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) y la Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR), variables con una estrecha relación con los índices espectrales. La teledetección permite un monitoreo continuo, a bajo costo y a gran escala, lo que facilita el análisis de series temporales extensas (Baeza et al., 2011b; Grigera et al., 2007; Piñeiro et al., 2006). Sin embargo, la precisión de estas estimaciones depende en gran medida de la caracterización de la variabilidad espacial y temporal de la EUR, así como de sus diferencias entre tipos de cobertura vegetal (Baeza et al., 2011b; Piñeiro et al., 2006; Nouvellon et al., 2000).

1.4. Descripción de la región geomorfológica centro-sur

La región centro-sur, también llamada *escudo de basamento cristalino*, es una de las regiones geomorfológicas del territorio uruguayo (Panario et al., 2015). Se encuentra en la mitad sur del país, entre los 33°00' y los 34°36' de latitud sur y los 55° 28' y 58°05' de longitud oeste, y ocupa una superficie aproximada de 2,25 millones

de hectáreas (12,8 % de la superficie del país), extendiéndose por los departamentos de Florida, Flores, Durazno, noroeste de Colonia y algunas áreas de Soriano, San José y Lavalleja (Panario et al., 2015). El clima de la región es templado a subtropical subhúmedo, con una precipitación media anual de 1300 mm distribuida equitativamente a lo largo del año y una temperatura media anual de 17,7 °C (Castaño et al., 2011).

Destaca, en líneas generales, por su relieve de tipo ondulado con predominancia de lomas irregulares y redondeadas (Millot et al., 1987; Panario et al., 2015). Los suelos predominantes en esta región pertenecen a las unidades San Gabriel-Guaycurú y La Carolina de la *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay escala 1:1.000.000* (Altamirano et al., 1976). La primera se compone de suelos de tipo brunosol de superficiales a moderadamente profundos, colores pardo-rojizos, texturas francas, ácidos, contenido medio de materia orgánica, pendientes entre 5 y 9 % y fertilidad media (DGRN, 2017; Risso, 1991); mientras que la segunda se compone de suelos profundos y arcillosos, colores pardos grisáceos a oscuros, contenido medio-alto de materia orgánica, pendientes entre 2 y 4 % y de fertilidad natural alta. Todos ellos son moderadamente bien drenados y permeabilidad media a alta (DGRN, 2017).

El uso dominante de suelo de esta región es la agricultura (54 %), seguido por la ganadería (42 %) y por la forestación (4 %). Cerca del 39 % de la superficie total de la región está compuesta por pastizales naturales (Baeza et al., 2019). Este hecho resalta la importancia del pastizal nativo para la producción ganadera local, fundamentalmente en un contexto de alta fragmentación como resultado del avance de la agricultura y la forestación (Mello et al., 2023).

La vegetación predominante está compuesta por gramíneas estivales de metabolismo fotosintético C₄ (*Paspalum*, *Axonopus*, *Andropogon*) e invernales C₃ (*Nassella*, *Piptochaetium*, *Vulpia*, *Hordeum*, *Lolium*, *Gaudinia*), estas últimas más preferidas/palatables, pero con menor frecuencia en primavera-verano, lo que reduce la producción invernal al 11 % de la PPNA anual total (Formoso, 2005; Risso et al., 2002). La baja productividad de las pasturas naturales, debido a suelos superficiales y una distribución estacional desigual del forraje, provoca crisis forrajeras severas en invierno, y ocasionalmente en verano (Risso y Scavino, 1978; Formoso, 1997). Esto

ha impulsado la adopción en la región de la tecnología de CN-LP, favorecida por décadas de investigación en centros experimentales locales (Carámbula y Ayala, 2009; Risso, 1991; Risso y Montossi, 2002).

1.5. Situación problema, objetivos e hipótesis

A pesar de la amplia adopción de CN-LP en los sistemas ganaderos uruguayos y los numerosos estudios que han evaluado sus efectos sobre la productividad –principalmente en el corto plazo–, los antecedentes que reportan productividad de materia seca en intersembras de largo plazo son muy escasos. Además, si bien la teledetección ofrece una herramienta útil para estimar la PPNA, su aplicación en sistemas complejos como los pastizales naturales e intersembrados aún requiere de mayor desarrollo, particularmente en la generación de nuevas estimaciones locales de parámetros biofísicos clave (como EUR) que permitan mejorar la precisión de los métodos remotos. El presente trabajo busca aportar en esta dirección mediante la generación de modelos específicos para la región centro-sur de Uruguay, con potencial para apoyar la toma de decisiones en la gestión de los pastizales.

El objetivo general del presente trabajo es el de evaluar las diferencias en términos de PPNA entre el pastizal natural (CN) y el pastizal natural intersembrado (CN-LP) por períodos prolongados de tiempo (≥ 12 años) en potreros bajo pastoreo de predios comerciales de la región geomorfológica centro-sur. Por otro lado, pretende generar modelos matemáticos que viabilicen la estimación remota de la productividad mediante información espectral.

Específicamente, el capítulo II aborda la estimación de PPNA de ambos sistemas forrajeros a través de cortes de biomasa. Esta información es utilizada en el capítulo III para la estimar la EUR de los pastizales bajo análisis y generar modelos para estimar la PPNA a través de información derivada de sensores remotos.

La hipótesis planteada es que el CN-LP tiene una mayor capacidad de absorción de radiación y/o una mayor eficiencia en el uso de la radiación que el -CN por cambios en la fertilidad y/o cambios en la composición de especies, lo que se traduce en una mayor PPNA estacional y total.

2. Intersiembra de *Lotus suaveolens* en pastizales naturales y efectos sobre la productividad primaria neta aérea¹

Ing. Agr. Santiago Regueiro²

2.1. *Lotus suaveolens* Overseeding in Natural Grasslands: Effects on Aboveground Net Primary Productivity

This chapter examines the long-term effects on Aboveground Net Primary Production (ANPP) in natural grasslands (NG) and natural grassland overseeded with legumes and fertilized with phosphorus (NGLP) in the south-central region of Uruguay. A mensurative experiment was conducted on three commercial farms with overseedings older than 12 years, using biomass harvest to measure ANPP. Although overseeded grasslands showed a 30% higher accumulated ANPP than natural grasslands, the differences were not statistically significant. However, a marked seasonal variation was detected during spring, where ANPP was 80% higher in overseeded grasslands due to the growth cycle of *Lotus suaveolens* and the increased cover of annual grasses. These findings are consistent with previous studies emphasizing the seasonal nature of ANPP in NGLP. Overall, this study provides evidence of the variability in long-term overseeded systems and highlights the need to continue evaluating the factors that modulate their productive performance.

Keywords: grasslands, overseeding, legumes, ANPP, seasonality

2.2. Resumen

Este capítulo analiza los efectos de largo plazo sobre la productividad primaria neta aérea (PPNA) de pastizales naturales (CN) y pastizales naturales intersembrados con leguminosas y fertilizados con fósforo (CN-LP) en la región centro-sur de Uruguay. Se realizó un experimento mensurativo en tres predios comerciales con intersiembras

¹ Este artículo se presenta bajo las instrucciones de la revista *CUHSO* – Universidad Católica de Temuco (Chile).

² Departamento de Sistemas Ambientales, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. Email: sregueiro@fagro.edu.uy

de más de doce años de antigüedad, utilizando cortes de biomasa para medir la PPNA. Se realizaron cortes sucesivos de biomasa durante un año utilizando jaulas de exclusión del ganado. CN-LP presentó una PPNA acumulada 30 % mayor que CN, aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas. Por otro lado, sí se detectaron diferencias marcadas entre tratamientos en primavera donde la PPNA fue 80% mayor en los pastizales intersembrados, posiblemente debido al ciclo de crecimiento de *Lotus suaveolens* y al aumento de la cobertura de gramíneas anuales. Estos resultados concuerdan con estudios previos que destacan el aumento en la productividad primaveral de los pastizales intersembrados. Este estudio proporciona evidencia de la variabilidad en la PPNA de las intersembras de largo plazo y resalta la necesidad de continuar evaluando los factores que modulan su desempeño productivo.

Palabras clave: pastizales, intersembras, leguminosas, PPNA, estacionalidad

2.3. Introducción

2.3.1. Relevancia de la estimación de la PPNA de pastizales mediante cortes de biomasa y antecedentes

La PPNA corresponde a la tasa de producción de biomasa aérea por unidad de superficie y de tiempo. Se trata de un atributo de alto impacto en cualquier ecosistema de pastizal, integrando en su valoración diferentes aspectos de su estructura y funcionamiento, como la producción de biomasa de herbívoros (McNaughton et al., 1989) y, por consiguiente, la capacidad de carga animal de una determinada cobertura (Oesterheld et al., 1998).

Esta medida de flujo presenta una alta variabilidad en distintas escalas espaciales y temporales. En el plano espacial, varía de forma marcada a lo largo de gradientes regionales —fundamentalmente de precipitación (Paruelo et al., 1999)—, mientras que, a escala más localizada, su variación puede estar marcada por gradientes topográficos, edáficos y de disturbio (Altesor et al., 2005; Oesterheld et al., 1999). A escala temporal, la productividad tiene una fuerte variación interanual explicada en

gran medida por la dinámica de las precipitaciones (Knapp y Smith, 2001; Oesterheld et al., 2001), lo que genera incertidumbre en el manejo y explotación de estos recursos por la explotación ganadera (Paruelo et al., 1999; Sala y Austin, 2000). De la gran variabilidad observada en la PPNA deriva la dificultad de estimarla (Piñeiro et al., 2006; Sala y Austin, 2000; Scurlock et al., 2002). La aproximación más clásica para realizarla en pastizales templados es el corte estacional de biomasa (Sala y Austin, 2000; Paruelo et al., 2010). Esta metodología consiste en realizar, a intervalos regulares de tiempo, cosechas sucesivas de la vegetación por encima de una altura predeterminada y registrar correspondientemente el peso seco del material cosechado. En áreas bajo pastoreo animal, se recomienda asimismo limitar el acceso mediante el uso de jaulas móviles (Frame, 1993; Klingman et al., 1943).

Los pastizales naturales templados, como los del Río de la Plata, pueden categorizarse como coberturas vegetales de alto recambio (del inglés *fast turnover*, Sala y Austin, 2000). Este tipo de ambientes se caracterizan por presentar una alta relación PPNA:biomasa generada, compuesta por individuos de pequeño tamaño y ciclo de vida relativamente corto. En el mismo sentido, al igual que en la mayoría de los ecosistemas sujetos a estreses de distinto tipo (excesos/déficits hídricos, competencia por luz, presencia de pastoreo, entre otros), la PPNA y la senescencia ocurren de forma simultánea. Teniendo estos aspectos en consideración, se han propuesto metodologías que separan la biomasa cosechada por componentes de material verde y seco y que calculan la PPNA en determinado momento como la diferencia positiva de dos mediciones sucesivas de biomasa aérea dividido el número de días entre cortes (Sala et al., 1981).

Existen numerosos trabajos que reportan datos de PPNA de pastizales naturales de los pastizales del Río de la Plata mediante cortes de biomasa. El trabajo de Paruelo et al. (2010) contiene una revisión general de estos; la PPNA promedio reportada, cuyas estimaciones cubren por lo general entre uno a tres años, se ubican en el rango de 2100 a 9772 kg MS/ha/año, y un promedio de 5347 kg MS/ha/año. Estos autores también señalaron la importante variabilidad interanual observada, con un rango entre las productividades máximas y mínimas del orden del 80 % de la PPNA promedio del sitio.

Como reportan Singh et al. (1975) y Scurlock et al. (2002), las estimaciones de PPNA están altamente influenciadas por la metodología utilizada, lo cual lleva a que, incluso para un mismo sitio y período, la PPNA estimada tenga una variación muy grande dependiendo del método de cálculo utilizado. Del mismo modo, la altura a la cual se realizan los cortes resulta ser una consideración de importancia pocas veces analizada e incluso especificada en los trabajos. Particularmente, Pezzani et al. (2017) determinaron que, para dos comunidades de pastizal natural de la región geomorfológica Sierras y Lomadas del Este, del Uruguay, la estimación de PPNA cortando al ras fue significativamente superior a la PPNA estimada cortando a una altura de 2 cm. Además, el efecto del método de corte fue dependiente de la estación del año, siendo significativamente superior en verano frente al resto de las estaciones analizadas. Esto dificulta la comparación formal de la productividad de diferentes comunidades de pastizal o sitios, lo que señala la importancia de estandarizar la metodología de corte para reducir la incertidumbre asociada a las estimaciones de PPNA y contribuir a la construcción de bases de datos más robustas.

2.3.2. Estacionalidad de la producción forrajera, grupos funcionales e implicancias de la intersiembra

Los pastizales naturales exhiben una marcada estacionalidad en su PPNA anual, una característica influenciada por la interacción de diversos factores climáticos, edáficos y biológicos. En términos generales, las comunidades de pastizal natural del Uruguay muestran un pico de producción primaveral asociado principalmente a la contribución de especies con metabolismo C_3 (Altesor et al., 2005), seguido por un segundo pico de productividad estival asociado al desarrollo de especies de metabolismo C_4 , (Formoso, 1997; Millot et al., 1987). Altesor et al. (2005) señalan que el pastoreo puede influir en la estacionalidad de la PPNA, promoviendo la dominancia de especies C_4 y aumentando la PPNA de verano, en contraste con los pastizales excluidos al acceso del ganado, donde predominan las especies C_3 y la PPNA es mayor en primavera y otoño.

Los tipos funcionales de plantas se refieren a grupos de especies que comparten características similares en cuanto a sus respuestas ecológicas y su rol en el ecosistema, las cuales pueden incluir aspectos como el hábito de crecimiento (gramíneas erectas, malezas enanas), el tamaño de las semillas, la duración del ciclo de vida, la época de crecimiento (perennes vs. anuales), y la tolerancia al pastoreo, entre otros (Rodríguez et al., 2003; Silveira et al., 2022). Estas diferentes clasificaciones se definen en función de diversos rasgos estructurales y funcionales, y la forma en que las especies se agrupan dentro de estos tipos depende de los rasgos seleccionados para el análisis. Así, diferentes estrategias de agrupamiento pueden surgir dependiendo de los objetivos específicos del estudio, lo que permite adaptar la clasificación de las especies a las necesidades ecológicas o productivas que se busquen entender.

La tecnología CN-LP ha mostrado capacidad para mejorar el desempeño productivo de los pastizales naturales. Diversos estudios reportan incrementos significativos en la PPNA respecto al campo natural sin intervención (Ayala y Bermudez, 2001; Carámbula et al., 1994; Formoso y Colucci, 2008; Risso y Carámbula, 1998). Asimismo, se han documentado mejoras en la calidad nutricional del forraje, especialmente en intersembras con leguminosas perennes (Beretta, 1998; Del Pino et al., 2016, 2021; Rodríguez Palma et al., 2024).

No obstante, sus efectos sobre la diversidad de especies son más complejos. Algunas investigaciones han demostrado reducciones en la riqueza de especies nativas como consecuencia de la intersembrado (Jaurena et al., 2016; Lezama et al., 2024; Millot et al., 1987). En otros casos se ha observado un aumento en la proporción de especies exóticas sin afectar la riqueza total o incluso aumentándola (Oliveira et al., 2015; Risso et al., 2002).

En pastizales intersembrados con leguminosas perennes, se ha documentado una marcada disminución de su persistencia con el paso del tiempo, atribuida principalmente al aumento de la competencia ejercida por las gramíneas estimuladas por el nitrógeno fijado y a su sistema radicular más desarrollado, que les confiere mayor capacidad de exploración y aprovechamiento de recursos. En Uruguay, Del Pino et al. (2016) reportaron una caída de la producción de la leguminosa perennes a menos de 100 kg MS/ha/año hacia el sexto año bajo pastoreo. Sin embargo, no existe

información disponible sobre la persistencia a largo plazo de especies anuales como *Lotus suaveolens*.

A pesar de la abundante evidencia generada en condiciones experimentales, existe escasa información sobre los efectos combinados de la interseembra y la fertilización en CN-LP con más de una década de establecimiento y bajo manejo comercial real. Esta brecha resalta la importancia de evaluar no solo los beneficios productivos de estas tecnologías, sino también sus implicancias a largo plazo sobre la biodiversidad y la estabilidad de los ecosistemas pastoriles.

2.3.3. Situación problema y objetivos

Si bien la CN-LP han sido ampliamente adoptadas para mejorar la PPNA de los pastizales naturales, los estudios que evalúan el impacto de estas prácticas a largo plazo en la PPNA son escasos. Además, los antecedentes disponibles presentan resultados contradictorios, con algunas investigaciones que reportan aumentos significativos en la PPNA de los pastizales intersembrados (Jaurena et al., 2016), mientras que otras no encuentran diferencias frente al campo natural (Del Pino et al., 2021). Cabe destacar que ninguno de estos estudios fueron llevados a cabo en la región Centro-Sur, lo que acentúa la necesidad de evaluaciones en esta área.

La falta de consenso, sumada a la escasez de estudios en predios comerciales con interseembras de más de diez años de antigüedad, resalta la importancia de seguir evaluando estos sistemas en condiciones reales de manejo. En este contexto, la estimación de la PPNA mediante cortes de biomasa constituye un insumo clave para viabilizar la estimación remota de la productividad mediante información satelital, trabajo que se abordará en el capítulo III.

El objetivo general del presente capítulo es estimar la PPNA de dos tipos de pastizales —campo natural (CN) y campo natural intersembrado con leguminosas y fertilización fosfatada (CN-LP)— en predios comerciales del centro-sur de Uruguay, utilizando la metodología de cortes de biomasa, y analizar las diferencias productivas a lo largo de un ciclo anual.

Específicamente, se evaluará la PPNA anual y estacional obtenida para cada recurso forrajero y se compararán los resultados con antecedentes regionales en intersembras de corto y largo plazo. La hipótesis de trabajo es que CN-LP tiene una mayor PPNA total y estacional, explicada por aumentos en la fertilidad y/o cambios en la composición de las especies.

2.4. Materiales y métodos

2.4.1. Área de estudio y diseño experimental

El estudio fue realizado en dos establecimientos ganaderos comerciales y en el área de producción del campo experimental del Secretariado Uruguayo de la Lana (SUL, ex-CIEDAG), ubicados en el departamento de Florida (Uruguay), en la región geomorfológica Centro-Sur (figura 1). La precipitación media anual para el período 1991-2020 en la ciudad de Durazno (cercana al área de estudio) fue de 1265 mm, mientras que la temperatura media anual fue de 18,5 °C (Instituto Nacional de Meteorología, 2020).

La figura 2 presenta las condiciones climatológicas durante el período experimental, comparando los registros de precipitación y temperatura provenientes de la estación meteorológica ubicada en uno de los predios estudiados con los promedios históricos de la región. Se destaca que, durante la primavera y el verano, las temperaturas medias fueron superiores a los valores históricos, mientras que las precipitaciones se ubicaron muy por encima del promedio, especialmente durante el período estival.

En los tres predios, se seleccionaron cinco pares de potreros linderos de CN y CN-LP (bloques) que presentaban similar topografía, con el propósito de reducir la influencia de factores edáficos. La edad de la intersiembra, desde el inicio de los experimentos, fue en todos los casos superior a doce años. Todos los potreros donde se realizaron las estimaciones fueron sembrados con *Lotus suaveolens*, cultivar ‘El Rincón’ (de ahora en más, LR) desde fines de la década de 1990 hasta mediados de la década del 2000 (tabla 1). Todos fueron fertilizados con fósforo en grado variable (de forma anual, bianual o esporádica).

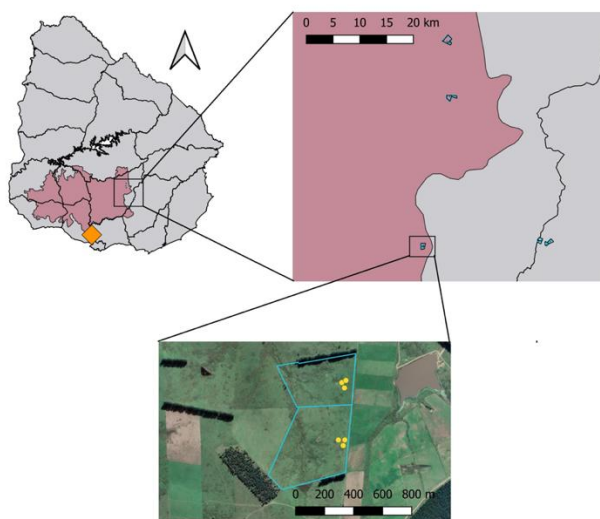
Tabla 1

Nombre y código de los establecimientos, coordenadas geográficas y años transcurridos desde la intersembrá con Lotus suaveolens y fertilización fosfatada (CN-LP) hasta el momento del muestreo

Establecimiento	Código	Latitud	Longitud	Edad de intersembrá
Doña Teresa	SCAR 1	-33.859580	-55.333937	13
	SCAR 2	-33.855326	-55.352043	20
SUL	SUL	-33.867971	-55.586190	21
El Sauce	UMPI 3	-33.615503	-55.530766	17
	UMPI 6	-33.524492	-55.540137	12

Figura 1

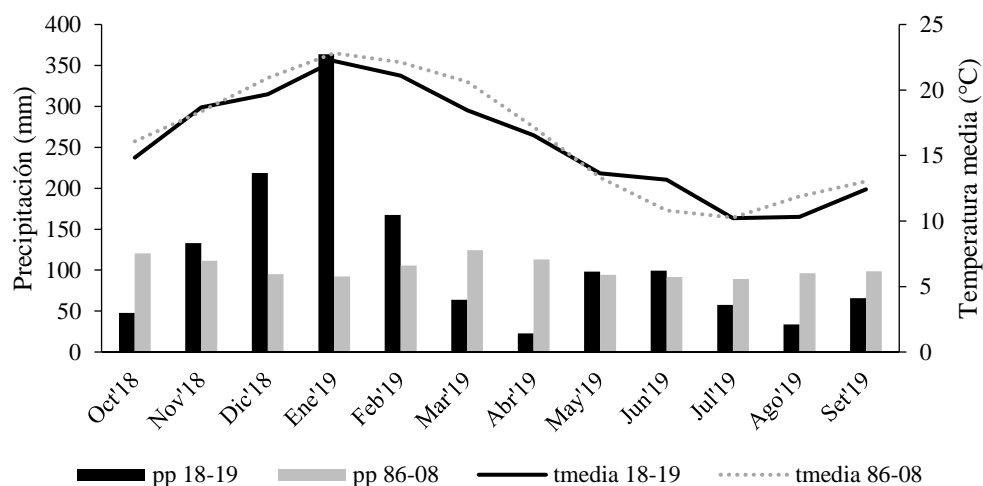
Ubicación de los experimentos en la región geomorfológica centro-sur



Nota. La imagen inferior muestra un ejemplo de par CN:CN-LP; los puntos claros muestran la ubicación de las jaulas móviles, superpuestos sobre una imagen satelital Google Hybrid. El rombo simboliza la estación meteorológica desde la cual se obtuvieron los datos de radiación fotosintéticamente activa incidente (RFAi, ver capítulo III).

Figura 2

Precipitación mensual (pp) y temperatura del aire medias (tmedias) durante los experimentos frente a registros históricos 1986-2008



Nota. Fuente: Secretariado Uruguayo de la Lana (SUL, 2024).

2.4.2. Obtención de datos

En cada uno de los diez potreros (5 pares), se instalaron tres jaulas móviles de exclusión con el objetivo de impedir el pastoreo directo de los animales y evaluar la PPNA mediante cortes sucesivos de biomasa. Las fechas de corte que determina cada período experimental se presentan en la tabla 2.

Tabla 2

Períodos experimentales, fechas de corte para franja inicial (t0) y final (t1)

Período experimental	Fecha corte t0	Fecha corte t1	Días
PRIM 2018	28/09/2018	3/12/2018	66
VER 2018-2019	4/12/2018	4/2/2019	62
VERANO-OTOÑO 2019	5/2/2019	4/4/2019	58
OTOÑO-INVIERNO 2019	5/4/2019	29/6/2019	85
INVIERNO 2019	30/6/2019	3/10/2019	96

El procedimiento de corte de biomasa, similar a la metodología de Klingman et al. (1943), implicó realizar cortes al ras del suelo. Al inicio de cada período de evaluación se cortó un área de 0,2 x 0,5 m perteneciente al momento t0 y se colocó adyacentemente una jaula de exclusión. Después de un lapso de entre 58 a 96 días se efectuaron cortes en dos cuadrantes de 0,2 x 0,5 m cada uno dentro de la jaula, correspondiendo el peso de esa biomasa al momento t1. En cada período reportado en la tabla 2, el procedimiento se repitió en el mismo potrero moviendo la jaula a una distancia máxima de diez metros entre cada medición. De todo el material cosechado, se tomó una submuestra de aproximadamente 1/3 del volumen total, la cual se separó en sus componentes verde y seco. Luego, tanto la submuestra como el resto del material cosechado fueron secados en estufa a 70 °C hasta alcanzar un peso constante.

Por otra parte, hacia fines del período experimental se realizó una caracterización general de los sitios relevados registrando la abundancia de los diferentes tipos funcionales que componían la vegetación (gramíneas anuales, gramíneas perennes estivales e invernales, dicotiledóneas y graminoides), el porcentaje de LR presente y variables estructurales como porcentaje de suelo desnudo y restos secos. Estas mediciones se realizaron en cinco cuadros de 1 m² de lado por potrero distribuidos en forma sistemática. Asimismo, dentro de las áreas cortadas de t0 se realizaron cinco mediciones de altura en la cual se concentra la biomasa.

2.4.3. Análisis de datos

La PPNA estacional, expresada en gMS/m²/día, se calculó como la suma de las diferencias positivas entre la biomasa total final (t1) y la total inicial (t0) de cada fracción vegetal por separado (biomasa verde y seca en pie), dividida por el número de días de crecimiento entre las fechas de corte, según la siguiente ecuación (Sala y Austin, 2000):

$$PPNA = \frac{(\Delta B_{verde}^+ + \Delta B_{seco}^+)}{d_i}$$

donde ΔB^+ representa la diferencia positiva entre t1 y t0 de cada fracción, respectivamente, y d_i la duración del período (en días). La fracción seca en pie fue

considerada como parte de la biomasa aérea total, en tanto corresponde a tejido producido con anterioridad que permanece estructuralmente en la planta. Sin embargo, dado el intervalo temporal entre t_0 y t_1 , no es posible discriminar qué proporción de los incrementos observados en la biomasa seca entre t_0 y t_1 se originó efectivamente dentro del período evaluado. En consecuencia, los incrementos positivos en la biomasa seca en pie se incorporaron al cálculo de la PPNA como aumentos de biomasa aérea asociados a procesos de crecimiento y senescencia ocurridos durante el período. Todas las diferencias negativas se fijaron en cero al estimar la PPNA, dado que ésta representa únicamente la generación de nuevo tejido vegetal y no contempla pérdidas.

La PPNA acumulada total se calculó mediante la suma total del producto entre cada una de las PPNA estacionales y la duración, en días, de cada período.

La PPNA anual de ambos tratamientos fue comparada mediante una prueba t de Student que se repitió para cada uno de los componentes de la PPNA registrados (diferencias en biomasa verde y biomasa seca entre cortes). La productividad estacional de cada tratamiento, la cantidad de tejido verde y seco hallados en cada período y la altura promedio dentro de las áreas cortadas de t_0 y t_1 se compararon mediante un ANOVA de medidas repetidas, utilizando el tipo de recurso forrajero como factor intersujeto y el período como factor intrasujeto. Además, las diferencias en la PPNA y cantidad de tejido verde y seco entre tratamientos en cada período se evaluaron mediante una prueba de comparación de medias múltiples de Fisher. Todos estos análisis estadísticos se realizaron utilizando el software Graphpad Prism 8.0.2.

2.5. Resultados

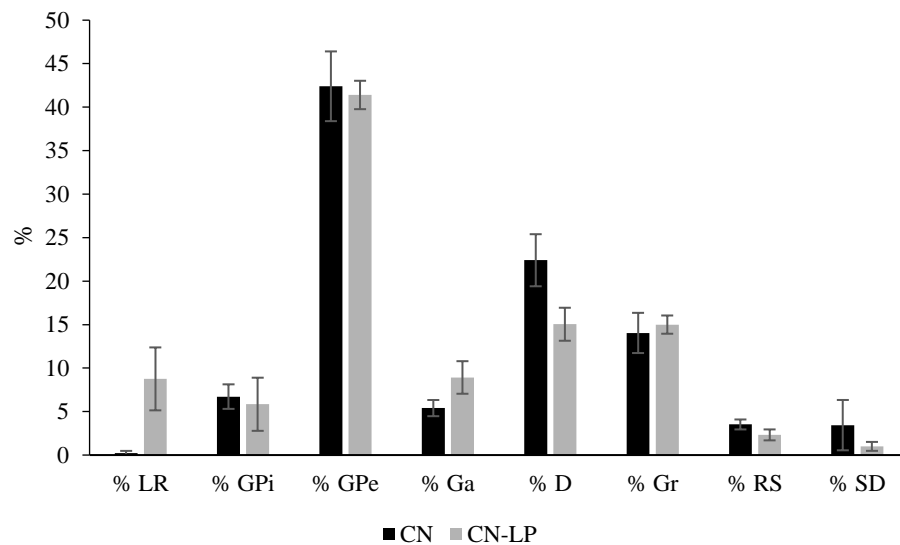
2.5.1. Grupos funcionales de plantas en los sitios experimentales

A partir de la caracterización general de los sitios hacia fines del período experimental, se observó una dominancia generalizada de gramíneas perennes estivales en ambos tratamientos, con coberturas entre 35 % y 58 %. En segundo lugar, se registró una mayor proporción de dicotiledóneas, seguidas por los graminoides. Entre los grupos funcionales, se constataron diferencias marcadas en los valores de cobertura de LR (CN = 0,24 % vs. CN-LP = 8,8 %), gramíneas anuales (CN = 5,4 %

vs. CN-LP = 8,9%) y dicotiledóneas (CN = 22,4 % vs. CN-LP = 15,0 %). Si bien no se realizaron análisis estadísticos, estas diferencias sugieren un efecto de la intersembra sobre la composición funcional de la comunidad vegetal (figura 3).

Figura 3

Porcentaje de cobertura de tipos funcionales, restos secos y suelo desnudo por tratamiento



Nota. %LR: *Lotus suaveolens* (LR); GPi: gramíneas perennes invernales; %GPe: gramíneas perennes estivales; %Ga: gramíneas anuales; %D: dicotiledóneas; %Gr: gramínoides; %RS: restos secos; %SD: suelo desnudo. Los valores representan el promedio de cinco cuadros de 1 m² en cada potrero hacia fines del período experimental. Las barras de error representan el error estándar de la media ($\sigma/\sqrt{(n)}$).

2.5.2. Productividad primaria neta aérea

Los valores promedio de PPNA, estimados a través de los cortes de biomasa, mostraron una marcada estacionalidad en ambos tratamientos y diferencias en sus patrones productivos. En CN-LP, la máxima PPNA estacional se registró en el período PRIM 2018, donde alcanzó 5,15 g MS/m²/día, mientras que en CN el pico ocurrió en VER 2018-2019, con 3,35 g MS/m²/día. En ambos tratamientos, los valores más bajos se observaron en INV 2019, con 0,55 g MS/m²/día en CN-LP y 0,30 g MS/m²/día en CN (figura 4).

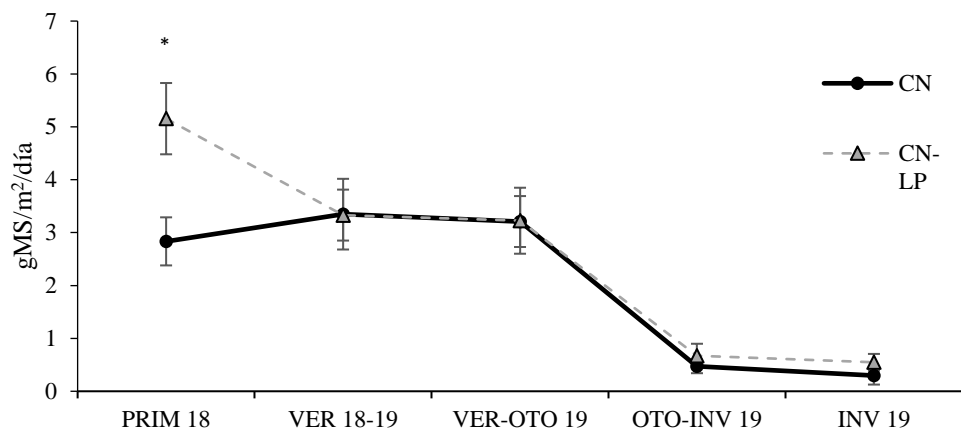
La productividad por estaciones difirió de forma marcada entre tratamientos. El CN presentó un patrón bimodal, con niveles de producción relativamente constantes en primavera y verano, y mínimos en otoño e invierno. En contraste, CN-LP exhibió un comportamiento escalonado, con un pico marcado en primavera, seguido de niveles intermedios en verano y otoño y mínimos en invierno.

En referencia a la productividad estacional, no hubo diferencias significativas entre tratamientos ($F = 2,03$; $GL = 1$, $p = 0,19$; figura 4), salvo en la primavera de 2018 ($p = 0,02$), observándose una interacción significativa entre el tratamiento y el tiempo ($F = 2,98$, $g^{\circ}L = 4$, $p = 0,03$) (figura 4).

Considerando el total del período experimental, no hubo diferencias significativas entre la PPNA acumulada anual entre los distintos tipos de pastizal ($t = 1,25$; $g^{\circ}L = 4$; $p = 0,28$; figura 5A), tampoco en la cantidad de biomasa seca ($t = 0,28$; $g^{\circ}L = 4$, $p = 0,79$; figura 5B) ni de la biomasa verde ($t = 1,66$; $g^{\circ}L = 4$; $p = 0,17$; figura 5C). La PPNA anual acumulada, promedio entre los cinco sitios, fue de 6556 ± 718 kg MS/ha para el tratamiento CN y de 8529 ± 987 kg MS/ha para CN-LP —aproximadamente un 30 % mayor—.

Figura 4

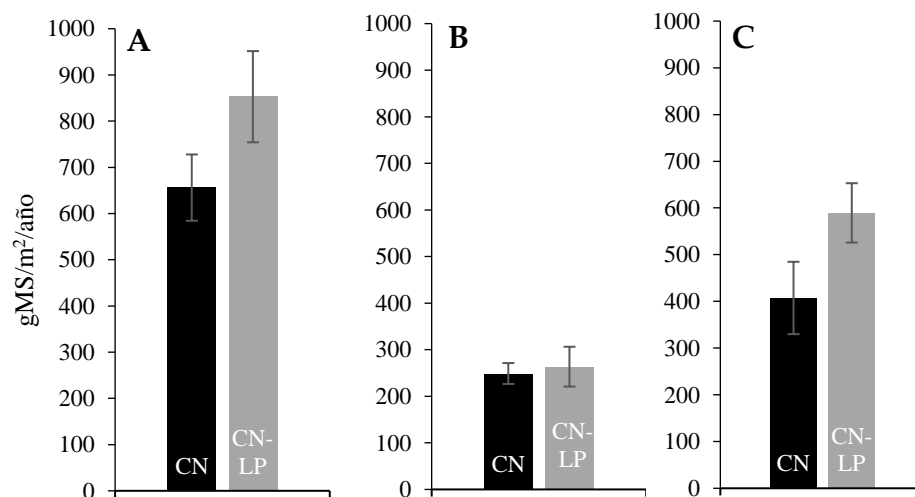
Productividad primaria neta aérea estacional de cada tratamiento



Nota. Las barras de error representan el error estándar de la media ($\sigma/\sqrt{(n)}$). El * muestra significancia en la diferencia de PPNA entre tratamientos para un período en particular.

Figura 5

Productividad Primaria Neta Anual por tratamiento. A) Productividad primaria neta aérea acumulada total. B) Componente de biomasa seca dentro de PPNA acumulada anual. C) Componente de biomasa verde acumulada anual



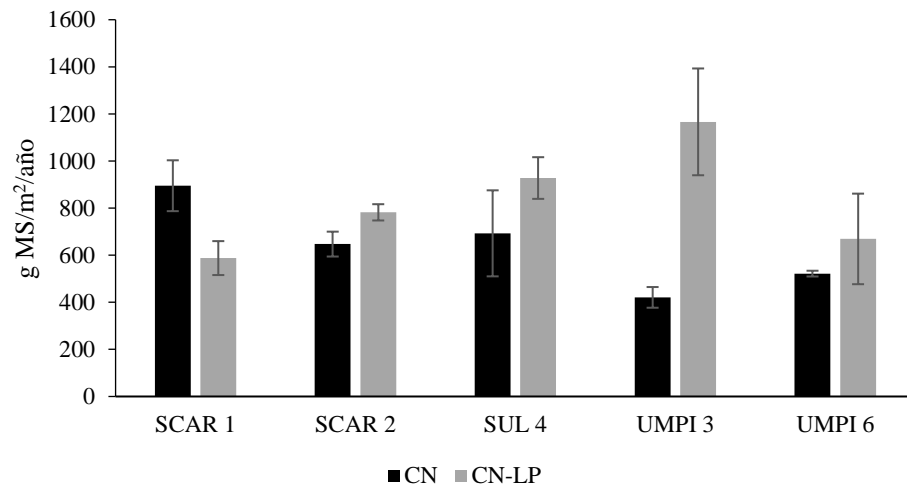
Nota. Las barras de error representan el error estándar de la media ($\sigma/\sqrt{(n)}$).

Desagregando la productividad acumulada por tratamiento y bloque, se observa que CN-LP ha producido levemente más biomasa que CN en tres de los cinco pares (20-33 % superiores), mientras que estas diferencias fueron mucho más altas en UMPI

3, donde CN-LP produce 150 % más biomasa que CN. Lo opuesto aconteció en el caso de SCAR 1, en donde el CN produjo 40 % más que CN-LP (figura 6).

Figura 6

PPNA acumulada anual según tratamiento y predio

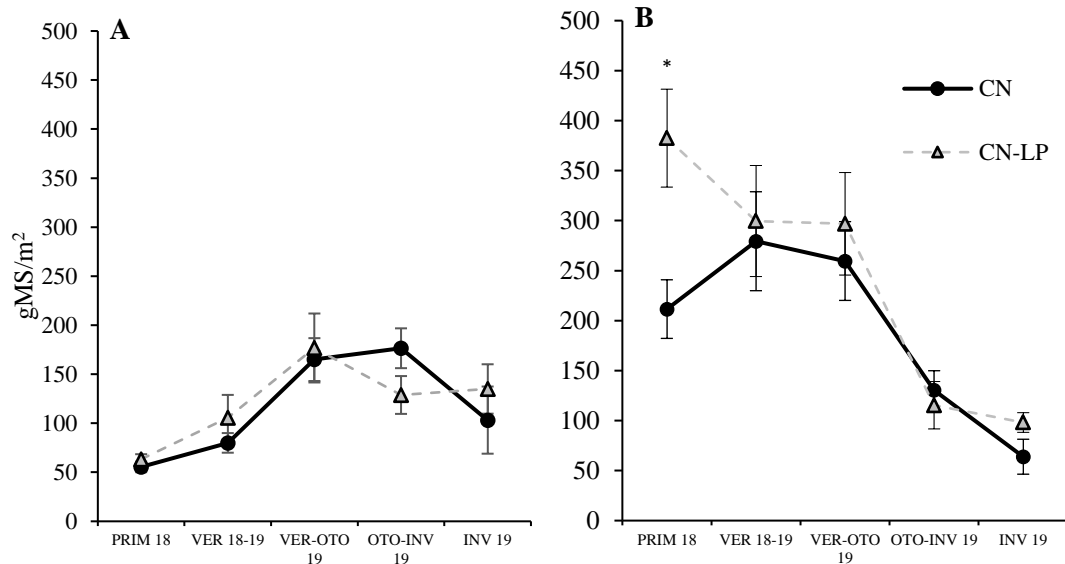


Nota. Las barras de error representan el error estándar de la media ($\sigma/\sqrt{(n)}$).

En cuanto a los componentes verde y seco presentes dentro de las jaulas de exclusión en cada fecha de corte t1 (figura 7), no hubo diferencias significativas entre CN y CN-LP a lo largo del tiempo ($F = 1,784$, $g^{\circ}L = 1$, $p = 0,22$ para verde y $F = 1,28$, $g^{\circ}L = 1$, $p = 0,76$ para seco, respectivamente), salvo en el componente verde en PRIM 2018, donde se registró una diferencia significativa en favor de la intersiembra frente al pastizal natural ($p = 0,02$) (interacción tratamiento y tiempo, $F = 2,7$, $p = 0,04$).

Figura 7

Biomasa seca por tratamiento (A) y biomasa verde (B) presentes en cada período al momento del corte t1

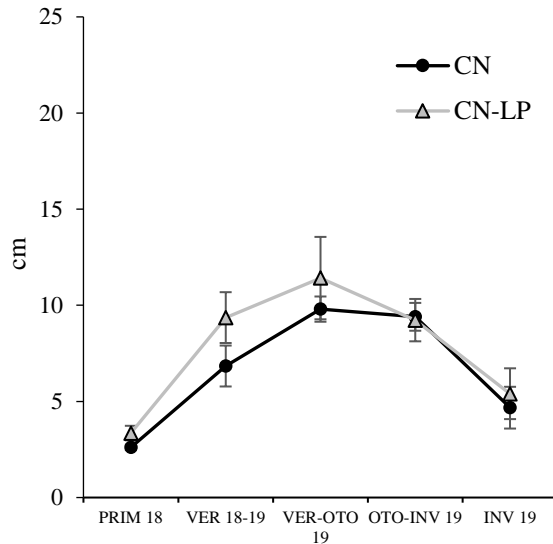


Nota. Las barras de error representan el error estándar de la media ($\sigma/\sqrt{(n)}$). El * muestra significancia en la diferencia de PPNA entre tratamientos para un período en particular.

Respecto de las alturas del dosel bajo pastoreo (en t0), se observa una tendencia a una mayor altura de CN-LP respecto de CN. Estas diferencias fueron máximas hacia fines de 2018 (2,5 cm en promedio) y mínimas al comenzar el otoño del año 2019 (0,2 cm en promedio); no obstante, no existieron diferencias significativas entre ambos tipos de recursos a lo largo del tiempo ($F = 1,28$, $g^{\circ}L = 1$, $p = 0,29$, figura 8).

Figura 8

Altura promedio de las parcelas durante t0



Nota. Las barras de error representan el error estándar de la media (σ/\sqrt{n}). El * muestra significancia en la diferencia de altura entre tratamientos para un período en particular.

2.6. Discusión

Este estudio constituye la primera evaluación a largo plazo (>12 años) de la productividad de intersembras de leguminosas y fertilización fosfatada en pastizales naturales bajo manejo comercial en la región centro-sur de Uruguay. Hasta la fecha, la mayoría de los estudios han evaluado efectos en el corto plazo o en condiciones experimentales sin pastoreo, por lo que este estudio contribuye a llenar un vacío de conocimiento sobre el impacto real de estas prácticas sobre la PPNA de sistemas productivos a largo plazo.

Los resultados no apoyaron la hipótesis planteada inicial, ya que no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos en la PPNA acumulada anual. Dicha hipótesis asumía un aumento de la PPNA en CN-LP asociado a una mayor disponibilidad de nutrientes; sin embargo, este mecanismo no pudo ser evaluado directamente debido a la ausencia de mediciones de fertilidad del suelo, por lo que solo puede inferirse de manera indirecta a partir de la literatura previa. No obstante, se

observaron diferencias en la estacionalidad de la PPNA, con valores significativamente mayores en CN-LP durante la primavera, junto con respuestas consistentes en la composición de los grupos funcionales, particularmente en la proporción de *Lotus*, dicotiledóneas y gramíneas anuales.

2.6.1. Diferencias en PPNA acumulada entre tratamientos

A pesar de que la PPNA acumulada de CN-LP fue un 30 % mayor que la de CN (8529 vs. 6556 kg MS/ha), las diferencias no fueron estadísticamente significativas a lo largo del período experimental, lo cual puede ser explicado por una diversidad de factores. En primer lugar, cabe resaltar que la variabilidad del efecto de la interseembra fue muy marcada entre pares tanto en magnitud como en sentido (figura 6), lo cual es posible que haya diluido cualquier diferencia estadísticamente significativa entre los tipos de pastizal. Se puede inferir que dicha variabilidad no esté asociada a una heterogeneidad del manejo del pastoreo dado que la altura del tapiz medida al momento t0 (figura 8) fue similar entre tratamientos. Este resultado sugiere que los recursos fueron manejados homogéneamente en términos de remanente de forraje, lo que puede favorecer la equidad en la PPNA observada (Altesor et al., 2005; Pañella et al., 2020).

La explicación de esta variabilidad en las respuestas no parece estar asociada tampoco a diferencias en los cambios de composición funcional entre los pares (figura 3), ya que los efectos sobre el porcentaje de LR, gramíneas anuales y dicotiledóneas fueron generalizados. Es importante considerar que la incidencia del LR en un mismo sitio tiene una alta variabilidad interanual influenciada por factores climáticos que no dependen estrictamente del manejo (Bondaruk et al., 2020; Carámbula et al., 1994; Jaurena et al., 2016).

La hipótesis de un aumento generalizado en la PPNA de CN-LP se sustentaba en el incremento de la disponibilidad de nutrientes, particularmente nitrógeno y fósforo (Del Pino et al., 2016, 2021; Lezama et al., 2024; Rodríguez Palma et al., 2024). Estudios previos desarrollados en una red de predios que comprende a los analizados en el presente trabajo (Lezama et al., 2024) respaldan esta hipótesis al evidenciar

efectos significativos de la interseembra en la disponibilidad de fósforo. Sin embargo, los resultados de Bondaruk et al. (2020), que no encontraron diferencias en los reservorios de carbono y nitrógeno orgánico del suelo, sugieren que la dinámica de los nutrientes en el suelo es compleja y puede variar según el nutriente y el tiempo. La alta capacidad de retención de fósforo en los suelos de la región centro-sur (Hernández et al., 1995) podría haber limitado su disponibilidad para las plantas, lo que reduce los efectos esperados de la fertilización. Esta hipótesis es respaldada por los resultados de Del Pino et al. (2021) en suelos de la región basáltica del Uruguay, donde tampoco se encontraron diferencias significativas en la PPNA entre CN y CN-LP en interseembras de larga implantación y también bajo pastoreo.

Los resultados de estudios previos que compararon la PPNA de CN y CN-LP de largo plazo en Uruguay tienen conclusiones disímiles. Mientras Jaurena et al. (2016) encontraron un aumento significativo de la PPNA en sistemas bajo pastoreo con interseembra y fertilización, Del Pino et al. (2021), en concordancia con el presente estudio, no observaron diferencias significativas. Esta discrepancia sugiere que la respuesta de los pastizales a la interseembra y la fertilización es compleja y depende de múltiples factores, como el tipo de suelo, el clima y el manejo a largo plazo.

Estos resultados contrastan con estudios previos que han reportado una mayor productividad en CN-LP de corto plazo (sin pastoreo - Baeza et al., 2011; bajo pastoreo - Formoso y Colucci, 2008). No obstante, la inconsistencia observada en estudios sobre interseembras de largo plazo —aunque corresponden a especies leguminosas perennes diferentes a LR— sugiere que las ventajas productivas de las interseembras podrían disminuir con el tiempo.

2.6.2. Modificaciones estacionales en la PPNA y en la composición de tipos funcionales de plantas

Los recursos forrajeros mostraron diferentes niveles de PPNA durante la primavera. El CN mostró una producción similar en primavera y verano y mínima en otoño e invierno. El CN-LP evidenció un pico productivo en primavera, un segundo nivel en verano y un tercero en otoño e invierno. Esta diferencia estacional entre

tratamientos puede atribuirse al ciclo productivo de *Lotus suaveolens*, especie anual que concentra su crecimiento entre agosto y diciembre (Ayala y Bermúdez, 2001; Carámbula y Ayala, 2009; Risso y Carámbula, 1998), y a la mayor incidencia de gramíneas anuales como *Lolium multiflorum* y *Vulpia spp.* (Jaurena et al., 2016; Risso y Carámbula, 1998, figura 3). La elevada productividad observada en CN-LP durante la primavera de 2018 podría explicarse por una resiembra natural favorecida por el verano previo que fue relativamente seco y registró una precipitación acumulada de 408 mm entre octubre y marzo, frente a un promedio de 642 mm para la región (Instituto Nacional de Meteorología, 2023). Esta condición ha sido asociada en la bibliografía con una mayor resiembra natural de *Lotus suaveolens* (Risso y Carámbula, 1998). En contraste, las altas precipitaciones del verano 2018-2019 pudieron haber limitado la resiembra, lo que redujo su productividad en los últimos períodos del experimento (Bondaruk et al., 2020; Carámbula et al., 1994; Jaurena et al., 2016). Esta limitación se podría reflejar por la escasa cobertura promedio de LR observada hacia fines del período experimental (figura 3) en comparación con otros antecedentes (Cáceres, 2019).

Los resultados de este estudio son, por tanto, coherentes con la dinámica funcional reportada para el campo natural de la región de los campos Río de la Plata (Soriano, 1991), donde la producción es del tipo unimodal, con un pico primavera-estival temprano, acompañados de valores intermedios en verano y otoño y mínimos invernales (Altesor et al., 2005; Baeza et al., 2011; Formoso y Colucci, 2008; Gallego et al., 2017; Pezzani et al., 2017). En este sentido, la baja productividad observada en los dos últimos períodos experimentales sigue la línea de lo reportado por otros estudios (Baeza et al., 2011; Formoso, 1997, 2005; Jaurena et al., 2016; Rama et al., 2022), en los cuales se atribuye esta dinámica a la predominancia de gramíneas C₄, menos productivas en condiciones de bajas temperaturas (Altesor et al., 2005; Formoso, 2005), y a la baja cobertura de especies invernales (Lezama y Paruelo, 2022).

2.6.3. Comparación de PPNA acumulada de CN y CN-LP con antecedentes

La PPNA anual acumulada para CN en este estudio fue de 6556 kg MS/ha, un valor superior al reportado en estudios previos en la región centro-sur de Uruguay. Formoso (1997) y Soca et al. (2011) informaron productividades de 3402 kg MS/ha y 3700 kg MS/ha, respectivamente, en pastizales naturales utilizando una metodología de corte a 1-2 cm de altura. En cambio, Altesor et al. (2005), empleando una metodología de corte al ras en potreros bajo pastoreo (como el presente trabajo), reportó una PPNA anual de 6020 kg MS/ha, más cercana a los valores observados en este estudio. Estas diferencias con los antecedentes pueden atribuirse al efecto de la altura de corte en la estimación de la PPNA, ya que esta tiene un efecto significativo en la estimación de la PPNA. Otros trabajos han demostrado que los cortes al ras del suelo tienden a arrojar valores de PPNA significativamente más altos en comparación con aquellos realizados dejando un remanente (Pezzani et al., 2017; Scurlock et al., 2002).

Por otro lado, la PPNA acumulada de CN-LP fue de 8529 kg MS/ha, superior a los 7179 kg MS/ha anuales en intersembras de corto plazo bajo pastoreo (promedio de cuatro años desde intensificación) de la región centro-sur también con LR y utilizando una metodología de corte similar (Risso et al., 2002). El dato es comparable a los resultados de Formoso y Colucci (2008), quienes, para intersembras con LR en la misma región geomorfológica, reportaron una productividad de 8860 kg MS/ha en promedio entre los primeros doce años de antigüedad. El método de corte implicó dejar un remanente de 1 cm. Además de lo expuesto en cuanto a la metodología de corte para comparar la PPNA acumulada de CN, es importante mencionar que la PPNA medida durante determinado período de tiempo es el resultado de un proceso influenciado por una serie de factores ambientales (clima, suelo, composición de la comunidad vegetal) que suelen variar de un año a otro (Oesterheld et al., 2001; Sala y Austin, 2000; Scurlock et al., 2002). Por tanto, la PPNA acumulada obtenida durante un año en particular puede no ser representativa de la PPNA de CN-LP de largo plazo, lo que complejiza la comparación formal de los resultados con antecedentes locales y regionales.

2.6.4. Alcances y limitaciones

Muchos de los estudios que reportan una mayor PPNA de CN-LP en comparación con la de pastizales naturales no son solo realizados sobre intersembras de corto plazo, sino que además se realizaron en condiciones experimentales controladas, donde las prácticas de manejo y la ausencia de animales permiten un mayor control sobre las variables involucradas (Formoso, 1997; Risso y Carámbula, 1998; Barrios et al., 2010; Baeza et al., 2011; Pañella et al., 2020). En contraste, este estudio se llevó a cabo en predios comerciales bajo pastoreo, lo que introduce múltiples covariables difíciles de controlar, como la carga animal y las prácticas de manejo específicas de cada productor. Además, no se tienen registros pormenorizados de la carga animal y de la fertilización fosfatada que viabilicen la inclusión de dichos efectos dentro del análisis.

Por otra parte, los predios comerciales responden a objetivos de manejo distintos a los de un experimento, en algunos casos priorizando la persistencia de las intersembras o la estabilidad del sistema productivo por encima de la estandarización operativa. Estas decisiones pueden generar variabilidad adicional entre predios y tratamientos, afectando la magnitud observable de las diferencias. Según Hansson (2019), esta heterogeneidad es inherente a los estudios en sistemas reales, pero también constituye una ventaja, ya que permite evaluar tecnologías bajo condiciones representativas para los productores, incorporando restricciones ambientales, económicas y de manejo que rara vez están presentes en los ensayos institucionales.

A estas fuentes de variación se suma la heterogeneidad espacial del pastizal y la fuerte influencia interanual de temperatura y precipitaciones sobre la productividad primaria (Knapp y Smith, 2001; Oesterheld et al., 2001). La duración del estudio (un año) no necesariamente refleja condiciones promedio en estudios de mayor duración, lo que limita la extrapolación de los resultados. Finalmente, la variabilidad observada en la PPNA dentro de cada bloque (figura 6) sugiere que un mayor número de réplicas por tratamiento habría reducido el error experimental y aumentado la potencia estadística del análisis.

2.7. Referencias

- Altesor, A., Oesterheld, M., Leoni, E., Lezama, F., y Rodríguez, C. (2005). Effect of grazing on community structure and productivity of a Uruguayan grassland. *Plant Ecology*, 179, 83-91. <https://doi.org/10.1007/s11258-004-5800-5>
- Ayala, W., y Bermudez, R. (2001). *Caracterización productiva de mejoramientos de campo en base a Lotus El Rincón y Lotus Maku*. Jornada de Utilización de mejoramientos de Campo en la zona este del país, Rocha.
- Baeza, S., Paruelo, J. M., y Ayala, W. (2011). Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria en recursos forrajeros del este de Uruguay. *Agrociencia*, 55(2), 48-59.
- Barrios, E., Bermúdez, R., Serrón, N., y Ayala, W. (2010). Producción de mejoramientos de campo con *Lotus subbiflorus* El Rincón y *Ornithopus pinnatus* INIA Molles. En *Reunión técnica fertilización de pasturas* (pp. 31-33). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Berretta, E. J. (ed.) (1998). Contenido de minerales en pasturas naturales de basalto - especies nativas. En *Seminario de Actualización en Tecnologías para Basalto* (pp. 63-73). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria .
- Bondaruk, V., Lezama, F., y Piñeiro, G. (2020). Overseeding legumes in natural grasslands: Impacts on root biomass and soil organic matter of commercial farms. *Science of the Total Environment*, 743, 140771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140771>
- Cáceres, D. (2019). *Cambios en largo plazo de la salud de campo natural asociados a la tecnología de mejoramientos extensivos* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibrí. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/22380>
- Carámbula, M., y Ayala, W. (2009). *El valor agronómico del género Lotus*. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.

- Carámbula, M., Carriquiry, E., y Ayala, W. (1994). *Mejoramientos de campo con Lotus subbiflorus cv.* El Rincón. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Del Pino, A., Lezama, F., Pezzani, F., y Parodi, G. (2021). Persistence of long-term effects of phosphate fertilization and legume introduction in grasslands of Uruguay. *AgriScientia*, 38(1-2), 99-109. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v38.n1.26856>
- Del Pino, A., Rodríguez, T., y Andión, J. (2016). Production improvement through phosphorus fertilization and legume introduction in grazed native pastures of Uruguay. *Journal of Agricultural Science*, 154(2), 347-358. <https://doi.org/10.1017/S002185961500101X>
- Formoso, D. (1997). Productividad y manejo de pasturas en Cristalino. En D. Vaz Martins, M. Carámbula y E. Indarte (eds.), *Pasturas y Producción Animal en áreas de ganadería extensiva* (pp. 51-58). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Formoso, D. (2005). La investigación en utilización de pasturas naturales sobre Cristalino desarrollada por el Secretariado Uruguayo de la Lana. En R. Gómez Miller y M. M. Albicette (eds.), *Seminario de Actualización Técnica en Manejo de Campo Natural* (pp. 51-60). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Formoso, D., y Colucci, P. E. (2008). *Productividad de mejoramientos de campo natural en cristalino central*. XXII Reunión del Grupo Técnico en Forrajeras del Cono Sur, Minas. <http://www.pasturasdeamerica.com/articulos-interes/notas-tecnicas/productividad-mejoramientos-campo-natural-uruguay/>
- Frame, J. (1993). Herbage mass. En A. Davies, R. D. Baker, S. A. Grant, y S. Laidlaw (eds.), *Sward Measurement Handbook* (pp. 39-69). British Grassland Society.
- Gallego, F., Lezama, F., Pezzani, F., López-Mársico, L., Leoni, E., Mello, A. L., y Costa, B. (2017). Estimación de la productividad primaria neta aérea y capacidad de carga ganadera : un estudio de caso en Sierras del Este. *Agrociencia*, 21(1), 120-130.

- Hansson, S. O. (2019). Farmers' experiments and scientific methodology. *European Journal for Philosophy of Science*, 9(3), 32. <https://doi.org/10.1007/s13194-019-0255-7>
- Hernández, J., Otegui, O., y Zamalvide, J. P. (1995). *Formas y contenidos de fosforo en algunos suelos de Uruguay*. Facultad de Agronomía.
- Instituto Nacional de Meteorología. (2020, 23 de marzo). *Tablas estadísticas climatológicas 1961-1990*. <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/tablas-estadisticas>
- Instituto Nacional de Meteorología. (2023, 4 de agosto). *Gráficas estadísticas pluviométricas 1991-2020*. <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/graficas-estadisticas-pluviometricas>
- Jaurena, M., Lezama, F., Salvo, L., Cardozo, G., y Ayala, W. (2016). The Dilemma of Improving Native Grasslands by Overseeding Legumes: Production Intensification or Diversity Conservation. *Rangeland Ecology & Management* 69, 35-42.
- Knapp, A. K., y Smith, M. D. (2001). Variation Among Biomes in Temporal Dynamics of Aboveground Primary Production. *Science*, 291(5503), 481-484. <https://doi.org/10.1126/science.291.5503.481>
- Lezama, F., Cáceres, D., Pañella, P., y Del Pino, A. (2024). Land-Use Intensification by Overseeding Legumes on Natural Grasslands: Impacts on Plant Diversity. *Rangeland Ecology & Management*, 93, 95-103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rama.2023.12.003>
- Lezama, F., y Paruelo, J. M. (2022). Regional Assessment of Stocking Rate Effects on Uruguayan Rangelands: A Ranch-Level Study. *Rangeland Ecology & Management*, 82, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2022.02.005>
- McNaughton, S. J., Oesterheld, M., y Williams, K. J. (1989). Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature*, 341(6238), 142-144.
- Millot, J. C., Risso, D., y Methol, R. (1987). *Relevamiento de pasturas naturales y mejoramientos extensivos en áreas ganaderas del Uruguay*. Federación Uruguaya de Grupos CREA.

- Oesterheld, M., Di Bella, C., Kerdiles, H. (1998). Relation between NOAA-AVHRR satellite data and stocking rate of Rangelands. *Ecological Applications*, 8(1), 207-212. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0207:RBNASD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0207:RBNASD]2.0.CO;2)
- Oesterheld, M., Loreti, J., Semmartin, M., y Paruelo, J. M. (1999). Grazing, fire and climate effects on primary productivity of grasslands and savannas. *Ecosystems of the World*, 16, 287-306.
- Oesterheld, M., Loreti, J., Semmartin, M., y 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, 137-142.
- Oliveira, L. B., Soares, E. M., Jochims, F., Tiecher, T., Marques, A. R., Kuinchtner, B. C., Rheinheimer, D. S., y De Quadros, F. L. F. (2015). Long-Term Effects of Phosphorus on Dynamics of an Overseeded Natural Grassland in Brazil. *Rangeland Ecology & Management*, 68(6), 445-452. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rama.2015.07.012>
- Pañella, P., Cardozo, G., Cuadro, R., Reyno, R., y Lezama, F. (2020). Phosphorus fertilization lowers richness and increases the number of exotic plant species in grasslands overseeded with legumes. *Ecologia Austral*, 30(3), 354-365. <https://doi.org/10.25260/ea.20.30.3.0.1063>
- Paruelo, J. M., Piñeiro, G., Baldi, G., Baeza, S., Lezama, F., Oesterheld, M., y Altesor, A. (2010). Carbon Stocks and Fluxes in Rangelands of the Río de la Plata Basin. *Rangeland Ecology & Management* 63(1), 94-108. <https://doi.org/10.2111/08-055.1>
- Paruelo, J. M., Lauenroth, W. K., Burke, I. C., y Sala, O. E. (1999). Grassland Precipitation-Use Efficiency Varies Across a Resource Gradient. *Ecosystems* 2(1), 64-68.
- Pezzani, F., Gallego, F., Lezama, F., y López-Mársico, L. (2017). El método de corte de biomasa genera mayores diferencias en la estimación de la productividad de pastizales que el tipo de pastizal. *Revista Argentina de Producción Animal* 37(1), 21-32.

- Piñeiro, G., Oesterheld, M., y Paruelo, J. M. (2006). Seasonal Variation in Aboveground Production and Radiation-use Efficiency of Temperate rangelands Estimated through Remote Sensing. *Ecosystems*, 9, 357-373. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0013-x>
- Rama, G., Oyarzabal, M., Cardozo, G., Lezama, F., y Baeza, S. (2022). Legume Overseeding along with P Fertilization Increase Forage Production of Temperate Natural Grasslands. *Agronomy* 12(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy12102507>
- Risso, D. (1991). Siembras en el tapiz: consideraciones generales y estado actual de la información en la zona de suelos sobre Cristalino. En M. Carámbula, D. Vaz Martins y E. Indarte (eds.), *Serie técnica Pasturas y Producción Animal en áreas de ganadería extensiva 13* (pp. 71-78) Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Risso, D., y Carámbula, M. (1998). *Lotus El Rincón: Producción y utilización de los mejoramientos*. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Risso, D. F., Berretta, E. J., Zarza, A., y Cuadro, R. (2002). Productividad, composición y persistencia de dos mejoramientos de campo para engorde de novillos en la región de Cristalino. En D. Risso y F. Montossi (eds.), *Mejoramientos de campo en la Región de Cristalino* (pp. 3-31). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Rodríguez, C., Leoni, E., Lezama, F., y Altesor, A. (2003). Temporal trends in species composition and plant traits in natural grasslands of Uruguay. *Journal of Vegetation Science*, 14(3), 433-440.
- Rodríguez Palma, R. M., Michelini Garicoïts, D. F., Rodríguez Olivera, T. D., Saravia Tomasina, C. G., y Lattanzi, F. A. (2024). Nutrient Addition to a Subtropical Rangeland: Effects on Animal Productivity, Trophic Efficiency, and Temporal Stability. *Rangeland Ecology and Management*, 96, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2024.05.007>
- Sala, O., Deregibus, V. A., Schlichter, T., y Alippe, H. (1981). Productivity Dynamics of a Native Temperate Grassland in Argentina. *Journal of Range Management*, 34(1), 48-51. <https://doi.org/10.2307/3898453>

- Sala, O. E., y Austin, A. T. (2000). Methods of Estimating Aboveground Net Primary Productivity. En O. E. Sala, R. B. Jackson, H. A. Mooney, R. W. Howarth (eds.), *Methods in Ecosystem Science* (pp. 31-43). Springer New York.
- Scurlock, J. M. O., Johnson, K., y Olson, R. J. (2002). Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, 8(8), 736-753. [https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00512.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00512.x)
- Silveira, D., García Favre, J., Cadenazzi, M., Nabinger, C., y Boggiano, P. (2022). El ambiente lumínico y su influencia sobre tipos funcionales de plantas y producción en pastizales naturales. *Agro Sur*, 50(3), 27-44.
- Singh, J. S., Lauenroth, W. K., y Steinhorst, R. K. (1975). Review and assessment of various techniques for estimating net aerial primary production in grasslands from harvest data. *The Botanical Review*, 41(2), 181-232. <https://doi.org/10.1007/BF02860829>
- Soriano, A. (1991). Rio de la Plata Grasslands. En Van Auken y Bush (eds.), *Ecosystems of the World: Natural Grasslands* (pp. 367-408). Elsevier.

3. Estimación de la eficiencia de uso de la radiación y calibración de modelos de estimación remota de la PPNA a partir de índices espectrales

3.1. Introducción

3.1.1. Relevancia de la estimación de la PPNA de pastizales mediante sensores remotos

La productividad primaria neta aérea (PPNA) es un indicador clave del potencial productivo de los ecosistemas, especialmente en pastizales, ya que influye de forma directa en la capacidad de carga ganadera (McNaughton et al., 1989). Su estimación precisa es esencial para la gestión sostenible de estos sistemas y la evaluación de servicios ecosistémicos, como la producción de biomasa, el secuestro de carbono y su valor cultural (Guido et al., 2014, 2025; Paruelo et al., 2010).

La medición tradicional de PPNA mediante cortes de biomasa es laboriosa y presenta dificultades debido a la variabilidad espacial y la complejidad de la compartimentación de la biomasa en distintos flujos (Oesterheld et al., 2001, 2011; Sala et al., 1981; Sala y Austin, 2000). En este contexto, los sensores remotos han emergido como una alternativa eficiente para estimar la PPNA en tiempo real y a diferentes escalas espaciales y temporales (Lobell et al., 2002; Piñeiro et al., 2006; Potter et al., 1993). El fundamento de esta metodología radica en la relación entre índices espectrales –de ahora en más IVN– como el NDVI (del inglés *Normalized Difference Vegetation Index*) y la actividad fotosintética de la vegetación (Goward y Huemmrich, 1992; Paruelo et al., 2000; Tucker, 1979). Este índice, calculado a partir de la reflectancia en las bandas espectrales del rojo e infrarrojo cercano, se correlaciona con el índice de área foliar y la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación verde, de ahora en más fRFAA (Baret y Guyot, 1991; Piñeiro et al., 2006). A partir de la fRFAA y la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFAi), se puede estimar la radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA), lo que permite modelar la PPNA mediante la ecuación ecofisiológica propuesta por Monteith (1972):

$$PPNA = RFAA \times EUR \text{ (ecuación n}^\circ 1),$$

donde EUR representa la eficiencia de uso de la radiación, expresada en gramos de materia seca por megajoule de energía radiante absorbida (g MS/MJ). La RFAi se expresa en megajoules por unidad de área y puede estimarse de forma sencilla a través de información provista por estaciones meteorológicas.

La relación entre NDVI y fRFAA varía según ecosistemas y depende de factores estructurales del canopy, entre otros aspectos (Gitelson et al., 2014; Goward y Huemmrich, 1992; Piñeiro et al., 2006; Ruimy et al., 1994). Sin embargo, uno de los principales desafíos en la estimación de PPNA es la determinación de EUR, ya que esta variable refleja la capacidad de la vegetación para convertir la energía absorbida en biomasa. EUR no es constante y varía en función de múltiples factores como la temperatura, el régimen hídrico, el estado nutricional del suelo y la fase fenológica de las plantas (Nouvellon et al., 2000; Paruelo et al., 2010, 2019; Piñeiro et al., 2006).

Existen diferentes metodologías para estimar EUR. Una de las más utilizadas es el cálculo directo a partir de mediciones independientes de PPNA y RFAA, despejando EUR del modelo de Monteith (ecuación n^o1). Otra aproximación es la derivación de EUR mediante modelos lineales, donde la pendiente entre PPNA y RFAA representa su valor medio, siempre y cuando la ordenada al origen no sea diferente de cero (Verón et al., 2005; Oyarzabal et al., 2011). La correcta estimación de la EUR es crucial para mejorar la precisión de los modelos de estimación de la PPNA, ya que pequeñas variaciones en este coeficiente pueden generar errores significativos en su predicción (Oesterheld et al., 2011; Piñeiro et al., 2006). En este sentido, es importante contar con calibraciones específicas para distintos tipos de vegetación y condiciones ambientales.

Desde la década de 1980, los sensores a bordo de satélites como NOAA/AVHRR y MODIS han sido empleados en estudios del ciclo de carbono y para la estimación de la PPNA a escala global. Sin embargo, la resolución espacial de estos sensores, cuyo píxel oscila entre 250 m y 1 km de lado, limita su aplicabilidad a escalas espaciales menores (Ali et al., 2016; Ryu et al., 2019). Los avances de la teledetección con el procesamiento en la nube (Gorelick et al., 2017) y la posibilidad de realizar análisis píxel a píxel han permitido el uso de sensores con períodos de revisita más largos y

mayor resolución espacial como Landsat y Sentinel-2 (Putzenlechner et al., 2019; Turner et al., 2006; Wang et al., 2019).

El programa Copernicus, lanzado en 2015 por la Agencia Espacial Europea, introdujo mejoras significativas con los satélites Sentinel-2A y 2B, los cuales ofrecen imágenes con resolución espacial de 10 a 60 m dependiendo de la banda espectral utilizada (European Space Agency, 2024). En particular, las bandas asociadas a la estimación del NDVI tienen una resolución de 10 m, lo que permite detectar variaciones en la actividad fotosintética de la vegetación con un alto grado de detalle. Además, Sentinel-2 cuenta con un tiempo de revisita de cinco días en latitudes como las de Uruguay, lo que mejora la resolución temporal respecto a sensores anteriores (C. Li et al., 2021).

3.1.2. Antecedentes regionales y locales

En la bibliografía regional existen algunos antecedentes de estimación de la EUR mediante diferentes aproximaciones. Usando modelaciones a partir de variables climáticas, Piñeiro et al. (2006) reportaron un rango de EUR de entre 0,2 a 1,2 g MS/MJ para pasturas de la región de Pampeana (Argentina). Grigera et al. (2007), utilizando calibraciones con información espectral y estimaciones independientes de PPNA a partir de cortes, determinaron una EUR de 0,6 g MS/Mj para pasturas y 0,27 g MS/MJ para pastizales. En el ámbito local, se destaca el trabajo de Baeza et al. (2011b), que estimó EUR de CN y CN-LP de corto plazo intersembrado con leguminosas perennes de la región geomorfológica Sierras y Lomadas del Este. La EUR reportada para CN fue de 0,24 g MS/MJ, mientras que para CN-LP fue de aproximadamente el doble, de 0,42 gMS/MJ. Por la metodología experimental y los recursos forrajeros analizados, es un antecedente directo del presente estudio; no obstante, cuenta con la limitante de que los datos de PPNA mediante cortes de biomasa y los datos espectrales desde los que se estimó la radiación absorbida corresponden a lugares geográficos distintos y bajo condiciones diferentes. Mientras que las mediciones de PPNA con cortes de biomasa fueron generadas en parcelas

experimentales en situaciones controladas –y sin pastoreo–, las estimaciones de RFAA derivaron de predios comerciales con un menor grado de control respecto del manejo.

3.1.3. Situación problema y objetivos

A pesar de los avances en la teledetección de la PPNA, persisten desafíos en la aplicación a escala de potrero, especialmente en sistemas ganaderos extensivos. La resolución espacial de sensores previos ha dificultado la vinculación entre datos satelitales y mediciones de biomasa (Baeza et al., 2011b). Además, existe una escasez de estudios que comparen la PPNA de pastizales naturales e intersiembras de largo plazo con leguminosas anuales como *Lotus suaveolens* Rincón en predios comerciales.

Este estudio busca superar estas limitaciones mediante el uso de imágenes de alta resolución del satélite Sentinel-2, lo que permite calibraciones más precisas de modelos de estimación de PPNA a escala de parcela. Al analizar sistemas comerciales conteniendo intersiembras de largo plazo, se espera contribuir al desarrollo de metodologías aplicables en la gestión de estos recursos forrajeros.

Los objetivos específicos de este capítulo son:

- Calcular la RFAA en campos naturales y en intersiembras con leguminosas de largo plazo.
- Estimar la EUR en ambos sistemas.
- Generar y validar modelos de estimación remota de PPNA a partir de información espectral en ambos sistemas.

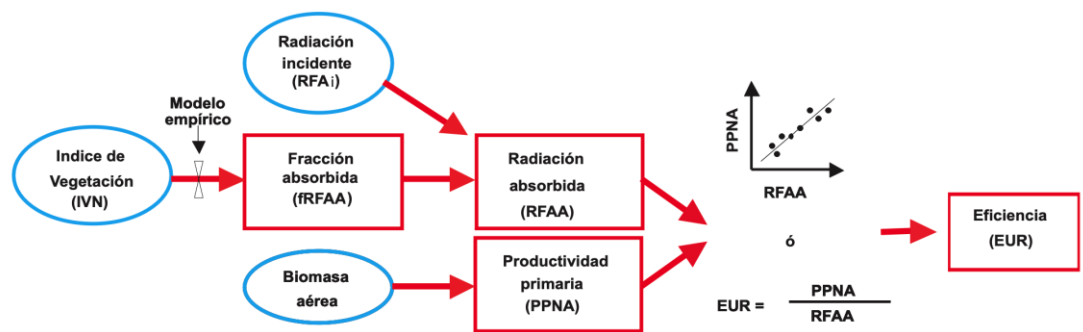
3.2. Materiales y métodos

Se abordó la generación de modelos para la estimación de la PPNA en tiempo real, basados en la estimación de la EUR para diferentes recursos forrajeros. El flujo de trabajo resumido puede verse en la figura 1. En primer lugar, se estimó RFAA combinando $fRFAA$ –obtenida a partir de imágenes satelitales– y $RFAi$, estimada a partir de datos de heliofanía. En paralelo, la PPNA se estimó a partir de cortes sucesivos de biomasa, tal como se detalló en el capítulo anterior. A partir de los valores de RFAA y PPNA se estimó EUR mediante la inversión del modelo de Monteith y

como la pendiente del modelo de correlación lineal entre RFAA y PPNA. Finalmente, los datos de EUR obtenidos fueron utilizados para generar modelos de estimación de PPNA a partir de imágenes satelitales, los cuales se validaron utilizando los datos de campo mediante técnicas de remuestreo.

Figura 1

Flujo de trabajo para la determinación de EUR a partir de sensores remotos y estimaciones independientes de la PPNA



Nota. Fuente: Oyarzabal et al. (2011).

3.2.1. Estimación de RFAA

La RFAA se estimó como el producto entre la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFAi) y la fracción de esta radiación interceptada por la vegetación verde (fRFAA), para cada intervalo entre fechas sucesivas de corte de biomasa reportadas en el capítulo anterior. La RFAi se derivó a partir de los datos diarios de heliofanía proporcionados por la estación meteorológica de INIA Las Brujas, utilizando la ecuación de Angström–Prescott–Page para estimar la radiación global incidente (Banihashemi Dehkordi et al., 2022) y asumiendo que el 48 % corresponde a radiación fotosintéticamente activa (McCree, 1972). En regiones de relieve llano como el área de estudio, la radiación acumulada depende principalmente de la latitud y la época del año, por lo que se admiten estimaciones provenientes de estaciones distantes hasta 300–400 km (Oyarzabal et al., 2011). Finalmente, los valores diarios de RFAi se promediaron para cada intervalo entre cortes.

La fRFAA fue estimada a partir de imágenes satelitales Sentinel-2. A partir de la serie de imágenes comprendidas entre el inicio y el fin de los experimentos de corte,

se elaboró una serie temporal del índice espectral NDVI calculado a partir de las bandas 4 (Red-665 nm) y 8 (NIR-835 nm), cuya resolución espacial es de 10 m. Se filtraron las imágenes mediante la banda de calidad QA60 (Li et al., 2021) considerando exclusivamente aquellos píxeles no afectados por nubosidad y aerosoles. Todos los valores de NDVI válidos de cada píxel fueron promediados por período experimental. El procesamiento de imágenes y cálculo de NDVI se realizó en la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017).

La relación entre NDVI y fRFAA se estimó aplicando la calibración propuesta por Pellegrini et al. (2020), ajustada regionalmente para NDVI derivado de imágenes Sentinel-2 a partir de áreas sin vegetación (fRFA = 0) y cultivos de trigo en anthesis asumiendo un estado de máxima intercepción (fRFA \approx 0,95), con la siguiente ecuación exponencial ($R^2 = 0,89$):

$$\text{fRFA} = 0,013e(4,48 \times \text{NDVI})$$

A partir de estos valores se generaron series temporales de RFAA para cada recurso forrajero y período entre cortes y se promediaron los valores obtenidos en un área búfer de 20 m centrado en cada jaula de corte de biomasa. En total, se obtuvieron entre cuatro y siete imágenes por período, lo que permitió una caracterización detallada y confiable de la RFAA. Los valores de RFAA acumulados durante la totalidad del período experimental, para cada tratamiento, fueron comparados mediante test de Student en Microsoft Excel, en tanto el análisis período a período fue realizado mediante un ANOVA de medidas repetidas, utilizando el tipo de recurso forrajero como factor entre sujeto mediante el software Graphpad Prism 8.0.2.

3.2.2. Estimación de PPNA

Los datos de biomasa aérea obtenidos mediante cortes provienen del experimento descrito en el capítulo anterior, y constituyen la base para la estimación de la PPNA observada en los pastizales.

3.2.3. Estimación de EUR

La EUR se estimó mediante dos aproximaciones. La primera consiste en despejarla directamente de la ecuación n°1 y calcularla como el cociente entre la PPNA y la RFAA para cada período ('EUR instantánea'). De tal forma, se puede conocer su variación entre meses, estaciones y años (Oyarzabal et al., 2011). Se generaron series de tiempo de EUR instantánea para cada recurso forrajero donde el valor de cada período de tiempo representa el valor promedio de las cinco repeticiones.

La segunda aproximación se basó en ajustar, para cada tratamiento, un modelo de regresión lineal entre la productividad y la radiación absorbida. Cuando la ordenada al origen del modelo lineal resulta igual o no significativamente distinta de 0, la pendiente del modelo estima la EUR (Verón et al., 2005).

Las pendientes de ambos modelos (*i. e.*, las EUR de ambos tratamientos) fueron comparadas entre sí utilizando el paquete estadístico RStudio versión 2021.09.1, realizando un análisis de varianza del modelo de regresión lineal entre PPNA y RFAA utilizando los datos de CN y CN-LP conjuntamente y observando la significancia de la interacción entre la variable predictora RFAA y el tratamiento (Andrade y Estévez-Pérez, 2014).

3.2.4. Generación y validación de modelos de estimación remota de productividad

Una vez obtenidas las estimaciones de RFAA y EUR, se aplicó nuevamente el modelo de Monteith para predecir la PPNA en cada intervalo:

$$\text{PPNA satélites} = \text{EUR} \times \text{RFAA}$$

Debido a que el número de pares de datos PPNA-RFAA para todo el período es relativamente bajo se utilizó la técnica de remuestreo *bootstrap* ($n = 9999$) sobre los pares de datos RFAA-PPNA disponibles ($n = 50$) para validar los modelos. En cada iteración, se generó un modelo de regresión con una muestra aleatoria con reemplazo y se evaluó su capacidad predictiva sobre los datos no incluidos. Finalmente, el modelo validado corresponde al promedio de los coeficientes estimados en las 9999

repeticiones. Esta validación se implementó mediante la función *boot* del paquete estadístico R.

3.3. Resultados

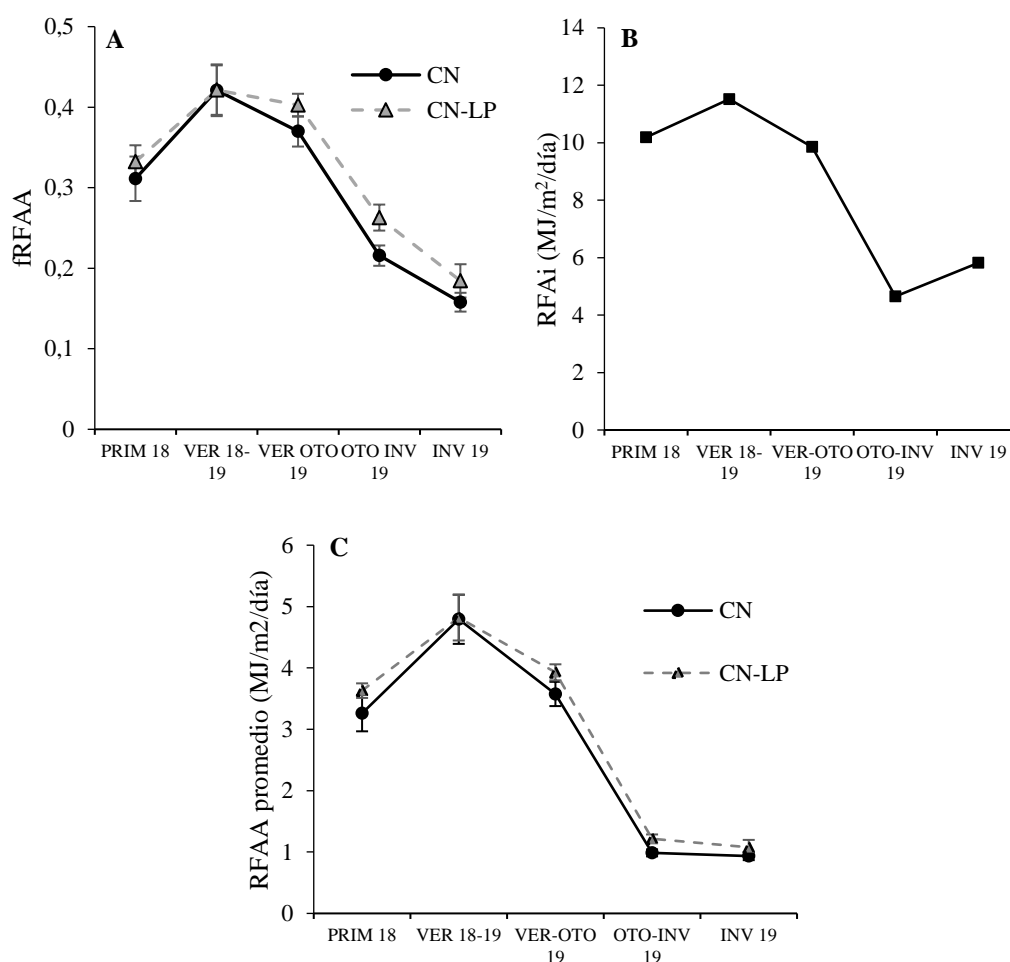
3.3.1. Radiación fotosintéticamente activa absorbida

No se hallaron diferencias significativas en la fRFAA estimada mediante información espectral para cada pastizal analizado durante todo el período experimental ($F = 2,33$, $GL = 1$, $p = 0,21$; figura 2A). La fRFAA promedio entre ambos tratamientos alcanzó valores máximos (0,42) en VER 2018-2019 y un mínimo de 0,16 en INV 2019. La RFAi promedio durante el período experimental tuvo una tendencia idéntica que fue máxima durante VER 2018-2019 (11,5 MJ/m²/día) y mínima durante OTO-INV 2019 (4,6 MJ/m²/día; figura 2B).

De forma correlativa a lo acontecido para fRFAA, tampoco se observaron diferencias significativas respecto a la RFAA estacional promedio entre ambos tratamientos incorporando la variable del tiempo dentro del análisis ($F = 1,82$, $g^{\circ}L = 1$, $p = 0,21$; figura 2C). El valor de RFAA promedio entre ambos tratamientos durante el período experimental fue de 2,82 MJ/m²/día, con un máximo de 4,79 MJ/m²/día durante el período VER 2018-2019, mientras que el mínimo fue de 1,08 MJ/m²/día durante el período INV 2019.

Figura 2

Fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (fRFAA) promedio por tratamiento (A); radiación fotosintéticamente activa incidente (RFAi) promedio medida en INIA Las Brujas (B) y Radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) diaria promedio durante el período experimental (C).

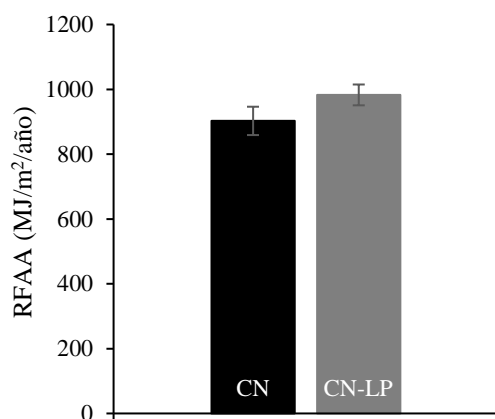


Nota. Las barras de error representan el error estándar de la media (σ/\sqrt{n}).

La RFAA acumulada anual fue 902,6 MJ/m² para CN y 982,8 MJ/m² para CN-LP. Al igual que para fRFAA, tampoco se observaron diferencias entre tratamientos para dicha variable ($t = -1,33$, $df = 4$, p -valor = 0,25; figura 3).

Figura 3

Radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) acumulada anual durante el período experimental



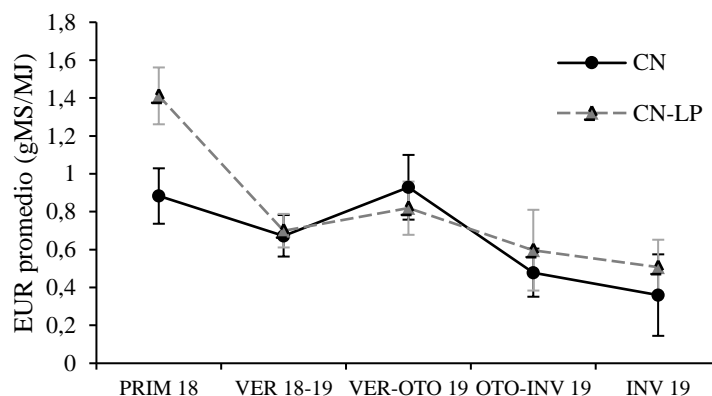
Nota. Las barras de error representan el error estándar de la media ($\sigma/\sqrt{(n)}$).

3.3.2. Eficiencia de uso de la radiación

La EUR instantánea promedio durante la totalidad del período experimental, calculada como el cociente PPNA/RFAA para cada fecha de corte, resultó igual a 0,74 g MS/MJ. Los valores mínimos y máximos fueron de 0,43 g MS/MJ (INV 2019) y de 1,15 g MS/MJ (PRIM 2018), respectivamente. En el caso de CN, el promedio resultó igual a 0,66 g MS/MJ (mínimo de 0,36 en INV 2019 y máximo de 0,93 g MS/MJ en OTO-INV 2019). Para CN-LP, el valor promedio general fue de 0,81 g MS/MJ (mínimo de 0,51 en INV 2019 y máximo de 1,41 g MS/MJ en PRIM 2018; figura 4).

Figura 4

Dinámica estacional de la eficiencia de uso de la radiación (EUR) por tratamiento



Nota. Las barras de error corresponden al error estándar de la media (σ/\sqrt{n}).

La EUR calculada mediante un ajuste de modelo lineal RFAA:PPNA para CN fue de 0,84 g MS/MJ ($R^2 = 0,7$, $n = 25$, $p < 0,001$) y para CN-LP fue de 0,95 g MS/MJ ($R^2 = 0,55$, $n = 25$, $p < 0,001$). En ambos casos, la pendiente del modelo fue significativamente distinta de cero ($p < 0,0001$; figura 5). Las pendientes de ambos modelos resultaron no ser estadísticamente diferentes ($F = 0,264$, $p = 0,61$). Debido a esto, se ajustó un único modelo lineal con la totalidad de los datos y se obtuvo una EUR de 0,90 g MS/MJ válida para ambos recursos forrajeros ($R^2 = 0,6$, $n = 48$, $p < 0,001$, $ECM = 1,325$).

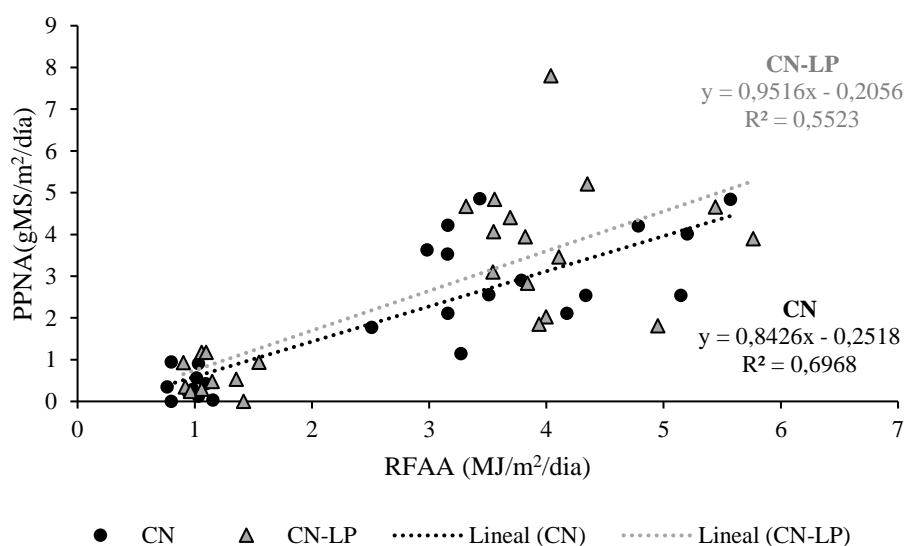
3.3.3. Estimación de la PPNA a partir de datos derivados de sensores remotos

Debido a que la ordenada al origen (intercepto del modelo) no fue significativamente distinta de cero ($F = 0,51$, $p = 0,48$), el modelo para estimar PPNA a partir de IVN, en ambos recursos forrajeros, viene dado por la siguiente ecuación:

$$PPNA = RFAA \times 0,90$$

Figura 5

Modelos lineales entre productividad primaria neta aérea (PPNA, en gMS/m²/día) y la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFAA, en MJ/m²/día)

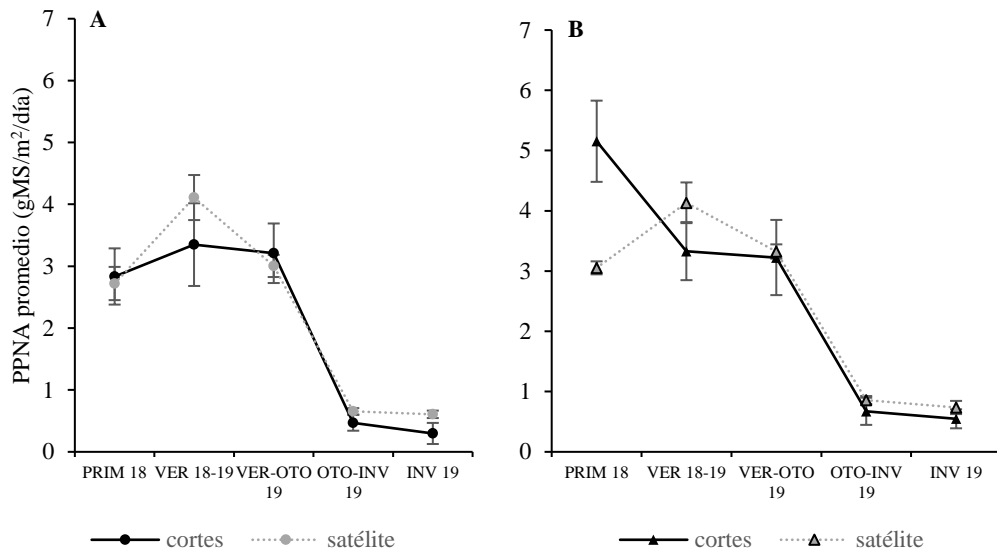


Nota: campo natural (CN: círculos, línea punteada) y campo natural intersembrado (CN-LP: triángulos, línea punteada).

EL modelo explicó el 61 % de la variabilidad de la PPNA, con un R^2 de predicción de 0,59 ($N = 50$; $F = 74$, $p = < 0,001$). La figura 6 muestra la dinámica temporal de los valores de PPNA medidos a campo y los estimados a partir del modelo en la simulación *bootstrap* para cada tratamiento y período. Asimismo, se muestra la validación del modelo general comparado con la línea 1:1 (figura 7).

Figura 6

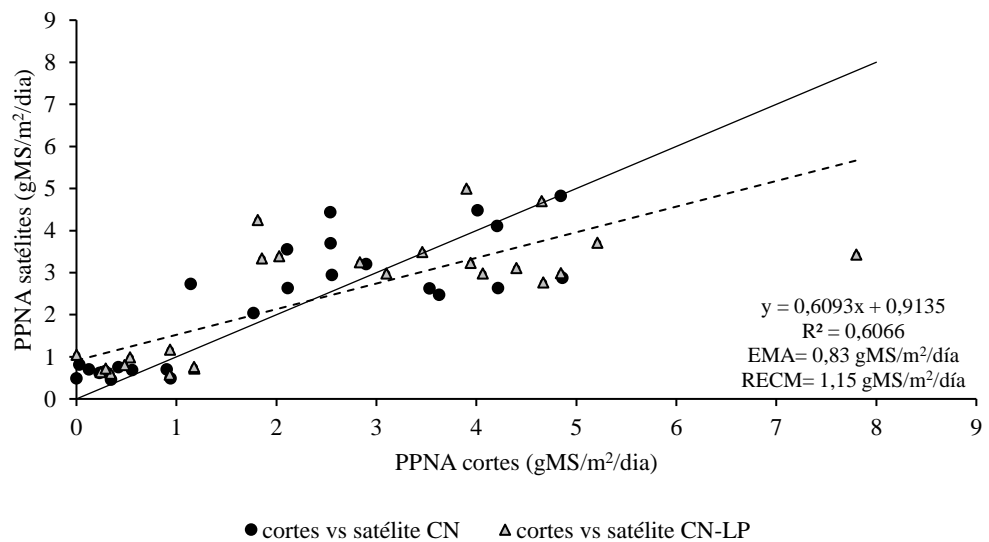
Productividad primaria neta aérea estimada por cortes y a través del modelo generado por imágenes satelitales. Campo natural CN (A) y Campo natural intersebrado CN-LP (B).



Nota. Las barras de error representan el error estándar de la media ($\sigma/\sqrt{(n)}$).

Figura 7

Validación del modelo de Monteith (1972)



Nota. Productividad primaria neta aérea estimada por el modelo vs. observada a campo. EMA: error medio absoluto; RECM: raíz del error cuadrático medio; línea punteada: modelo lineal; entera: relación 1:1.

3.4. Discusión

Este trabajo reporta por primera vez estimaciones de EUR para pastizales naturales (CN) y pastizales intersembrados con leguminosas perennes (CN-LP) en potreros de establecimientos comerciales del Uruguay, combinando datos de PPNA obtenidos por cortes sucesivos de biomasa y estimaciones de RFAA derivadas de imágenes satelitales de los mismos sitios y períodos. Si bien CN-LP mostró mayor PPNA que CN durante la primavera, estas diferencias no se registraron en términos de RFAA, lo que sugiere que las diferencias productivas se explican por variaciones en EUR y no en la cantidad de radiación interceptada. Dado que las diferencias en EUR tampoco resultaron estadísticamente significativas, se construyó un modelo único para estimar PPNA en ambos sistemas que permite mejorar la precisión de las predicciones en el monitoreo forrajero de dichos recursos, con lo que aporta una base objetiva para la gestión de la capacidad de carga animal.

3.4.1. Análisis de fRFAA y RFAA

No se observó diferencia significativa entre tratamientos respecto de los valores de fRFAA, los cuales durante el período experimental oscilaron entre el 16 % y el 42 % de la RFAi, con máximos en verano y mínimos en invierno. Estos valores son inferiores a los reportados por Baeza et al. (2010) y Guido et al. (2014) para CN. Además, en dichos estudios, la fRFAA fue sustancialmente mayor en primavera que en verano, lo que contrasta con la dinámica observada en este trabajo, en donde fRFAA fue máxima durante el período estival.

Estas discrepancias pueden atribuirse a múltiples factores. En primer lugar, los estudios de Baeza et al. (2010) y Guido et al. (2014) utilizaron series temporales de imágenes MODIS de baja resolución espacial (250-500 m por píxel), abarcando períodos prolongados (cuatro a diez años) y regiones más amplias o distintas del

Uruguay. En contraste, el presente estudio se basa en imágenes Sentinel-2 de alta resolución (10 m por píxel), aplicadas a potreros específicos del centro-sur del país durante 2018 y 2019. Las diferencias en extensión temporal son relevantes, ya que las series largas tienden a suavizar eventos extremos y así reducir la variabilidad interanual, lo que dificulta la identificación de respuestas puntuales a condiciones climáticas específicas como eventos Niño-Niña (Fensholt et al., 2015; Pettorelli et al., 2005). A su vez, las diferencias en resolución espacial pueden afectar los valores espectrales: sensores como MODIS, al integrar coberturas mixtas dentro de píxeles grandes, tienden a sobreestimar el NDVI. Este efecto ha sido documentado por Son et al. (2021) y también se verificó en este estudio, donde los valores de NDVI derivados de MODIS resultaron sistemáticamente superiores a los de Sentinel-2 sobre los mismos potreros (información no presentada).

En segundo lugar, debe considerarse el modelo empleado para estimar fRFAA, propuesto por Pellegrini et al. (2020), desarrollado y calibrado a partir de mediciones de campo en trigo cultivado bajo condiciones controladas. Este modelo abarca un rango de IVN entre aproximadamente 0,2 y 0,9 y asigna valores de fRFAA cercanos a 0,9 cuando NDVI supera valores de 0,9. En contraste, los modelos usados por otros trabajos (Baeza et al., 2010; 2011b; Guido et al., 2014; Paruelo et al., 2010; Piñeiro et al., 2006) utilizan una lógica similar, pero están parametrizados con datos de índices de vegetación de las propias series temporales de los pastizales bajo estudio. En estos trabajos, se asume usualmente una fRFAA de 0,95 para los valores del percentil 95 o 98 de cada serie (correspondientes a NDVI entre 0,6 y 0,8). Estas diferencias en la relación IVN-fRFAA utilizada implican que, para un mismo valor de NDVI, otros modelos arrojen valores de fRFAA muy superiores a los obtenidos con el modelo de Pellegrini et al. (2020). Pruebas realizadas durante el desarrollo de la tesis mostraron que el modelo de Grigera et al. (2007) adaptado a la resolución espectral de Sentinel-2 dio como resultado valores de fRFAA en promedio 35 % superiores a los obtenidos mediante el modelo utilizado. Pruebas realizadas con el modelo utilizado por Baeza et al. (2011) dieron como resultado estimaciones 101 % mayores.

La RFAA resulta del producto entre la RFAi y la fRFAA, por lo que cualquier sesgo en esta última afecta directamente las estimaciones de radiación absorbida

durante el período experimental. La evaluación del modelo mas adecuado para estimarla a partir de IVN escapa al alcance del presente trabajo, pero las diferencias en las estimaciones del coeficiente especificadas anteriormente evidencian la sensibilidad de la RFAA al modelo empleado y la necesidad de calibraciones específicas para pastizales heterogéneos.

3.4.2. Evaluación de la EUR

La EUR promedio anual entre ambos tratamientos, estimada mediante el despeje del modelo de Monteith, fue de 0,74 g MS/MJ. Este valor es superior a los reportados para pastizales naturales en estudios regionales (Baeza et al., 2011b; Gallego et al., 2017; Paruelo et al., 2011) y se aproxima a los valores informados para pastizales xerófitos (Li et al., 2012) y templados (Ruimy et al., 1994; Running et al., 2000) a escala global. La EUR mostró una tendencia decreciente durante el período experimental, incluso bajo condiciones de alta disponibilidad hídrica registrada entre finales de primavera 2018 y verano 2018-2019. Este patrón es coherente con lo reportado por Grigera y Oesterheld (2020), quienes documentaron que la variación de la EUR de pasturas sembradas puede no responder linealmente a la disponibilidad instantánea de agua o nitrógeno, sino que se relaciona más estrechamente con la estructura del dosel y la intensidad reciente de defoliación. La EUR, al integrar procesos como absorción de radiación, fotosíntesis y respiración, exhibe respuestas amortiguadas frente a fluctuaciones ambientales de corto plazo, manifestándose más claramente en escalas estacionales o interanuales.

En línea con lo esperado, los valores de EUR tendieron a ser mayores en CN-LP respecto a CN, lo que concuerda con la literatura que reporta mayor eficiencia fotosintética en leguminosas debido a su alto contenido de nitrógeno foliar y su capacidad de fijación biológica (Fletcher et al., 2013; Gastal et al., 2015). No obstante, las diferencias entre tratamientos no fueron estadísticamente significativas. Al ser la RFAA prácticamente igual entre CN y CN-LP, se desprende que la mayor productividad observada en las intersembras durante PRIM 2018 se explicaría por una mayor EUR de CN-LP en ese período.

Por otro lado, la EUR estimada mediante el modelo lineal ajustado entre PPNA y RFAA fue de 0,90 g MS/MJ, valor que también supera referencias regionales e internacionales para pastizales naturales (Gómez-Giráldez et al., 2019; S. Li et al., 2012; Nouvellon et al., 2000). Sin embargo, es menor que el promedio global reportado por Druille et al. (2019) para pasturas cultivadas. Estas diferencias podrían explicarse por la sensibilidad de EUR a la elección del modelo fRFAA-NDVI utilizado (Pellegrini et al., 2020), ya que distintos enfoques de estimación pueden arrojar valores contrastantes de RFAA y, por ende, de EUR, conforme lo discutido anteriormente. En contraste, si se aplicase un modelo alternativo propuesto por Gitelson (2019) basado en el índice *red-edge* NDVI, originalmente desarrollado para cultivos de maíz y soja, se obtiene una EUR global (estimada como la pendiente del ajuste lineal entre PPNA-RFAA) de 0,55 g MS/MJ y un coeficiente de determinación R^2 de 0,63, más acorde con la bibliografía regional. La elección del modelo de Pellegrini se justificó por su compatibilidad espectral con Sentinel-2 y por su validación mediante estimaciones independientes de fRFAA a campo, lo que le confiere una base empírica directa para vincular índices de vegetación con la fracción de radiación efectivamente interceptada.

Finalmente, las diferencias con los valores reportados por Baeza et al. (2011b), quienes estimaron una EUR de 0,24 y 0,46 g MS/MJ para CN y CN-LP respectivamente (con diferencias significativas entre tratamientos), podrían atribuirse a varios factores metodológicos y ecológicos. En primer lugar, las diferencias en la resolución espectral y espacial de los sensores utilizados (MODIS vs. Sentinel-2), así como en los índices de vegetación empleados (EVI en Baeza vs. NDVI en este estudio), pueden influir en la estimación de la RFAA y, por lo tanto, en la EUR, dado que el EVI presenta menor saturación en coberturas densas y mayor sensibilidad a variaciones estructurales del dosel (Huete et al., 2002). En segundo lugar, la metodología de interpolación de fRFAA puede alterar sustancialmente el cálculo de RFAA: la función exponencial utilizada en este estudio (Pellegrini et al., 2020) tiende a generar valores más bajos de fRFAA en comparación con la función lineal empleada por Baeza, lo que puede resultar en una mayor EUR estimada según ese tipo de modelos (Ruimy et al., 1994). Tercero, las diferencias en composición florística y PPNA de las comunidades de pastizal analizadas (Sierras y Lomadas del Este vs.

Centro-Sur; Altesor et al., 2005; Lezama et al., 2011). Por último, en el estudio de Baeza y colaboradores los datos de biomasa y RFAA provinieron de predios diferentes, lo que limita la posibilidad de establecer una relación funcional directa entre ambas variables, y pudo haber introducido variaciones interprediales asociadas al régimen de precipitaciones, la estructura del dosel, composición de especies o del manejo del pastoreo.

3.4.3. Validación y limitaciones del modelo

El modelo generado permite estimar la PPNA en tiempo casi real bajo condiciones similares a las de su desarrollo (*i. e.*, región centro-sur de Uruguay, pastizales naturales y mejoramientos con leguminosas y fósforo). Su precisión es comparable a la obtenida en estudios previos con metodologías similares (Baeza et al., 2011b; Gallego et al., 2017; Gómez-Giráldez et al., 2019). No obstante, se identificaron algunas limitaciones. En ambos tratamientos se observó una sobrestimación de la PPNA durante el verano, mientras que en primavera el modelo subestimó la productividad del tratamiento CN-LP. Además, la PPNA fue sobrestimada en los rangos bajos y medios de los valores observados, y subestimada en los rangos altos (figura 7).

Este patrón es consistente con la aplicación de modelos lineales en sistemas heterogéneos, donde la variabilidad estructural del dosel, la defoliación y factores ambientales no capturados por la RFAA introducen dispersión adicional (Ali et al., 2016; Grigera y Oesterheld, 2020). La similitud en el patrón de dispersión para CN y CN-LP refuerza la ausencia detectada de diferencias significativas en la EUR y respalda la validez del modelo único. Adicionalmente, la heterogeneidad del canopy en pastizales naturales —caracterizados por una mezcla dinámica de especies con distintos metabolismos fotosintéticos, fenología y respuesta a factores ambientales (Altesor et al., 2005; Lezama et al., 2011, 2019; Rodríguez et al., 2003)— introduce un grado de complejidad que dificulta alcanzar ajustes comparables a los obtenidos en cultivos anuales, donde la estructura y el comportamiento del dosel son más uniformes (Ali et al., 2016; Druille et al., 2019; Li et al., 2012). Cabe señalar que las estimaciones

aquí presentadas se basan en un único ciclo anual, que podría no representar plenamente la variabilidad climática y productiva típica de los pastizales del Uruguay. En particular, la ocurrencia de condiciones ambientales atípicas o desviadas de los promedios históricos podría haber influido en la relación observada entre PPNA y RFAA, así como en la magnitud de la EUR estimada (Fensholt et al., 2015; Pettoirelli et al., 2005). Estudios de mayor extensión temporal permitirían evaluar la estabilidad del modelo bajo diferentes escenarios interanuales.

Una posible vía para mejorar la precisión del modelo sería incorporar variables ambientales complementarias que expliquen parte de la variabilidad no capturada por la radiación absorbida. Entre ellas destacan la humedad del suelo y la ocurrencia de eventos extremos (heladas, olas de calor, déficits hídricos), factores que han mostrado efectos marcados sobre la productividad primaria en pastizales (Craine et al., 2012; Wilcox et al., 2017). Adicionalmente, el uso de índices espectrales sensibles a características funcionales del tapiz vegetal (*e. g.*, clorofila, estructura del dosel) podría mejorar la estimación de fRFAA y, por ende, de la PPNA (Delegido et al., 2013).

3.4.4. Implicancias de los resultados y proyecciones futuras

Los resultados obtenidos en este estudio tienen implicancias prácticas para la gestión de los pastizales. Por un lado, la utilización de nuevas estimaciones de EUR, calibradas para cada recurso y ambiente, puede mejorar significativamente las estimaciones remotas de la PPNA (Baeza et al., 2011b; Grigera y Oesterheld, 2020; Paruelo et al., 2011; Piñeiro et al., 2006) y constituyen un insumo clave para mejorar la resiliencia, productividad y sostenibilidad de sistemas agrícola-pastoriles en un contexto de cambio climático (Sahoo et al., 2025).

Esta información resulta importante para la planificación ganadera, ya que permite tomar decisiones más precisas sobre prácticas de manejo como el ajuste estacional de la carga animal a escala de potrero (Oesterheld et al., 2011; Paruelo et al., 2010). Los resultados presentados podrían contribuir a mejorar la precisión de los sistemas de monitoreo forrajero utilizados actualmente en la región (*e. g.*, LART-IFEVA, Instituto Plan Agropecuario), dado que algunos productores han señalado que

las estimaciones PPNA generadas por estos tienden a subestimar la oferta real de forraje de sus predios.

En cuanto a futuras líneas de trabajo, sería altamente valioso desarrollar modelos específicos para pastizales que permitan estimar la fRFAA a partir de información espectral de satélites modernos como Sentinel-2, validando estos modelos con mediciones a campo mediante ceptómetros o sensores hiperespectrales. También se recomienda replicar estos estudios en diferentes regiones y bajo condiciones climáticas contrastantes, con el fin de evaluar la estabilidad de los parámetros estimados (Grigera et al., 2007).

4. Síntesis y discusión general

El objetivo central de este trabajo fue evaluar los efectos a largo plazo de la intersembra de *Lotus suaveolens* y fertilización fosfatada (CN-LP) en pastizales naturales (CN) de la región centro-sur de Uruguay, en términos de productividad primaria neta aérea (PPNA), y generar modelos para su estimación remota. La investigación combinó experimentos de campo ubicados en predios comerciales, que permitieron estimar la PPNA a través de cortes de biomasa, con modelos basados en índices espectrales para obtener estimaciones remotas de alta resolución espacial de la productividad de pastizales bajo pastoreo y en condiciones reales de producción. A diferencia del antecedente directo (Baeza et al., 2011b), los datos de PPNA obtenidos a campo y las estimaciones de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) son tomados en el mismo potrero y para el mismo período de tiempo, lo que confiere mayor exactitud en las estimaciones de la Eficiencia de Uso de la Radiación (EUR) de ambos recursos forrajeros.

Si bien no se encontraron diferencias significativas en la PPNA acumulada anual entre ambos tratamientos, probablemente como consecuencia de la alta variabilidad observada entre los cinco pares de potreros analizados, sí se detectaron diferencias significativas en la estación primaveral. Este efecto puede atribuirse al ciclo productivo de *Lotus suaveolens* y la incidencia de gramíneas anuales, que incrementa la oferta forrajera en esa época del año. Estos resultados sugieren que, aun cuando la intersembra de largo plazo no necesariamente implique un aumento de la producción total anual, sí genera un aporte relevante aumentando la disponibilidad de forraje en primavera.

Por otro lado, es probable que la calidad nutricional del forraje generado por CN-LP sea superior debido a la presencia de leguminosas. Diversos estudios han indicado que las leguminosas mejoran la calidad del forraje al incrementar el contenido de proteína cruda y otros nutrientes, lo cual podría traducirse en un mejor desempeño animal en sistemas de producción ganadera (Beretta, 1998; Del Pino et al., 2021, 2016; Risso, 1991; Rodríguez Palma et al., 2024). Aunque en este trabajo no se realizaron análisis específicos de calidad nutricional, sería recomendable incluirlos en futuros

estudios para evaluar de forma más completa los beneficios de la intersembra, específicamente luego de muchos años de realizada.

Mediante técnicas de teledetección se estimó la RFAA de ambos recursos forrajeros, no detectándose diferencias significativas entre CN y CN-LP al igual que para PPNA anual. Dado que no hubo diferencias en la RFAA, la mayor productividad primaveral de CN-LP estaría explicada por una mayor EUR en dicho período. Esto concuerda con la bibliografía que señala una mayor eficiencia para las especies implantadas por la capacidad de fijación biológica de nitrógeno de las leguminosas (Druille et al., 2029; Fletcher et al., 2013; Gastal et al., 2015).

Los resultados permitieron la generación de un único modelo validado para la totalidad de los datos, lo que permitió calcular una EUR única para ambos tipos de pastizal, superior a la reportada en los antecedentes directos. A pesar de que el modelo logró predecir la PPNA razonablemente bien, se observó una tendencia a sobrestimarla durante el verano y subestimarla durante la primavera. Esto sugiere que existen otros factores no capturados por los índices espectrales –como la variabilidad climática, la heterogeneidad de las comunidades de pastizal y el manejo del pastoreo– que pueden estar influyendo en las estimaciones remotas de la PPNA de estos recursos forrajeros.

En resumen, este estudio sugiere que las intersembrias con *Lotus suaveolens*, aunque no incrementan significativamente la PPNA en el largo plazo, pueden mejorar la disponibilidad de forraje en primavera. La combinación de experimentos de campo con datos satelitales se revela como una herramienta poderosa para monitorear y gestionar la producción forrajera de manera más precisa y eficiente en sistemas ganaderos.

A futuro, resulta relevante profundizar en la calibración de modelos que vinculen la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación (fRFAA) con índices espectrales, desarrollados y validados específicamente para pastizales de la región. Este proceso debería basarse en mediciones a campo de la fRFAA, integrando información provista por sensores remotos de satélites modernos como Sentinel 2. Estos avances constituyen una oportunidad clave para mejorar la precisión de las estimaciones de productividad forrajera y fortalecer su aplicabilidad en el manejo sostenible de los sistemas ganaderos

5. Bibliografía general

- Ali, I., Cawkwell, F., Dwyer, E., Barrett, B. y Green, S. (2016). Satellite remote sensing of grasslands: from observation to management. *Journal of Plant Ecology*, 9(6), 649-671.
- Altamirano, A., Da Silva, H., Duran, A., Echeverría, A., Panario, D. y Puentes, R. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: tomo I: clasificación de suelos*. Dirección de Suelos y Fertilizantes (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca).
- Altesor, A., Oesterheld, M., Leoni, E., Lezama, F. y Rodríguez, C. (2005). Effect of grazing on community structure and productivity of a Uruguayan grassland. *Plant Ecology*, 179, 83-91. <https://doi.org/10.1007/s11258-004-5800-5>
- Altesor, A., Piñeiro, G., Lezama, F., Jackson, R. B., Sarasola, M. y Paruelo, J. M. (2006). Ecosystem changes associated with grazing in subhumid South American grasslands. *Journal of Vegetation Science*, 17, 323-332.
- Andrade, J. M. y Estévez-Pérez, M. G. (2014). Statistical comparison of the slopes of two regression lines: A tutorial. *Analytica Chimica Acta*, 838, 1-12.
- Ayala, W. y Bermudez, R. (2001). Caracterización productiva de mejoramientos de campo en base a Lotus El Rincón y Lotus Maku. En *Jornada de Utilización de Mejoramientos de Campo en la Zona Este del País* (pp- 3-5). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Baeza, S., Lezama, F., Pineiro, G., Altesor, A. y Paruelo, J. M. (2010). Spatial variability of above-ground net primary production in Uruguayan grasslands: a remote sensing approach. *Applied Vegetation Science*, 13(1), 72-85. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2009.01051.x>
- Baeza, S., Gallego, F., Lezama, F. y Altesor, A. (2011a). Cartografía de los pastizales naturales en las regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas. En A. Altesor, A., W. Ayala y J. M. Paruelo (eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales I*. (pp. 33-54). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.

- Baeza, S., Paruelo, J. M. y Ayala, W. (2011b). Eficiencia en el uso de la radiación y productividad primaria en recursos forrajeros del este de Uruguay. *Agrociencia*, 55(2), 48-59.
- Baeza, S., Rama, G., y Lezama, F. (2019). Cartografía de los pastizales naturales en las regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas. Ampliación y actualización. En A. Altesor, W. Ayala, y J. M. Paruelo (eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II* (pp. 27-47). INIA.
- Baeza, S., Vélez-Martin, E., De Abelleira, D., Banchemo, S., Gallego, F., Schirmbeck, J., Verón, S., Vallejos, M., Weber, E. y Oyarzabal, M. (2022). Two decades of land cover mapping in the Río de la Plata grassland region: The MapBiomass Pampa initiative. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28, 100834. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100834>
- Banihashemi Dehkordi, S. N., Bakhtiari, B., Qaderi, K., y Ahmadi, M. M. (2022). Calibration and validation of the Angstrom–Prescott model in solar radiation estimation using optimization algorithms. *Scientific reports*, 12(1), 4855p. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08744-6>
- Baret, F. y Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35(2-3), 161-173. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90009-U](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U)
- Beretta, E. J. (1998). Contenido de minerales en pasturas naturales de basalto - especies nativas. En E. J. Beretta (ed.), *Seminario de actualización en tecnologías para basalto* (pp. 63-73). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Tacuarembó.
- Beretta, E. J., Risso, D., Montossi, F. y Pigurina, G. (2000). Campos In Uruguay. En J. Hodgson y A. W. Illius (eds.), *Grassland ecophysiology and grazing ecology* (pp. 377-394). CABI Publishing.
- Blumetto, O., Castagna, A., Cardozo, G., García, F., Tiscornia, G., Ruggia, A., Scarlato, S., Albicette, M. M., Aguerre, V. y Albin, A. (2019). Ecosystem Integrity Index, an innovative environmental evaluation tool for agricultural

- production systems. *Ecological Indicators*, 101, 725-733.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.077>
- Briske, D. D. (ed.). (2017). *Rangeland systems: foundation for a conceptual framework*. Springer.
- Carámbula, M. y Ayala, W. (2009). *El valor agronómico del género Lotus*. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Carámbula, M., Carriquiry, E. y Ayala, W. (1994). *Mejoramientos de campo con Lotus subbiflorus cv. El Rincón*. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Castaño, J. P., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J. y Aunchayna, R. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009*. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Craine, J. M., Nippert, J. B., Elmore, A. J., Skibbe, A. M., Hutchinson, S. L. y Brunsell, N. A. (2012). Timing of climate variability and grassland productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3401-3405.
- Del Pino, A., Rodríguez, T. y Andión, J. (2016). Production improvement through phosphorus fertilization and legume introduction in grazed native pastures of Uruguay. *Journal of Agricultural Science*, 154(2), 347-358.
<https://doi.org/10.1017/S002185961500101X>
- Delegido, J., Verrelst, J., Meza, C. M., Rivera, J. P., Alonso, L. y Moreno, J. (2013). A red-edge spectral index for remote sensing estimation of green LAI over agroecosystems. *European Journal of Agronomy*, 46, 42-52.
- Dirección General de Recursos Naturales (DGNR). (2017). *Estudios básicos de suelos: San Gabriel-Guaycurú-La Carolina*. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
- Di Bella, C. M., Paruelo, J. M., Becerra, J. E., Bacour, C. y Baret, F. (2004). Effect of senescent leaves on NDVI-based estimates of fAPAR: Experimental and modelling evidences. *International Journal of Remote Sensing*, 25(23), 5415-5427. <https://doi.org/10.1080/01431160412331269724>
- Dirección de Estadísticas Agropecuarias. (2023). *Anuario Estadístico Agropecuario 2022*. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.

- Druille, M., Oyarzabal, M., Oesterheld, M. (2019). Radiation Use Efficiency of Forage Resources: A Meta-Analysis. *Agronomy Journal* 111(4), 1770-1778. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0645>
- European Space Agency. (2024, 15 de agosto). *Sentinel 2*. https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2.
- Fensholt, R., Horion, S., Tagesson, T., Ehammer, A., Grogan, K., Tian, F., Huber, S., Verbesselt, J., Prince, S. D. y Tucker, C. J. (2015). Assessment of vegetation trends in drylands from time series of earth observation data. En C. Kuenzer, S. Dech y W. Wagner (eds.), *Remote sensing time series: Revealing land surface dynamics* (pp. 159-182). Springer.
- Fletcher, A. L., Johnstone, P. R., Chakwizira, E. y Brown, H. E. (2013). Radiation capture and radiation use efficiency in response to N supply for crop species with contrasting canopies. *Field Crops Research*, 150, 126-134. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.06.014>
- Formoso, D. (1997). Productividad y manejo de pasturas en Cristalino. En D. Vaz Martins, M. Carámbula y E. Indarte (eds.), *Pasturas y Producción Animal en áreas de ganadería extensiva* (pp. 51-58). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Formoso, D. (2005). La investigación en utilización de pasturas naturales sobre Cristalino desarrollada por el Secretariado Uruguayo de la Lana. En: *Seminario de actualización técnica en manejo de campo natural* (pp. 51-60). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Formoso, D. y Colucci, P. E. (2008). *Productividad de mejoramientos de campo natural en cristalino central*. XXII Reunión del Grupo Técnico en Forrajeras del Cono Sur, Minas. <http://www.pasturasdeamerica.com/articulos-interes/notas-tecnicas/productividad-mejoramientos-campo-natural-uruguay/>
- Gallego, F., Lezama, F., Pezzani, F., López-Mársico, L., Leoni, E., Mello, A. L. y Costa, B. (2017). Estimación de la productividad primaria neta aérea y capacidad de carga ganadera: un estudio de caso en Sierras del Este. *Agrociencia*, 21(1), 120-130.

- Gastal, F., Lemaire, G., Durand, J. -L. y Louarn, G. (2015). Quantifying crop responses to nitrogen and avenues to improve nitrogen-use efficiency. En V. O. Sadras y D. Calderini (eds.), *Crop Physiology 2* (pp. 161-206). Academic Press.
- Gibson, D. J. (2009). *Grasses and Grassland Ecology*. Oxford University Press.
- Gitelson, A. A. (2019). Remote estimation of fraction of radiation absorbed by photosynthetically active vegetation: generic algorithm for maize and soybean. *Remote Sensing Letters* 10(3), 283-291. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1547445>
- Gitelson, A. A., Peng, Y. y Huemmrich, K. F. (2014). Relationship between fraction of radiation absorbed by photosynthesizing maize and soybean canopies and NDVI from remotely sensed data taken at close range and from MODIS 250 m resolution data. *Remote Sensing of Environment*, 147, 108-120. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.014>
- Gómez-Giráldez, P. J., Aguilar, C., Caño, A. B., García-Moreno, A. y González-Dugo, M. P. (2019). Remote sensing estimation of net primary production as monitoring indicator of holm oak savanna management. *Ecological Indicators*, 106, 105526. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105526>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. y Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Goward, S. N. y Huemmrich, K. E. (1992). Vegetation Canopy PAR Absorptance and the Normalized Difference Vegetation Index: An Assessment Using the SAIL Model. *Remote Sensing of Environment*, 39(2), 119-140. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90131-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90131-3)
- Grigera, G. y Oesterheld, M. (2020). Variability of radiation use efficiency in mixed pastures under varying resource availability, defoliation and time scale. *Grassland Science*, 67(2), 156-166. <https://doi.org/10.1111/grs.12302>
- Grigera, G., Oesterheld, M. y Pacín, F. (2007). Monitoring forage production for farmers decision making. *Agricultural Systems*, 94(3), 637-648. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.01.001>

- Guido, A., López-Mársico, L., Rodríguez, C., Gallego, F., Lezama, F., Baeza, S., Pañella, P., Ríos, C., Costa, B. y Pezzani, F. (2025). Uruguayan Grasslands: A Threatened Natural Asset. *Austral Ecology*, 50(2), e70031.
- Guido, A., Varela, R., Baldassini, P. y Paruelo, J. M. (2014). Spatial and Temporal Variability in Aboveground Net Primary Production of Uruguayan Grasslands. *Rangeland Ecology Management*, 67(1), 30-38. <https://doi.org/10.2111/REM-D-12-00125.1>
- Hernández, J., Otegui, O. y Zamalvide, J. P. (1995). *Formas y contenidos de fósforo en algunos suelos de Uruguay*. Facultad de Agronomía (Universidad de la República).
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X. y Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195-213.
- Instituto Nacional de Carnes. (2023, 13 de marzo 2024). *Nueva identidad para nuestra marca sectorial de carnes: Uruguay Meats*. <https://www.inac.uy/innovaportal/v/24475/17/innova.front/nueva-identidad-para-nuestra-marca-sectorial-de-carnes:-uruguay-meats#:~:text=La%20carne%20forma%20parte%20de,la%20Marca%20País%20del%20Uruguay>.
- Jaurena, M., Lezama, F., Salvo, L., Cardozo, G. y Ayala, W. (2016). The Dilemma of Improving Native Grasslands by Overseeding Legumes: Production Intensification or Diversity Conservation. *Rangeland Ecology & Management*, 69, 35-42.
- Lemaire, G., Hodgson, J. y Chabbi, A. (2011). Introduction: food security and environmental impacts - challenge for grassland sciences. En G. Lemaire, J. Hodgson y A. Chabbi (eds.), *Grassland productivity and ecosystem services* (pp. 1-5). CABI.
- Lezama, F., Altesor, A., Pereira, M. y Pauelo, J. M. (2011). Descripción de la heterogeneidad florística en los pastizales naturales de las principales regiones geomorfológicas de Uruguay. En A. Altesor, W. Ayala y J. M. Paruelo (eds.),

- Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales I* (pp. 15-32). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Lezama, F., Pereira, M., Altesor, A. y Paruelo, J. M. (2019). Grasslands of Uruguay: Classification based on vegetation plots. *Phytocoenologia*, 49(3), 211-229. <https://doi.org/10.1127/phyto/2019/0215>
- Li, C., Zhou, L. y Xu, W. (2021). Estimating Aboveground Biomass Using Sentinel-2 MSI Data and Ensemble Algorithms for Grassland in the Shengjin Lake. *Remote Sensing*, 13(8), 1595. <https://doi.org/10.3390/rs13081595>
- Li, S., Potter, C. y Hiatt, C. (2012). Monitoring of Net Primary Production in California Rangelands Using Landsat and MODIS Satellite Remote Sensing. *Natural Resources*, 3, 56-65.
- Lobell, D. B., Hicke, J. A., Asner, G. P., Field, C. B., Tucker, C. J. y Los, S. O. (2002). Satellite estimates of productivity and light use efficiency in United States agriculture, 1982-98. *Global Change Biology*, 8(8), 722-735.
- Mapbiomas Uruguay. (2024, 4 setiembre). *Mapbiomas Uruguay colección 4*. Colección 4 de los mapas anuales de cobertura y uso del suelo. <https://pampa.mapbiomas.org/>.
- McCree, K. J. (1972). Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agricultural Meteorology*, 10, 442-453.
- McNaughton, S. J., Oesterheld, M. y Williams, K. J. (1989). Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature*, 341(6238), 142-144.
- Medero, B., Fillat, A. y Navarro, G. (1958). Ensayos de competencia de leguminosas aparentes para mejoramiento de campo. *Revista Asociación de Ingenieros Agrónomos*, 103, 24-47.
- Mello, A. L., Lezama, F. y Baeza, S. (2023). Regional patterns and controls of natural grassland fragmentation in Uruguay. *Ecosistemas*, 32(2). 2534-2534. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2534>
- Millot, J. C., Risso, D. y Methol, R. (1987). *Relevamiento de pasturas naturales y mejoramientos extensivos en áreas ganaderas del Uruguay*. Federación Uruguaya de Grupos CREA.

- Monteith, J. L. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9(3), 747-766.
- Morón, A. 2002. Posibles usos de Fosforitas para mejoramiento de pasturas en zonas ganaderas tradicionales en Uruguay. En *Mejoramientos de campo en la Región de Cristalino* (pp. 97-113). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria
- Nouvellon, Y., Lo Seen, D., Rambal, S., Bégué, A., Susan Moran, M., Kerr, Y. y Qi, J. (2000). Time Course of Radiation Use Efficiency in a Shortgrass Ecosystem: Consequences for Remotely Sensed Estimation of Primary Production making use of large amounts of satellite information cur. *Remote Sensing of Environment*, (71), 43-55.
- Oesterheld, M. y Di Bella, C. (1998). Relation between NOAA-AVHRR satellite data and stocking rate of Rangelands. *Ecological Applications*, 8(1), 207-212.
- Oesterheld, M., Loreti, J., Semmartin, M. y 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, 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 A. Altesor, W. Ayala y J. M. Paruelo (eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales I* (pp. 113-119). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Oyarzabal, M., Oesterheld, M. y Grigera, G. (2011). ¿Cómo estimar la eficiencia en el uso de la radiación mediante sensores remotos y cosecha de biomasa? E A. Altesor, W. Ayala y J. M. Paruelo (eds.) *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales I* (pp. 121-133). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Oyarzabal, M. y Paruelo, J. M. (2019). Capítulo 7: dinámica de la productividad primaria de las comunidades de pastizal en Uruguay. En A. Altesor, L. López-Marsico y J. M. Paruelo (eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II* (pp. 112-122). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.

- Panario, D., Gutiérrez, O., Sanchez Betucci, L., Peel, E., Oyhantcabal, D. y Rabassa, J. (2015). Ancient landscapes of Uruguay. En J. Rabassa y C. Ollier (eds.), *Gondwana Landscapes in southern South America* (pp. 161-199). Springer.
- Paruelo, J. M., Epstein, H. E., Lauenroth, W. K. y Burke, I. C. (1997). ANPP Estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the United States. *Ecology*, 78(3), 953-958. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1997\)078\[0953:AEFNFT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(1997)078[0953:AEFNFT]2.0.CO;2)
- Paruelo, J. M., Oesterheld, M., Di Bella, C. M., Arzadum, M., Lafontaine, J., Cahuepé, M. y Rebella, C. M. (2000). Estimation of Primary Production of Subhumid Rangelands from Remote Sensing Data. *Applied Vegetation Science*, 3(2), 189-195. <https://doi.org/10.2307/1478997>
- Paruelo, J. M., Oyarzabal, M., Cordon, M., Lagorio, M. G. y Pereira, M. (2019). Estimación de la Eficiencia de Uso de la Radiación en recursos forrajeros perennes del Uruguay. En A. Altesor, L. López-Marsico y J. M. Paruelo (eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II* (pp. 123-138). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Paruelo, J. M., Oyarzabal, M. y Oesterheld, M. (2011). Capítulo IX. El seguimiento de los recursos forrajeros mediante sensores remotos: bases y aplicaciones. En A. Altesor, W. Ayala y J. M. Paruelo (eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales I* (pp. 125-145). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Paruelo, J. M., Piñeiro, G., Baldi, G., Baeza, S., Lezama, F., Oesterheld, M. y Altesor, A. (2010). Carbon Stocks and Fluxes in Rangelands of the Río de la Plata Basin. *Rangeland Ecology & Management*, 63(1), 94-108. <https://doi.org/10.2111/08-055.1>
- Pellegrini, P., Sadras, V. O., Oesterheld, M., Di Bella, C. M. y Piñeiro, G. (2020). Simple regression models to estimate light interception in wheat crops with Sentinel-2 and a handheld sensor. *Crop Science*, 60(3), 1607-1616. <https://doi.org/10.1002/csc2.20129>

- Pettorelli, N., Vik, J. O., Myrnerud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J. y Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology y Evolution*, 20(9), 503-510.
- Piñeiro, G., Oesterheld, M. y Paruelo, J. M. (2006). Seasonal Variation in Aboveground Production and Radiation-use Efficiency of Temperate rangelands Estimated through Remote Sensing. *Ecosystems*, 9, 357-373. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0013-x>
- Potter, S., Randerson, T., Field, B., Matson, A. y Mooney, H. A. (1993). Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(7), 811-842.
- Putzenlechner, B., Castro, S., Kiese, R., Ludwig, R., Marzahn, P., Sharp, I. y Sanchez-Azofeifa, A. (2019). Validation of Sentinel-2 fAPAR products using ground observations across three forest ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111310. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111310>
- Risso, D. y Carámbula, M. (1998). *Lotus El Rincón: Producción y utilización de los mejoramientos*. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Risso, D. F. (1991). Siembras en el tapiz: consideraciones generales y estado actual de la información en la zona de suelos sobre Cristalino. En M. Carámbula, D. Vaz Martins y E. Indarte (eds.), *Serie técnica Pasturas y Producción Animal en áreas de ganadería extensiva 13* (pp. 71-78) Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Risso, D. F., Beretta, E. J., Zarza, A. y Cuadro, R. (2002). Productividad, composición y persistencia de dos mejoramientos de campo para engorde de novillos en la región de Cristalino. En *Mejoramientos de campo en la Región de Cristalino* (pp. 3-31). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.
- Risso, D. F. y Scavino, J. (1978). Región Centro Sur. En M. Carámbula (ed.), *Pasturas IV* (pp. 33-48). Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger.
- Risso, D. F., Beretta, E. J., Zarza, A., y Cuadro, R. (2002). Productividad, composición y persistencia de dos mejoramientos de campo para engorde de novillos en la región de Cristalino. En D. Risso y F. Montossi (eds.), *Mejoramientos de campo*

en la Región de Cristalino (pp. 3-31). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria

- Rodríguez Palma, R. M., Michelini Garicoïts, D. F., Rodríguez Olivera, T. D., Saravia Tomasina, C. G. y Lattanzi, F. A. (2024). Nutrient Addition to a Subtropical Rangeland: Effects on Animal Productivity, Trophic Efficiency, and Temporal Stability. *Rangeland Ecology and Management*, 96, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2024.05.007>
- Ruimy, A., Saugier, B. y Dedieu, G. (1994). Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Atmospheres*, 99 (3), 5263-5283.
- Running, S. W., Thornton, P. E., Nemani, R. y Glassy, J. M. (2000). Global Terrestrial Gross and Net Primary Productivity from the Earth Observing System. En O. E. Sala, R. B. Jackson, H. A. Mooney y R. W. Howarth (eds.), *Methods in Ecosystem Science* (pp. 44-57). Springer.
- Ryu, Y., Berry, J. A. y Baldocchi, D. D. (2019). What is global photosynthesis? History, uncertainties and opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 223, 95-114. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.016>
- Sahoo, R., Samanta, D., Sow, S., Ranjan, S., Nath, D., Sadhu, S., Kumar, N., Rana, L., Kumar, A. y Roy, D. K. (2025). Nexus between photosynthesis and radiation use efficiency towards achieving sustainability in the era of climate change: an overview. *Discover Environment*, 3(1), 67.
- Sala, O., Deregibus, V. A., Schlichter, T. y Alippe, H. (1981). Productivity Dynamics of a Native Temperate Grassland in Argentina. *Journal of Range Management*, 34(1), 48-51. <https://doi.org/10.2307/3898453>
- Salvo, L., Terra, J., Ayala, W., Bermúdez, W., Correa, J., Avila, P. y Hernández, J. (2008). Long-term phosphorus fertilization and perennial legumes addition impacts on temperate natural grassland: II: Total and particulate soil organic carbon. En *International Grassland Congress and the International Rangeland Congress Proceedings* (p. 382). Guangdong People's Publishing House.

- Scaglia, G. (1995). Aspectos nutricionales en el uso de mejoramientos. En M. Carámbula, W. Ayala y G. Scaglia (eds.), *Mejoramientos extensivos: manejo y utilización* (pp. 19-25). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria
- Scurlock, J. M. O., Johnson, K. y Olson, R. J. (2002). Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, 8(8), 736-753. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00512.x>
- Son, M.-B., Chung, J. -H., Lee, Y. -G. y Kim, S. -J. (2021). A comparative analysis of vegetation and agricultural monitoring of Terra MODIS and Sentinel-2 NDVIs. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 63(6), 101-115.
- Soriano, A. (1991). Rio de la Plata Grasslands. En O. W. Van Auken y J. K. Bush (eds.), *Ecosystems of the World: Natural Grasslands* (pp. 367-408). Elsevier.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of the Environment*, 8(2), 127-150.
- Turner, D. P., Ritts, W. D., Cohen, W. B., Gower, S. T., Running, S. W., Zhao, M., Costa, M. H., Kirschbaum, A. A., Ham, J. M., Saleska, S. R. y Ahl, D. E. (2006). Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 102(3-4), 282-292.
- Uruguay XXI. (2024, 24 de setiembre). *Informe sector ganadero - 2024. Resumen Ejecutivo*. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/informe-sector-ganadero-2024/>.
- Verón, S., Oesterheld, M. y Paruelo, J. M. (2005). Production as a function of resource availability: Slopes and efficiencies are different. *Journal of Vegetation Science*, 16, 351-354.
- Wang, J., Xiao, X., Bajgain, R., Starks, P., Steiner, J. y Doughty, R. B. (2019). Estimating leaf area index and aboveground biomass of grazing pastures using Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 154, 189-201. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.06.007>
- Wilcox, K. R., Shi, Z., Gherardi, L. A., Lemoine, N. P., Koerner, S. E., Hoover, D. L., Bork, E., Byrne, K. M., Cahill Jr., J. y Collins, S. L. (2017). Asymmetric responses of primary productivity to precipitation extremes: a synthesis of

grassland precipitation manipulation experiments. *Global Change Biology*, 23(10), 4376-4385.

Zamalvide, 1992. Dinámica de fósforo en los suelos con especial referencia a la disponibilidad en rotaciones de cultivos y pasturas. *Revista INIA de Investigaciones Agronómicas* (85-93). Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria