

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

USO DE LA TELEDETECCIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PPNA Y EUR EN
CAMPOS NATURALES SOBRE SUELOS DE BASALTO CON LANDSAT-8 Y
SENTINEL-2

por

Sebastián Andrés BERRETTA CONSTENLA

Juan Luis CORTI TRIACA

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO

URUGUAY

2022

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. MgSc. Ricardo Rodríguez Palma

Ing. Agr. Mag. Federico Pintos

Ing. Agr. PhD. Pablo Boggiano

Ing. Agr. Dra Romina de Souza

Fecha: 13 de setiembre de 2022

Autores:

Sebastián Andrés Berretta Constenla

Juan Luis Corti Triaca

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de la República y Facultad de Agronomía por permitirnos llevar adelante nuestra formación académica.

A nuestro director de tesis de grado Ing. Agr. MgSc. Ricardo Rodríguez por darnos la posibilidad de realizar nuestro trabajo y el apoyo brindado durante su elaboración. Además, a nuestro co-director Ing. Agr. Mag. Federico Pintos por el tiempo y la dedicación durante todo el proceso.

A nuestras familias por el apoyo incondicional, esfuerzo y afecto recibido durante toda la carrera.

A nuestros amigos y compañeros, que formaron parte y fueron partícipes durante todo este proceso de formación profesional.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES	VI
1 <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1 <u>OBJETIVOS</u>	2
1.1.1 <u>Objetivo general</u>	2
1.1.2 <u>Objetivos específicos</u>	2
2 <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1 <u>GANADERÍA SOBRE CAMPO NATURAL</u>	3
2.2 <u>REGIÓN DE BASALTO</u>	3
2.2.1 <u>Unidades de suelos</u>	4
2.2.2 <u>Tipos de suelos</u>	5
2.2.3 <u>Agrupamientos de suelos según CONEAT</u>	7
2.2.4 <u>Vegetación</u>	9
2.2.5 <u>Clima y asociación de variables meteorológicas con la producción de forraje de los distintos tipos de campos de Basalto</u>	11
2.2.6 <u>Respuesta a la fertilización de campo natural</u>	12
2.3 <u>FLUJO DE ENERGÍA EN AGROECOSISTEMAS PASTORILES</u>	14
2.4 <u>PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA AÉREA</u>	15
2.4.1 <u>Métodos de estimación de la PPNA</u>	16
2.5 <u>USO DE SENSORES REMOTOS</u>	20
2.5.1 <u>Teledetección mediante sensores remotos</u>	20
2.5.2 <u>Índices espectrales</u>	22
2.5.3 <u>Características de los satélites utilizados</u>	28
2.6 <u>EFICIENCIA DE USO DE LA RADIACIÓN</u>	31
2.7 <u>HIPÓTESIS</u>	36
3 <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	37
3.1 <u>LOCALIZACIÓN DEL ESTUDIO</u>	37
3.2 <u>CARACTERIZACIÓN EDÁFICA</u>	37
3.3 <u>OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN</u>	37

3.4	OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES Y DATOS METEOROLÓGICOS.....	40
3.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	42
3.5.1	<u>Test de bondad de ajuste del modelo</u>	42
4	<u>RESULTADOS</u>	46
4.1	PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA AÉREA (PPNA)	46
4.2	FRACCIÓN INTERCEPTADA DE LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA.....	48
4.3	RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA ABSORBIDA.....	49
4.4	EFICIENCIA DEL USO DE LA RADIACIÓN.....	51
4.5	PPNA ANUAL ESTIMADA UTILIZANDO EUR ÚNICA PARA TODO EL AÑO Y VARIABLE PARA CADA ESTACIÓN	51
4.6	AJUSTE DEL MODELO CON USO DE LA EUR ÚNICA O VARIABLE.....	55
4.7	CORRELACIÓN DE VALORES DE EUR OBTENIDOS CON SENTINEL-2 Y LANDSAT-8.....	56
5	<u>DISCUSIÓN</u>	58
5.1	LA EUR PODRÍA SER VARIABLE SEGÚN LA ESTACIÓN DEL AÑO Y SITIO.....	58
5.2	EL MODELO PROPUESTO POR MONTEITH PUEDE SER UTILIZADO PARA LA ESTIMACIÓN DE PPNA DE DISTINTOS SITIOS	59
5.3	SE PUEDE ESTIMAR PPNA UTILIZANDO IVN. A PARTIR DE IMÁGENES SENTINEL-2 CON IGUAL O MEJOR PRECISIÓN QUE UTILIZANDO IMÁGENES LANDSAT-8.....	60
6	<u>CONCLUSIONES</u>	61
7	<u>RESUMEN</u>	63
8	<u>SUMMARY</u>	64
9	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	65
10	<u>ANEXOS</u>	80

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Características físicas y químicas de los suelos Litosol negro y pardo rojizo.	5
2. Características físicas y químicas de Brunosol y Vertisol.	6
3. Producción anual de forraje (kg MS. ha ⁻¹) por tipo de suelo de la unidad Queguay Chico y producción máxima y mínima.	17
4. Resumen de forma de cálculo a partir de Landsat-8 y Sentinel-2.	30
5. Criterio de inicio y fin de estaciones.	38
6. Características de los sitios donde se recabaron los datos de crecimiento.	38
7. Resumen del set de datos utilizados a partir de la clasificación de los cluster.	40
8. Coeficiente de determinación (R ²) de valores estimados y medidos, utilizando EUR variable y única para cada uno de los sitios estudiados.	53
9. Tasas de crecimiento diario, desvíos estándar y coeficientes de variación de los distintos agrupamientos.	55
10. Pruebas de bondad de ajuste del modelo en suelos superficiales, suelos medios con y sin el agregado de fertilización y profundos con uso de EUR anual única y variable.	56
11. Tasas de crecimiento promedio diario, desvíos estándar y coeficientes de variación de datos medidos y resultantes a partir de uso de EUR estimada con Sentinel-2 y Landsat-8.	57
12. Pruebas de bondad de ajuste del modelo de datos medidos y resultantes a partir del uso de EUR estimada con Sentinel-2 o Landsat-8.	57

Figura No.

1. Diagrama de flujo de energía en un ecosistema.....	15
2. Diagrama de flujo que esquematiza los pasos para estimar la productividad a partir del modelo de eficiencias de Monteith.....	19
3. Espectro electromagnético y detalle de la zona del visible.....	21
4. Firma espectral teórica de la vegetación en activo crecimiento.....	22
5. Esquema del procesamiento de datos espectrales para derivar estimaciones de variables funcionales del ecosistema.	23
6. Modelo empírico para estimar la fracción de la radiación fotosintéticamente activa que es absorbida (fRFA) a partir del índice de vegetación normalizado.....	26
7. Relación entre la fRFA de biomasa verde y NDVI. para diferentes condiciones.....	27
8. Esquema de estimación de la EUR a partir del índice de vegetación.	31
9. Eficiencia del uso de la radiación para distintos ambientes edáficos del Basalto.....	35
10. Mapa de potreros y grupos de suelos CONEAT.....	37
11. Mapa de empotrerramiento de EEFAS resaltado de sitios estudiados y georreferenciación de sus respectivas jaulas de exclusión con grupos de suelos CONEAT	39
12. Tasa de crecimiento diario observada (TCD) en cada estación para cada sitio estudiado.	46
13. Evolución de la tasa de crecimiento diario estacional observada (TCD.) de en cada sitio, durante la serie histórica 2013-2021.....	47
14. Evolución de la tasa de crecimiento diario estacional observada (TCD.) de las jaulas utilizadas como testigos, durante la serie histórica 2013-2021.	47
15. Fracción interceptada de la radiación fotosintéticamente activa (fRFA) para cada estación de los sitios estudiados, a partir de datos provistos por los sensores de Landsat.....	48
16. Evolución de la fracción interceptada de la radiación fotosintéticamente activa (fRFA) en cada estación en los sitios durante la serie histórica (2013-2021).....	49

17. Radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) diaria a nivel estacional obtenida a partir de datos provistos por Landsat de los sitios estudiados.....	49
18. Radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) diaria a nivel estacional de los sitios durante la serie histórica (2013-2021).....	50
19. EUR estimada a partir de datos provistos por Landsat de los sitios estudiados.	51
20. Regresión de PPNA anual entre valores estimados y medidos a partir del uso de EUR única o variable.	52
21. PPNA real y estimada a partir de EUR única y variable estacional de los sitios estudiados.....	52
22. PPNA diaria para suelos superficiales (Ss.), medios (Sm.), medios fertilizados (Sm F.) y profundos con datos medidos a partir de cortes de jaulas y con datos estimados utilizando EUR única anual y variable por estación..	54
23. Regresión entre EUR estimadas a partir de Sentinel-2 y Landsat-8.	57

1 INTRODUCCIÓN

El campo natural uruguayo forma parte de una de las mayores áreas de pastizales templados húmedos y subhúmedos del mundo, denominados como los pastizales del Río de la Plata (Soriano, 1991). Comprende casi dos tercios del territorio nacional y es una gran fuente de alimento para la producción de carne y lana.

Las pasturas naturales contienen una gran diversidad en especies y ecotipos de plantas, adaptadas a las condiciones propias del suelo, así como a las condiciones del clima y del manejo a que se las somete. Aunque las gramíneas perennes de ciclo estival sean su principal componente, contienen una destacada biodiversidad, cerca de 400 especies de gramíneas, y más de 100 especies de leguminosas, organizadas en distintas comunidades, responsables en gran parte de sus principales características: la estabilidad productiva y la resiliencia ante eventos adversos, originados ya sea por clima o por manejo (Jaurena et al., 2013).

El uso racional de estas pasturas es determinante para la sostenibilidad y sustentabilidad de los sistemas ganaderos basados en recursos nativos. Una herramienta clave para lograr esto es conocer la producción de forraje de estas pasturas para determinar la capacidad de carga de las mismas.

Se han realizado innumerables esfuerzos desde la investigación, técnicos y productores a nivel local y regional, para conocer cuál es el crecimiento de las pasturas y su comportamiento a nivel estacional. Existen diversas metodologías para estimar el crecimiento de forraje, entre ellas, los métodos directos o destructivos (mediante cosechas secuenciales de biomasa) e indirectos o no destructivos, desde la estimación visual hasta la utilización de sensores remotos basados en modelos empíricos. Los directos son considerados como los más precisos, aunque demandan tiempo y trabajo de campo, además de generar la desaparición del forraje para el consumo animal. Por otro lado, los indirectos son fáciles y rápidos de implementar. Estos últimos como desventaja requieren de una calibración con anticipación, y sus principales limitantes radican en las posibles fuentes de variación espacio-temporales de las pasturas (composición botánica, estado fenológico y fisiológico) entre otras. Monteith (1972), plantea un modelo para estimar la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) o crecimiento neto de las pasturas y que es posible de ser aplicado mediante el uso de sensores remotos (principalmente con sensores multiespectrales a bordo de satélites).

Hoy, gracias al avance de la tecnología, es posible conocer la PPNA a partir de imágenes satelitales a una resolución, frecuencia y precisión cada vez mayores. Puede conocerse desde la producción estacional y anual a nivel del establecimiento, como de las distintas comunidades y potreros que lo componen.

El modelo de Monteith (1972), plantea que la PPNA está determinada por la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) por las plantas y la eficiencia con que esa energía se transforma en materia seca aérea o biomasa, o eficiencia del uso de la radiación (EUR). A su vez, la RFAA es producto de la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFAi), estimada a partir de datos de estaciones meteorológicas y de la fracción que es absorbida por las hojas (fRFA), la cual puede ser estimada con datos de la teledetección. La EUR puede ser estimada a partir de cortes de biomasa y es menos variable que la RFAA para un recurso forrajero dado, pero se ha reportado variabilidad en términos espaciales (ambientes) y temporales (estacionalmente).

Esta tesis se llevó a cabo en la Estación Experimental de la Facultad de Agronomía de Salto (EEFAS), con información generada en ocho años de trabajo de tasas de crecimiento en pasturas naturales de Basalto, obtenida con cortes de biomasa aérea en jaulas de exclusión al pastoreo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Determinar y caracterizar la variabilidad en la EUR, que puede ocurrir a nivel temporal y espacial, utilizando el modelo de Monteith (1972), con información de PPNA generada a campo, radiación global aportada por estaciones meteorológicas e Índice de Vegetación Normalizado (IVN) con el uso de sensores remotos a bordo de dos satélites (Landsat-8 y Sentinel-2).

1.1.2 Objetivos específicos

- Calcular la EUR de las distintas comunidades vegetales generadas por distintos ambientes, y evaluar si su variabilidad debe ser tenida en cuenta en la estimación de la PPNA
- Validar el modelo propuesto por Monteith (1972) bajo las condiciones establecidas en el trabajo en comunidades vegetales de pasturas naturales de sitios con distinta profundidad del suelo: suelos superficiales, profundos y medios con y sin agregado de fertilizante.
- Comparar los valores resultantes de EUR a partir de datos provistos por los sensores a bordo de los satélites Landsat-8 y Sentinel-2.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 GANADERÍA SOBRE CAMPO NATURAL

La ganadería constituye según MGAP. DIEA (2017), una de las principales fuentes de riqueza para el Uruguay, siendo su principal sustento el campo natural.

El campo natural consiste principalmente en pastos, junto a hierbas, pequeños arbustos y árboles ocasionales sobre un paisaje ondulado con fertilidad variable bajo un clima subtropical húmedo, caluroso en verano y con invierno suave (Allen et al., 2011).

De acuerdo con MGA. DIEA (2011), el campo natural constituye el 64,3% del área del territorio nacional, y se suma a los mejoramientos en cobertura y campos fertilizados abarca el 68,5%. Considerando solamente a la ganadería, el campo natural es la principal base forrajera, representando una cobertura del 80% del área destinada para este fin.

Según los registros de FUCREA en 2017 el campo natural ocupa en promedio un 74% de la superficie de los establecimientos, con un rango entre diferentes sistemas ganaderos que va de 59,3% al 87,6% de la superficie explotada (Asuaga y Berterreche, 2019).

Para la región de Basalto, se ha documentado una disminución de su participación desde 95% (Berretta et al., 1998b) a un 91% en superficie ocupada (Baeza et al., 2011b). Más recientemente, aunque los pastizales naturales siguen siendo el principal componente Baeza et al. (2019) estimaron que cubren el 74,7% del área.

2.2 REGIÓN DE BASALTO

La región comprende la mitad Norte de Uruguay en su porción central (Baeza et al., 2011b) siendo el material geológico predominante una lava de Basalto denominada en el país como formación Arapey (Durán, 1998).

Con una superficie de algo más de 4 millones de hectáreas (21% del territorio), se extiende por los departamentos de Artigas, Salto, Paysandú, Tacuarembó, Rivera, Río Negro y Durazno (MAP. DSF, 1979). La región de suelos sobre Basalto no sólo es la más extensa del Uruguay (Arias 1963, Termezana 1976, Bologna 1997) sino que, dentro de ella, se desarrolla la mayor proporción de ganadería ovina (36% del total de ovinos) y una gran parte de la ganadería bovina (17% del total de bovinos), albergando más del 30% de los productores ganaderos (Berretta, 1998c). Presenta un relieve que desciende de la Cuchilla de Haedo hasta las proximidades del Río Uruguay, con un paisaje de sierras, seguido de una zona de colinas y lomadas (Millot et al., 1987).

Esta región se caracteriza fundamentalmente por estar asociada a sistemas extensivos de producción ganadera de baja productividad e inversión, donde pastorean conjuntamente bovinos y ovinos, los cuales tienen como principal alimento el campo natural. La baja producción forrajera, en particular en los suelos de Basalto superficial y la alta variabilidad climática, se manifiestan en bajos indicadores productivos. Esta baja productividad y alta dependencia de las condiciones meteorológicas, junto con el deterioro del poder de compra del productor, han llevado a una relativa inestabilidad económica y financiera de los establecimientos de la región (Berretta, 1998c).

Rosengurtt (1944), documentó que los productores de esta región se dedican a la cría de terneros que, en parte, se llevan a novillos de preparación iniciada o avanzada; existen algunas zonas con aptitud invernadora, pero la mayor parte se “terminan” en el Sur. Hay zonas ovejeras que producen lanas de muy alta calidad, particularmente al Este de Río Negro, Paysandú y Salto, y en el Suroeste de Tacuarembó, en suelos del Serra Geral.

Para Millot et al. (1987), en el Basalto los campos con suelos superficiales y profundos oscilan en su aptitud de uso: ovejeros, con cría, ciclo completo o invernada vacuna de acuerdo al porcentaje y calidad de suelos profundos que lo integren, siendo los más ovejeros y aptos para el capón, aquellos de la unidad Cuchilla de Haedo – Paso de los Toros, y Queguay Chico, los de la unidad Itapebí -Tres Árboles y algunos de Cuaró, presentan excelentes aptitudes para la invernada vacuna.

2.2.1 Unidades de suelos

Los suelos de esta región se han originado a partir de derrames basálticos que dieron lugar a las formaciones geológicas Arapey (Basaltos toleíticos) y Puerto Gómez (Basaltos espilíticos). Según su grado de desarrollo se los puede agrupar en suelos superficiales, medios y profundos. Estos diferentes tipos de suelos se asocian en distintas proporciones, dentro de una misma unidad, dando lugar a un intrincado mosaico, con cambios notables en cortas distancias. La profundidad de estos varía desde la roca desnuda hasta aproximadamente un metro (Berretta, 1998d).

Las unidades de suelos con predominancia de suelos superficiales (unidades Cuchilla de Haedo- Paso de los Toros y Queguay Chico) representan el 40,2 %. Mientras que las unidades de suelos en las que predominan suelos medios (unidades Curtina y Masoller) representan el 21,8 %. Por último, las unidades de suelos predominantemente profundos (Arapey, Baygorria, Cuaró e Itapebí-Tres Árboles) representan el 38% de la superficie del Basalto (Anexo No. 1, MAP. DSF, citado por Berretta, 1998d).

2.2.2 Tipos de suelos

2.2.2.1 Suelos superficiales: Litosoles

Son suelos de poco desarrollo que carecen de horizontes diagnósticos subsuperficiales, apoyándose directamente el horizonte superficial sobre el estrato rocoso (Durán, 1985) a 30 cm o menos de profundidad por encima del cual ocurre un horizonte diagnóstico superficial melánico u ócrico (Durán, 1998).

Su uso es pastoril con énfasis en la cría de lanares y vacunos. Tienen baja capacidad de retención de agua y por lo tanto alto riesgo de sequía. Cuando se producen precipitaciones intensas, el agua escurre sin ser aprovechada por la vegetación y se transforma en agente de erosión (Berretta, 1998d).

Los dos tipos más importantes de Litosoles que se encuentran en la región son los Litosoles negros y los pardo rojizos (Durán, 1998). Los primeros tienden a ubicarse en la base de amplias concavidades que aparecen en zonas planas, altas, pequeñas concavidades en las pendientes suaves, en los bordes de áreas planas con suelos profundos locales o en zonas transicionales entre suelos profundos y superficiales rojos. Los Litosoles rojos aparecen en lomas convexas, hacia el borde de mesetas o en áreas de pendientes fuertes (Bologna, 1997).

En el Cuadro No. 1 se detallan las principales características de estos suelos.

Cuadro No. 1. Características físicas y químicas de los suelos litosol negro y pardo rojizo

SUELOS	Horizonte	Espesor (cm)	Arena 2-0,05 mm (%)	Limo 50-2 um (%)	Arcilla < 2um (%)	pH (en H ₂ O)	Materia orgánica (%)	CIC (a pH 7) (meq/100g)
Litosol negro	A1	0-20	10,9	42,3	46,8	6,2	6,6	44,4
Litosol pardo rojizo	A1	0-15	30,3	37,6	32,1	6,1	5,2	25,5

Fuente: adaptado de Durán (1985).

Los Litosoles negros poseen mayor contenido de materia orgánica, sílice, arcilla y una capacidad de intercambio catiónico más elevada, en tanto que los suelos rojizos son más ricos en óxidos de hierro y aluminio. El pH y la saturación de bases no son significativamente diferentes (Durán, 1985).

2.2.2.2 Suelos profundos

Los dos principales tipos de suelos medianamente profundos asociados a los suelos superficiales en proporciones variables son Brunosoles y Vertisoles, mientras que los Planosoles se encuentran asociados en menor proporción. Los primeros, comparten una serie de características como lo es poseer perfil desarrollado, de color pardo oscuro o negro, alta fertilidad natural y una profundidad que puede ser mayor a un metro (Berretta, 1998d).

2.2.2.3 Brunosoles

Son suelos de color oscuro, alto contenido de materia orgánica, elevada saturación en bases y texturas medias a algo pesadas. Presentan un horizonte melánico de profundidad variable pero siempre mayor de 30 cm y grado de diferenciación casi siempre más acentuado que en Vertisoles, por lo que la textura del horizonte superficial suele ser algo más liviana que en éstos (Durán 1985, 1998).

En la región estos suelos se destinan a la ganadería, vacuna y ovina, y en menor proporción a cultivos de cereales, oleaginosos y forrajes. Poseen una adecuada profundidad para el desarrollo radicular y una alta capacidad de retención de agua. El contenido de materia orgánica es alto o medio en condiciones naturales, pero tiende a disminuir cuando son cultivados. Son suelos con niveles de fósforo bajos y además tienen una capacidad media de fijación de este elemento. El riesgo de erosión es bajo en condiciones de pastoreo, mientras que cuando son cultivados el riesgo varía con la topografía (Durán, 1985).

Cuadro No. 2. Características físicas y químicas de Brunosol y Vertisol

SUELOS	Horizonte	Espesor (cm)	Arena 2-0,05 mm (%)	Limo 50-2um (%)	Arcilla<2um (%)	pH (en H ₂ O)	Materia orgánica (%)	CIC (a pH 7) (meq/100 g)
Brunosol	A1	0-19	13,1	46,3	40,6	6,2	6,9	35,8
Vertisol	A1	0-20	6,8	36,7	56,5	5,9	8,7	57,1

Fuente: adaptado de Durán (1985).

2.2.2.4 Vertisoles

Son suelos que presentan un horizonte melánico, de más de 50 cm de profundidad. Su textura es uniformemente pesada en todo el perfil, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, las bases intercambiables y la saturación de bases son muy elevadas (Durán 1985, 1998).

Estos suelos se caracterizan por estar constituidos por arcillas expansivas (montmorillonita) y presentar un microrrelieve con montículos y depresiones, generalmente de diámetro menor a un metro, a veces llamado «gilgai», aunque vernáculamente se los denomina «campos de tacuruses». La vegetación que se desarrolla en las depresiones está compuesta por especies más productivas y de mejor calidad que la de los montículos (Berretta, 1998d).

Su uso es similar al de los Brunosoles. Tienen profundidad suficiente para el desarrollo radicular y alta capacidad de retención de agua. El contenido de materia orgánica es elevado en el horizonte superficial. El contenido de fósforo es bajo, con una capacidad de fijación media. Los cambios en el contenido de humedad del suelo provocan fenómenos de contracción y expansión, debido a las arcillas expansivas, que causan un agrietamiento del suelo que modifica los mecanismos de pérdidas y ganancias de agua. El riesgo de erosión es reducido porque estos suelos se encuentran generalmente en zonas planas. Desde el punto de vista ganadero son campos algo húmedos y fríos en invierno (Durán, 1985).

2.2.2.5 Planosoles

Son suelos que poseen un horizonte álbico (eluvial que ha perdido arcilla o hierro, solos o en combinación) inmediatamente por encima de un horizonte argilúvico (horizonte enriquecido en arcillas cristalinas silicatadas de origen iluvial) de máximo desarrollo (Durán, 1985).

Es escasa su presencia en la zona basáltica, aunque han sido observados en algunas altiplanicies dentro de la asociación Cuaró. Se trata de suelos muy diferenciados, de textura media y drenaje imperfecto, que presentan una materia orgánica muy estabilizada y fuertemente ligada a la arcilla, lo que se manifiesta en una estructura muy fuerte y resistente a la erosión (Durán, 1998).

2.2.3 Agrupamientos de suelos según CONEAT

2.2.3.1 Suelos superficiales

Según la clasificación de MAP. CONEAT (1979), los suelos superficiales corresponden a la zona 1 y subzonas 1.1 y 1.2, que se separan según la proporción que ocupan los suelos superficiales, de profundidad media y los profundos. A su vez, cada subzona es dividida en grupos CONEAT, los cuales se diferencian por el área ocupada por los suelos superficiales, la rocosidad y pedregosidad, la predominancia de Litosoles pardo rojizos o Litosoles negros o la coexistencia de ambos y la energía del relieve.

En la subzona 1, los suelos dominantes son Litosoles Subéutricos Melánicos (Litosoles pardo rojizos) y Litosoles Eutricos Melánicos (Litosoles pardo oscuros y negros). Los suelos asociados son Brunosoles Eutricos Típicos y Vertisoles Háplicos, ambos desde moderadamente profundos a profundos. El porcentaje de suelos superficiales y manchones sin suelo dentro de cada grupo es de hasta el 75%, excepto en el grupo 1.10b, donde oscila entre el 85 y 95%. El índice CONEAT de estos grupos va de 30 en el 1.10b, el más superficial y pedregoso, hasta 70 en el 1.10a, que tiene suelos asociados más profundos.

Los grupos 1.10a, 1.10b, 1.11b y 1.12 son correspondientes a la unidad Cuchilla de Haedo - Paso de los Toros; mientras que el 1.10a se corresponde con la unidad Queguay Chico.

En la subzona 2, los suelos dominantes son Litosoles Eutricos Melánicos, Vertisoles Háplicos de profundidad moderada y Brunosoles Eutricos Típicos de profundidad moderada y superficial. Los asociados son suelos profundos, tanto Brunosoles Eutricos Típicos como Vertisoles Háplicos. La superficie ocupada por los suelos superficiales en los grupos de esta subzona está entre 50 y 60%. El índice CONEAT de estos grupos va de 26 en el 1.24 hasta 88 en el 1.22. Los otros cuatro grupos tienen índice entre 74 y 86.

Los grupos 1.20, 1.21 y 1.23 corresponden a la unidad Curtina; el 1.22 a la unidad Masoller y los grupos 1.20, 1.24 y 1.25 a la unidad Cuchilla de Haedo - Paso de los Toros, que es la de mayor superficie y la más heterogénea de las unidades de Basalto superficial y medio.

2.2.3.2 Suelos profundos

En la clasificación de MAP. CONEAT (1979), los suelos profundos de Basalto se encuentran en la zona 12. Esta zona se divide en dos subzonas según la superficie ocupada por los suelos profundos y superficiales y por el grado de rocosidad y pedregosidad. Las subzonas se subdividen a su vez en grupos de suelos teniendo en cuenta los criterios antes mencionados y la pendiente.

Los Vertisoles Háplicos y los Brunosoles Eutricos Típicos son los suelos profundos dominantes en los grupos 12.11, 12.12 y 12.13 de la subzona 1; en el grupo 12.10 son dominantes los Planosoles Eutricos Melánicos, Brunosoles Eutricos Típicos y Vertisoles Háplicos. Los suelos asociados son Litosoles, Brunosoles Eutricos Típicos y Vertisoles Háplicos de menor profundidad. En esta subzona los grupos de suelo tienen un 90% de suelos profundos. El índice CONEAT de estos grupos va de 109 en el 12.10 (Planosoles) a 162 en el 12.11 (suelos asociados moderadamente profundos), con 149 y 158 en los 12.12 y 12.13 respectivamente.

Los grupos 12.11, 12.12 y 12.13 son correspondientes a la unidad Itapebí -Tres Árboles; mientras que, el 12.10 se corresponde con la unidad Cuaró.

2.2.4 Vegetación

La vegetación dominante en la región basáltica es herbácea, siendo los arbustos y árboles muy poco frecuentes; éstos últimos forman bosques en las orillas de arroyos y ríos. La vegetación herbácea está compuesta por una mayoría de especies de gramíneas perennes, mientras que las leguminosas nativas son muy poco frecuentes; se encuentra también un número elevado de especies de otras familias botánicas: compuestas, umbelíferas, ciperáceas, juncáceas, etc., pero con frecuencias reducidas, excepto en hábitats particulares (Berretta, 1998d).

En esta vegetación que recubre los campos hay especies estivales (C4), con crecimiento en primavera, verano y otoño, e invernales (C3), con crecimiento en otoño, invierno según la temperatura, y primavera. Las especies estivales son las más frecuentes, participando con 60 a 80% en el recubrimiento del suelo. En los superficiales las especies C3 tienen frecuencia relativamente elevada, pero son hierbas enanas y pastos ordinarios de baja producción, mientras que en los suelos de mayor profundidad se encuentran pastos finos invernales (Berretta, 1998d).

Las pasturas de esta área en general muestran un alto potencial productivo en suelos medianamente profundos a profundos, dado el bajo nivel de degradación y el equilibrio de especies estivales/invernales observado (Millot et al., 1987). Los pastizales de la cuesta basáltica se destacan como los más conservados de acuerdo con la heterogeneidad interna asociada a cambios en la altura del estrato basal, la cobertura total, la estratificación, la frecuencia de especies decrecientes con el pastoreo, la proporción de tipos funcionales de plantas y el grado de invasión de especies exóticas (Altesor et al., 2019b).

Rosengurtt (1977), definió para suelos superficiales, subsuelo compacto y sin fisuras, una nómina de especies exclusivas tales como *Aristida echinulata*, *Botriochloa imperatroides*, *Gomphrena uruguayensis*, *Paspalum indecorum*, *Piptochaetium cucullatum*, *Sporobolus monandrus*, *Stipa leptocoronata*, *longicoronata* y *torquata*, así como *Trindens hackelii*. Para suelos profundos definió a *Paspalum pauciciliatum*. A su vez, Lezama et al. (2011), definieron que las especies exclusivas de la región, pero encontradas en baja frecuencia y abundancia, fueron *Tridens hackelii*, *Stipa longicoronata*, *Ditaxis acaulis*, *Ditaxis rhizantha*, *Lippia coarctata* y *Guilleminea elongata*.

En los suelos superficiales, son característicos los tapices más abiertos, con suelos desnudos e invasión de hierbas enanas (Millot et al., 1987), las gramíneas más

frecuentes son estivales, pertenecientes a los géneros, *Chloris*, *Bouteloua*, *Schizachyrium*, *Aristida*, *Eragrostis*, *Bothriochloa*. En estos suelos las hierbas enanas se hacen frecuentes en invierno, al disminuir la actividad de los pastos estivales. A medida que la profundidad del suelo es mayor, se encuentran especies de gramíneas más productivas de los géneros *Paspalum*, *Andropogon*, *Axonopus*, *Coelorhachis*, *Schizachyrium*, *Stipa*, *Piptochaetium* y *Poa*; también se encuentran algunas leguminosas de los géneros *Adesmia*, *Trifolium*, *Rhynchosia*, *Desmanthus* y *Desmodium* (Berretta, 1998a).

En los suelos de mayor profundidad y fertilidad la vegetación está compuesta por especies de mayor producción y calidad, apetecibles por los animales, aunque en algunos hábitats los pastos duros, rechazados por los animales, pueden ser dominantes. En los suelos superficiales las especies son de menor porte y productividad y el recubrimiento del suelo es más reducido (50-70%) que en los de mayor profundidad (>90%), aspectos que contribuyen a resaltar las diferencias en la cantidad de forraje producido (Berretta, 1998d).

Los suelos superficiales son muy sensibles a los déficits hídricos, reduciéndose rápidamente la producción de forraje cuando comienza a faltar agua, mientras que en los de mayor profundidad esta reducción es más lenta. Cuando se restablecen las condiciones de humedad adecuada, los superficiales reinician su crecimiento rápidamente, con tasas de crecimiento superiores a las de los profundos, mientras que éstos tardan un lapso mayor (Berretta, 1998d).

Lezama et al. (2011), determinaron tres unidades de pastizales, asociadas a gradientes de profundidad del suelo, textura, pendiente y posiciones del paisaje: B-I (asociado a suelos superficiales, con alta frecuencia de pedregosidad y rocosidad en superficie), B-II (posiciones altas y medias del paisaje, con altos porcentajes de pedregosidad y rocosidad en superficie) y B-III (laderas plano cóncavas, valles y en interfluvios tabulares asociada a suelos de profundidad media y alta), siendo la última la más dominante ocupando un 55,6% y las demás ocupando un 35,8% del área cubierta por pastizal natural (Baeza et al., 2011b).

Baeza et al. (2019), comprobaron para la cuesta basáltica dos tipos de comunidades vegetales en función del análisis discriminativo de imágenes satelitales, que fueron descritas en su composición florística por Lezama et al. (2019). La de pastizal ralo, que agrupa las unidades de vegetación B-I y B-II de Lezama et al. (2011), presenta un predominio de gramíneas estivales sobre gramíneas invernales, y es notable la ausencia absoluta de arbustos, con una cobertura vegetal baja en el entorno del 60% y presencia frecuente de rocas y/o piedras en la superficie. La de pastizal denso que corresponde a la unidad de vegetación B-III de Lezama et al. (2011) presenta también un predominio claro de la cobertura de gramíneas estivales, seguida en segundo lugar por gramíneas invernales; la cobertura vegetal en general es próxima al 100% y la presencia

de rocosidad y pedregosidad en superficie ocurre raramente. Las especies indicadoras son *Selaginella sellowii* y *Rostraria cristata* en el pastizal ralo (asociados a condiciones de escasez de agua), y *Stenichisma hians* y *Piptochaetium stipoides* en el pastizal denso (gramíneas de condiciones mésicas y alto valor forrajero). Se estimó un 74,7% del área cubierta por pastizales naturales, de los cuales, 24,8% corresponden a pastizal ralo y 49,8% a pastizal denso (Baeza et al., 2019).

2.2.5 Clima y asociación de variables meteorológicas con la producción de forraje de los distintos tipos de campos de Basalto

El clima en el Uruguay es subtropical templado, con fluctuaciones estacionales muy marcadas. Se considera un clima subhúmedo debido a que la evapotranspiración potencial en verano es mayor que las precipitaciones, lo que ocasiona deficiencias de agua en el suelo (Corsi, 1978). La relación entre precipitación y evapotranspiración potencial (ETP), muestra deficiencias de agua desde fines de primavera (diciembre) y a través del verano, mientras que los excedentes se presentan de marzo a setiembre. Sin embargo, al realizar balances hídricos, considerando la capacidad amortiguadora de distintos suelos de Basalto (en particular de los suelos profundos) se observa que a mayor capacidad de almacenaje de agua del suelo, menores resultaron los períodos y magnitudes de la deficiencia y el exceso (Bettolli et al., 2010).

Según datos medidos entre el 1961 y 1990, de Sur a Norte, la precipitación media anual aumenta en Uruguay de 1098 mm a 1639 mm, aumentando la temperatura media anual de 16,5°C a 18,1°C. Mínimas y máximas medias anuales varían respectivamente de 12,1°C y 21,1°C a 12,7°C y 23,4°C (MDN. DNM, 1996).

El cambio climático actual y la ocurrencia de fenómenos climáticos extremos, tales como sequías e inundaciones, tienen impactos en los sistemas humanos en forma directa, así como mediante modificaciones que generan en los sistemas agrícolas y pastoriles en forma indirecta (Baethgen, 1997). La precipitación ha mostrado variabilidades, desde un nivel de análisis diario a uno multi-decádico (Bidegain y Caffera 1991, Barros et al. 2005). Las temperaturas (medias y extremas) también han mostrado variabilidad en distintas escalas e incremento en las últimas décadas (Bidegain y Krecl 1998, Rusticucci y Renom 2008).

En un estudio en que se estimó las relaciones existentes entre las tasas de crecimiento de las pasturas naturales de Basalto y variables meteorológicas, encontraron que el otoño presentó relación directa entre la tasa de crecimiento y los montos totales de precipitación durante la estación y con la frecuencia de días de lluvia, y una relación inversa con las frecuencias de días con precipitación que no superaron la ETP. En el caso de los suelos superficiales, se encontró además asociación con las temperaturas bajas (relación directa con la temperatura mínima en suelos superficiales negros y

relación inversa con la frecuencia de días con temperaturas inferiores a 10°C en superficiales rojos). Durante el verano, existe un efecto asociado a variables de humedad (relación directa con precipitación total y frecuencia de días con precipitación e inversa con frecuencia de días con precipitaciones menores a la ETP), así como sensibilidad de la pastura a altas temperaturas (relación inversa con la frecuencia de días con temperaturas máximas > a 35°C). En la primavera no hay un efecto significativo en el crecimiento de la pastura de las variables meteorológicas indicadoras de humedad y solo se registró efectos significativos directos de las temperaturas máximas y mínimas en el suelo profundo y una relación inversa con la frecuencia de días con temperaturas mínimas por debajo de 10°C en suelos profundos y superficiales negros. No se presentaron correlaciones significativas en invierno, aunque sí cierta dependencia negativa con la frecuencia de heladas en los suelos superficiales (Bettolli et al., 2010).

2.2.6 Respuesta a la fertilización de campo natural

El tapiz de campo natural ha evolucionado hacia una predominancia de especies ordinarias, incremento de gramíneas de escasa productividad y alta sobrevivencia, acentuación de diferencias estacionales de producción, proceso de extranjerización con avance de especies foráneas, acción de agentes erosivos por reducción de la densidad del tapiz y disminución de las pasturas más productivas por introducción de la agricultura (Carámbula, 1997).

Por estas razones, se plantea la incorporación de nutrientes y/o especies en busca de mejorar la oferta, distribución y/o calidad de los recursos forrajeros y es lo que se denomina “siembras en cobertura” o “mejoramientos de campo”, entre otras denominaciones. El concepto se basa en adicionar al sistema lo que le falta en vez de sustituir un tipo de vegetación por otro (Ayala y Bendersky, 2017).

Los contenidos de fósforo (P) en suelos de áreas ganaderas son bajos, situándose por debajo de 5 ppm. (Hernández et al., 1995). En suelos de Basalto, el agregado de 80 kg. ha⁻¹ de P₂O₅ incrementó un 32% el contenido de P en el forraje en primavera (Jaurena et al., 2015b). Cardozo et al. (2017), compararon 109 situaciones de campo sin fertilizar y fertilizado con P entre 1976 y 2015, encontrando que la productividad primaria de las comunidades no está mayormente limitada por la disponibilidad de P, sino que el nitrógeno (N) resulta un factor más limitante.

A pesar de que el campo natural se encuentra adaptado a niveles reducidos de nutrientes se ha encontrado respuesta a la fertilización con NP (Castells et al. 1971, Bemhaja 1996, Rodríguez Palma y Rodríguez 2010a, Ayala y Bendersky 2017). Estos autores informan de respuestas muy importantes del campo natural profundo de Basalto, principalmente en la producción de verano y otoño. La fertilización nitrogenada a comienzos del otoño puede estimular el rebrote y crecimiento de las especies invernales

y alargar el período vegetativo de las estivales, antes del descenso de las temperaturas. La fertilización de fines de invierno seguiría estimulando a las invernales y ayudaría al rebrote más temprano de las estivales. Este manejo tendería a reducir el período de escaso crecimiento invernal (Berretta et al., 1998b). Las gramíneas invernales productivas como *Bromus auleticus*, *Poa lanigera* y *Stipa neesiana* (Berretta et al. 1998b, Boggiano et al. 2006), responden positivamente al agregado de nitrógeno, y desplazan la productividad primaria hacia el período invernal, conduciendo los campos hacia un proceso de invernización (Boggiano et al., 2006). Berretta (2005), señala que la fertilización de otoño-invierno es una estrategia que puede seguirse en vegetaciones que poseen especies invernales perennes de buenos pastos en una frecuencia relativa superior a 20 %. Jaurena et al. (2015a), determinaron que la aplicación de N incrementa la contribución de *Coelhorachis selloana*, *Panicum hians*, *Bromus auleticus* y *Poa lanigera*.

Rodríguez Palma y Rodríguez (2010a, 2010b), sobre suelos de la unidad Queguay Chico, comprobaron que con el uso de la fertilización nitrogenada y fosfatada (24 a 46 kg. ha⁻¹. año⁻¹ de P₂O₅ y 100 unidades. ha⁻¹. año⁻¹ de N) en fin de otoño (mayo) y fin de invierno (agosto), durante un período de ocho años consecutivos, la producción de forraje anual fue 27% superior en el tratamiento fertilizado. Luego de diez años de aplicación consecutiva de fertilización N-P la producción anual promedio fue 30% mayor en el tratamiento fertilizado, difiriendo entre tratamientos en cinco años. La tasa de crecimiento de forraje estacional en el tratamiento fertilizado fue superior: 56% en invierno, 48% en primavera, 13% en verano y 10% en otoño. Se observaron cambios en la composición de las especies, al sexto año de aplicación continua, aumentando con la fertilización las gramíneas invernales en un 25% y registrando una reducción 29% en gramíneas estivales, de 45% en malezas de campo sucio y de 38% en malezas menores y leguminosas.

Berretta et al. (1998b), en suelos de la Unidad Queguay Chico, evaluaron la fertilización otoño-invernal con N y P a diferentes cargas animales en un periodo de tres años consecutivos, obteniéndose en todos los tratamientos fertilizados una superioridad en el crecimiento anual de 27 % en el primer año, 54 % en el segundo y 75 % en el tercero. La tasa de crecimiento diario de los tratamientos fertilizados fue mayor en todas las estaciones del año. En cuanto a la composición florística de las parcelas fertilizadas se constató un aumento de las especies invernales y pastos tiernos y finos y una disminución de pastos ordinarios.

Bemhaja (1994), reporta para un tapiz natural sobre Vertisol de Basalto profundo aumentos en la producción anual de forraje de 83% para el segundo año de fertilización, con 120 unidades. ha⁻¹. año⁻¹ de N.

2.3 FLUJO DE ENERGÍA EN AGROECOSISTEMAS PASTORILES

El funcionamiento ecosistémico se refiere al intercambio de materia y energía entre la comunidad biótica y la atmósfera. Su caracterización involucra medición de flujos. Estos incluyen entre otros, la productividad primaria neta aérea (PPNA), la evapotranspiración, productividad neta del ecosistema, la mineralización de N y las pérdidas totales de nutrientes (Paruelo, 2008).

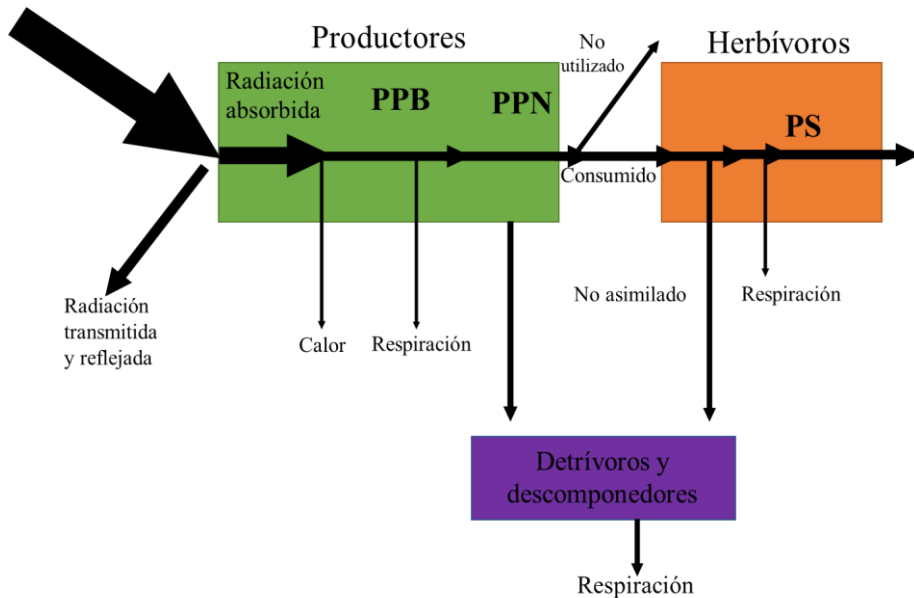
En términos termodinámicos, los ecosistemas son máquinas que reciben energía de una fuente externa, generalmente el sol. Cuando la entrada de energía a un ecosistema es exactamente igual a su producción total de energía, el estado de equilibrio que existe es un caso especial de la primera ley de la termodinámica. La segunda ley también es relevante. Implica que, en todo proceso espontáneo, físico o químico, la producción de energía "útil", que podría aprovecharse en una forma como el trabajo mecánico, debe ir acompañada de una "pérdida" simultánea de calor. Ningún sistema biológico puede violar o evadir esta ley. El calor producido por una célula que respira es un componente ineludible del metabolismo celular, el costo que la naturaleza tiene que pagar para crear un orden biológico a partir del caos físico en el ambiente de plantas y animales (Monteith, 1972).

Un marco conceptual en el estudio de los agroecosistemas ha sido el flujo de energía en el ecosistema (Figura No.1). Es un esquema en el que se identifican una serie de componentes (niveles tróficos) y flujos con los que se interrelacionan (Altesor et al., 2011). Dividir la energía útil de un proceso termodinámico por la energía total involucrada da una cifra de la eficiencia del proceso, y este procedimiento se ha utilizado ampliamente para analizar el flujo de energía en los ecosistemas (Monteith, 1972). El uso del concepto de eficiencia energética en el análisis del crecimiento de la materia seca de cubiertas vegetales, se ha ido generalizando (Monteith 1977, Gallagher y Biscoe, Warren Wilson, Varlet-Grancher, citados por Gosse et al. 1986) y destacándose particularmente la importancia de la interceptación de radiación solar en las variaciones de producción.

En condiciones de suministro de agua y minerales no limitantes, varios autores han podido establecer, en algunas especies, una relación lineal entre la materia seca total acumulada por la cubierta vegetal y la cantidad de energía interceptada (Monteith 1977, Biscoe y Gallagher, Bonhomme et al., citados por Gosse et al. 1986). Es por esto que se establece dentro del diagrama de flujo de energía a la radiación interceptada como uno de los principales factores.

Con la ayuda de tales relaciones, se hace posible estimar de una manera sencilla el potencial de productividad de una región, información necesaria para la determinación y gestión de sus recursos agrícolas (Gosse et al., 1986). Manejar un ecosistema implica conocer estrategias de intervención para maximizar uno o más de esos flujos. Un claro

ejemplo, en un sistema ganadero el objetivo sería maximizar en el largo plazo la magnitud del flujo de productividad secundaria o producción de carne (Altesor et al., 2011).



Las cajas representan los compartimentos de los niveles tróficos. Las flechas indican los flujos (PPB = Productividad Primaria Bruta, PPN = Productividad Primaria Neta, PS = Productividad Secundaria).

Figura No. 1. Diagrama de flujo de energía en un ecosistema

Fuente: adaptado de Altesor et al. (2011).

Tal como se representa en el diagrama, la PPN, depende de las ganancias que se generan en la radiación absorbida, así como también de pérdidas en calor, senescencia y respiración, definiendo el flujo disponible para la cantidad de PS del sistema. Ésta dependerá del flujo de energía consumido y de las pérdidas por respiración y energía no asimilada en producto animal.

2.4 PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA AÉREA

La productividad primaria neta aérea (PPNA) se define como la tasa de producción de biomasa por unidad de área y tiempo, y está directamente vinculada con la cantidad de carbono almacenado en los órganos de las plantas. La PPNA, es el determinante principal de la disponibilidad de forraje en los sistemas de producción ganadera extensiva y el principal control de la carga animal (Oosterheld et al. 1992, Golluscio 2009). La PPNA, es una variable ecosistémica clave dentro de los sistemas ganaderos y es un descriptor integrador del funcionamiento del ecosistema. Determina la

cantidad de energía disponible para los herbívoros (niveles tróficos superiores) y por lo tanto condiciona la capacidad de carga y fija el límite a la capacidad de secuestrar carbono (McNaughton et al. 1989, Oesterheld et al. 1999).

Richmond et al. (2007), identifican a la PPNA como el proceso que mejor explica las variaciones en el nivel de oferta de servicios ecosistémicos. De hecho, buena parte de las funciones de producción de servicios ecosistémicos finales incluyen a la PPNA y su dinámica estacional como uno de los determinantes de la oferta (Paruelo et al., 2016).

2.4.1 Métodos de estimación de la PPNA

Son muchas las metodologías existentes para estimar la PPNA. Puede estimarse de la manera tradicional mediante cosechas secuenciales de biomasa o, con menor esfuerzo, utilizando modelos empíricos relacionados con la PPNA o precipitaciones, así como basados en el uso de sensores remotos (Sala y Austin 2000, Oesterheld et al. 2011).

2.4.1.1 Métodos directos destructivos por cosecha de biomasa en jaulas de exclusión al pastoreo

Existen en el país muchos trabajos basados en la estimación del crecimiento de los campos naturales, entre las distintas regiones agroecológicas, así como dentro de las mismas.

Para la región del Basalto, se publicaron desde el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) información de producción estacional y anual de forraje para los distintos tipos de suelos de las unidades de suelos, Queguay Chico e Itapebí - Tres Árboles.

La unidad Queguay Chico presenta predominancia de suelos superficiales (75%) y las principales características de los suelos que la componen han sido previamente mencionadas. Su producción anual de forraje varía según el tipo de suelo, siendo en promedio de 2885, 3772 y 4576 kg MS. ha⁻¹ para superficial pardo rojizo, negro y profundo, respectivamente (Berretta y Bemhaja, 1998f, Cuadro No. 3). La tasa de crecimiento diario de forraje y su participación estacional por tipo de suelo de la unidad para el período de 1980 a 1994, se presentan en Anexos No. 2 y No. 3.

Cuadro No. 3. Producción anual de forraje (kg MS. ha⁻¹) por tipo de suelo de la unidad Queguay Chico y producción máxima y mínima

Suelo	Producción anual	(Máximo - mínimo)
Superficial pardo rojizo	2885	4835 - 1412
Superficial negro	3772	5443 - 2330
Profundo	4576	6646 - 3204

Fuente: adaptado de Berretta y Bemhaja (1998f).

Por otra parte, la unidad Itapebí - Tres Árboles, presenta una mayor proporción de suelos profundos. Aun así, se distinguen los mismos tipos de suelos y su producción anual promedio en los tres tipos de suelos es muy similar (Anexo No. 4).

En todos los suelos, se denota una clara estacionalidad en la producción de forraje en donde la mayor proporción de la producción anual se concentra en primavera y otoño para la unidad Itapebí - Tres Árboles (Anexo No. 5) con una superioridad notoria frente a la unidad Queguay Chico, siendo en esta última el verano la estación más productiva superando ampliamente a los suelos de la otra unidad. La estación de invierno es la de menor producción, siendo la tasa de crecimiento similar entre unidades de suelos.

Aunque en general existe una gran variabilidad en la producción estacional interanual, los suelos profundos son más estables. En particular, en el otoño se registró la menor variabilidad en suelos superficial negro y profundo de la unidad Itapebí - Tres Árboles.

2.4.1.2 Métodos indirectos

Existen, sin embargo, métodos indirectos que pueden ser más fáciles, baratos y rápidos que el método de corte por jaulas de exclusión. Por un lado, la técnica de doble muestreo (Haydock y Shaw, 1975), la cual es una herramienta con la que se puede estimar la biomasa aérea, cuya medición es difícil o laboriosa, a partir de otra de fácil medición que a priori está correlacionada con la primera. La estimación visual, uso de discos lastrados, fotos digitales, son ejemplos de técnicas de doble muestreo. Si bien dicha metodología permite un aumento dramático en el número de muestras, su principal desventaja radica en la necesidad de calibración de dichas técnicas para cada recurso forrajero mediante un muestreo por cortes con anticipación, y sus principales limitantes radican en las posibles fuentes de variación espacio-temporales de las pasturas (composición botánica, estado fenológico y fisiológico) entre otras. Monteith (1972), plantea un modelo para estimar la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) o crecimiento neto de las pasturas y que es posible de ser aplicado mediante el uso de sensores remotos (principalmente con sensores multiespectrales a bordo de satélites).

2.4.1.3 Uso de modelos de simulación empíricos basados en la utilización de sensores remotos

La información espectral provista por sensores a bordo de satélites, con baja y media resolución espacial, tiene el potencial de ser usada para estimar la PPNA a bajo costo y en tiempo real, sobre grandes extensiones de territorio. Esta estimación se basa en índices espectrales que captan el desempeño fotosintético de la vegetación (Baeza et al., 2010).

En la región del Río de la Plata, y en particular, en Uruguay, se ha extendido el uso de estimaciones de PPNA basadas en índices de vegetación calculados a partir de datos provistos por sensores remotos (Paruelo et al., 2019). Estas estimaciones se apoyan en el uso de índices espectrales y el modelo ecofisiológico propuesto por Monteith (1972), que establece que la PPNA resulta del producto entre la radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) y la eficiencia de uso de la radiación (EUR), según la siguiente ecuación:

$$PPNA \text{ (g.m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}) = RFAA \text{ (MJ.m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}) \times EUR \text{ (g. MJ}^{-1})$$

La RFAA se define como el producto entre la radiación incidente (RFAi) y la fracción absorbida por la vegetación (fRFA), según la ecuación:

$$RFAA \text{ (MJ.m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}) = RFAi \text{ (MJ.m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}) \times fRFA$$

Según Jarvis y Leverenz (1983) la RFAA está determinada por:

- La dirección de la radiación entrante.
- La proporción de radiación difusa en la radiación global y su distribución hemisférica.
- Las propiedades espectrales de los elementos ópticos (hojas) en la RFA.
- La distribución espacial de estos elementos.
- La estructura del dosel (índice de área foliar, ángulos de las hojas).

Adicionalmente, Paruelo (2008), destaca tres limitantes en la estimación de la RFAA mediante sensores remotos:

- El tamaño del dosel en relación con el tamaño del pixel.
- La presencia de material no fotosintetizante (hojas senescentes, ramas).
- La heterogeneidad espacial de las cubiertas vegetales.

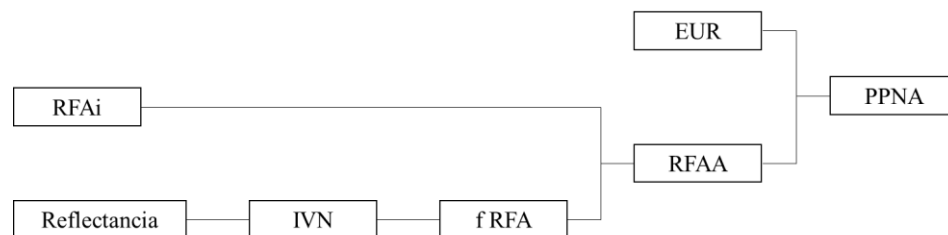
La variable RFAi presenta variaciones mínimas interanuales por lo que las condiciones subóptimas de crecimiento no la afectan. La RFAi puede ser calculada a partir de valores de la Radiación Global (RG) provisto por estaciones meteorológicas ya

que es una fracción relativamente constante de la misma que varía entre un 42 a un 55% dependiendo de la ubicación geográfica y las condiciones del cielo (Akmal y Janssen, 2004).

Al presente, el dato de RFAi, puede obtenerse de estaciones meteorológicas, mientras que para conocer la fRFA, es necesario estimarla mediante el uso de sensores remotos, dada su elevada relación con índices de vegetación como los son el índice de vegetación normalizado y el índice de vegetación mejorado o “EVI” (Tucker et al. 1985, Prince 1991).

La EUR, es un coeficiente de eficiencia (relación producto/insumo), que, según Oyarzabal et al. (2011) expresa la cantidad neta de biomasa vegetal generada por unidad de energía solar absorbida.

A continuación, se presenta un diagrama que esquematiza los pasos para estimar la PPNA



RFAi= radiación fotosintéticamente activa incidente; IVN= índice verde normalizado; fRFA= fracción de la RFAi, interceptada por la vegetación; RFAA= radiación absorbida por la vegetación; EUR= eficiencia en el uso de la radiación; PPNA= productividad primaria neta aérea.

Figura No. 2. Diagrama de flujo que esquematiza los pasos para estimar la productividad a partir del Modelo de Eficiencias de Monteith

Fuente: tomado de Paruelo et al. (2019).

Estimar la PPNA de manera precisa y con una resolución espacial y temporal compatible con la escala a la cual se toman las decisiones es un punto crítico en el uso y la conservación de los pastizales (Gallego et al., 2017). Numerosos trabajos describieron la variabilidad espacial y temporal de la PPNA, o de alguno de sus determinantes (por ejemplo, la fRFA) para distintas zonas del territorio uruguayo (Piñeiro et al. 2006, Baeza et al. 2010, Guido et al. 2014, Texeira et al. 2015). Estos estudios han sido, por otro lado, la base de un sistema de seguimiento forrajero que lleva adelante el INIA., el Instituto Plan Agropecuario y CONAPROLE (Grigera et al., 2007a).

La relación entre la máxima y la mínima PPNA mensual es de 3,4 a 2,3. Mientras que, las mediciones a campo de PPNA muestran relaciones entre valores máximos y mínimos de 2 o menores (Altesor et al., 2005).

La curva estacional de PPNA promedio estimada a partir de sensores remotos de las distintas comunidades, puede resultar similar debido a la fuerte influencia de la dinámica de la radiación incidente sobre los valores de PPNA (Oyarzabal y Paruelo, 2019).

Soca et al. (2011), determinaron las fuentes de variación espacio-temporal que afectaron la PPNA, determinada por cortes de biomasa y estimada con información de IVN del satélite MODIS-TERRA y con un factor de EUR según el tipo de pastura (0,46 en pastizales altos y 0,265 en bajos), entre 2006-2008, en tres potreros de un predio sobre la unidad geomorfológica “Isla cristalina” de la región centro-Sur. Dentro de sus resultados, la RFAA promedio fue en su variación similar y sincrónica a la PPNA, con valores máximos y mínimos en diciembre y junio, respectivamente. El incremento de IVN se asoció con mayor cantidad de forraje presente. Además, la estación del año afectó significativamente la PPNA. La PPNA estimada resultó afectada por la interacción potrero x estación. El patrón estacional de producción resultó similar entre ambas formas de estimación. Sin embargo, la PPNA total estimada resultó superior a la real por corte (4970 vs. 3700 kg MS. ha⁻¹. año⁻¹).

2.5 USO DE SENSORES REMOTOS

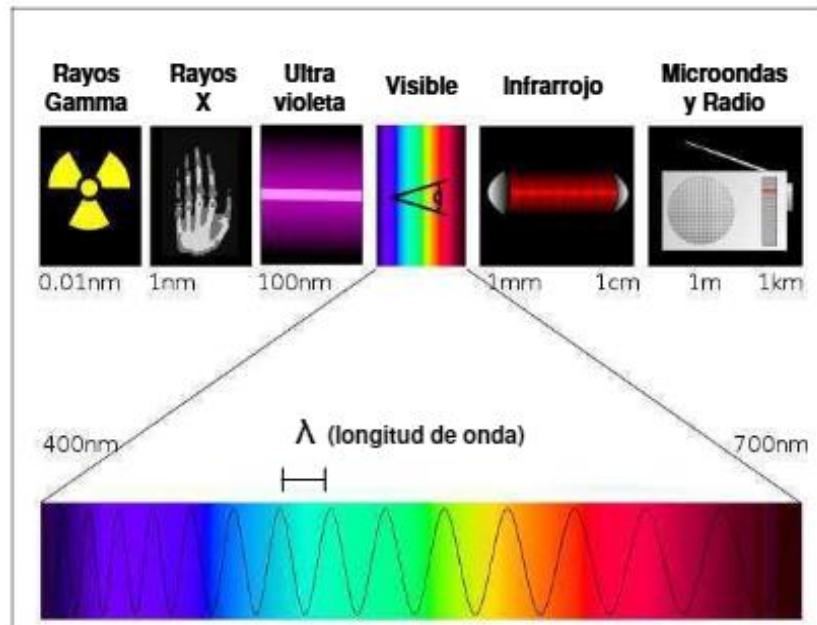
2.5.1 Teledetección mediante sensores remotos

Al presente, la teledetección es una herramienta importante para el estudio de la vegetación y su dinámica. Esto radica en que los sensores remotos brindan una gran cantidad de información de fácil acceso y con costos relativamente bajos (Tucker 1980, Gower et al. 1999, Paruelo et al. 1999, 2000, Kerr y Ostrovsky 2003, Nagendra, citado por Aplin 2005).

La puesta en órbita de satélites ha permitido generar una gran cantidad de datos utilizados para el estudio del planeta Tierra. Los sensores a bordo de satélites registran, de manera continua y a intervalos regulares de tiempo, la energía electromagnética que es emitida y/o reflejada por un objeto o superficie del planeta. Cada objeto o superficie posee una respuesta diferencial en el espectro electromagnético, lo que permite su discriminación de manera relativamente sencilla (Curran, 1985).

Los sensores remotos pasivos proveen información de la energía reflejada (reflectancia) en distintas porciones del espectro electromagnético, con respecto al total de energía que llega al tope de la atmósfera proveniente del sol (Figura No. 3). La

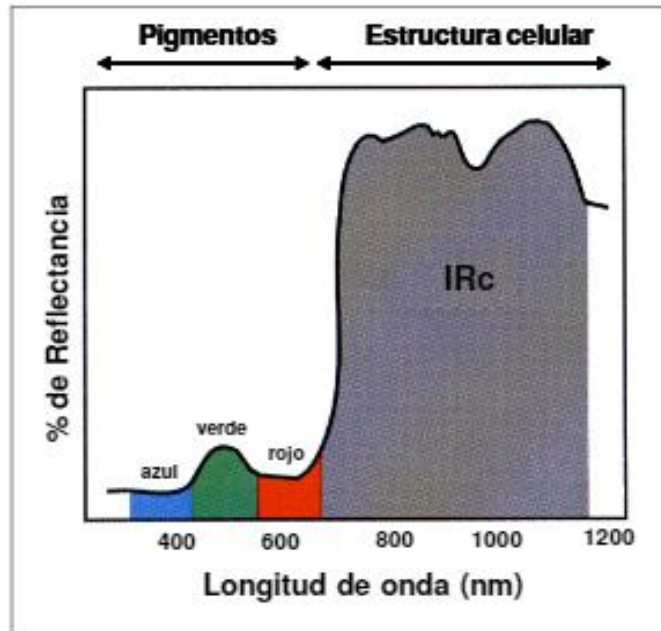
información espectral proveniente de las regiones del visible y del infrarrojo cercano permite caracterizar la vegetación (Goward et al. 1985, Tucker et al. 1985, Box y Holben 1989, Burke et al. 1991, Prince 1991, Paruelo et al. 2000, Moran 2000, Scotford y Miller 2005) y esto se debe a que los tejidos vegetales presentan un patrón característico en la absorción y reflexión de la luz en estas zonas del espectro, o “firma espectral”. Las plantas absorben parte de la energía para el proceso de la fotosíntesis en la porción del visible por acción de las clorofilas mientras que, en el infrarrojo cercano, la estructura de las hojas - principalmente el parénquima esponjoso del mesófilo - dispersa la mayor parte de la energía (Figura No. 4). Cualquier factor que afecte el estado fisiológico o la capacidad fotosintética de las plantas, afectará el patrón de reflexión en dichas longitudes de onda (Cristiano, 2010).



La longitud de onda está expresada en nanómetros (nm.) para la porción correspondiente al visible (400-700).

Figura No. 3. Espectro electromagnético y detalle de la zona del visible

Fuente: tomado de Cristiano (2010).



IRc= Infrarrojo cercano; nm= nanómetros

Figura No. 4. Firma espectral teórica de la vegetación en activo crecimiento

Fuente: tomado de Cristiano (2010).

2.5.2 Índices espectrales

Diversos índices espectrales, derivados de las imágenes satelitales, están vinculados a variables funcionales de los ecosistemas, por ejemplo, la productividad primaria (Prince 1991, Running et al. 2000), la evapotranspiración (Jackson 1985a, Noretto et al. 2005), la temperatura superficial (Di Bella et al., 2000), el albedo superficial (Fernández y Piñeiro, 2008), entre otros. El índice de vegetación normalizado (IVN o NDVI), es uno de los índices más ampliamente utilizado a nivel global (Turner et al., 2001). El IVN, posee una estrecha correlación con la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (Sellers, 1985), y por lo tanto con la productividad primaria neta aérea (PPNA Prince, 1991).

Mediante la medición de radiación reflejada o emitida que realizan los satélites, se puede generar la información espectral. Esto implica la “traducción” en una variable o índice con un significado biofísico (Figura No. 5). Esta traducción tiene una serie de aspectos en común. Cuando se trata de radiación reflejada (visible e infrarrojo cercano y medio) el primer paso incluye el cálculo de la reflectancia, o sea el cociente entre lo registrado por el sensor (expresado en unidades de radiancia) y la radiación incidente sobre la superficie (Paruelo, 2008).

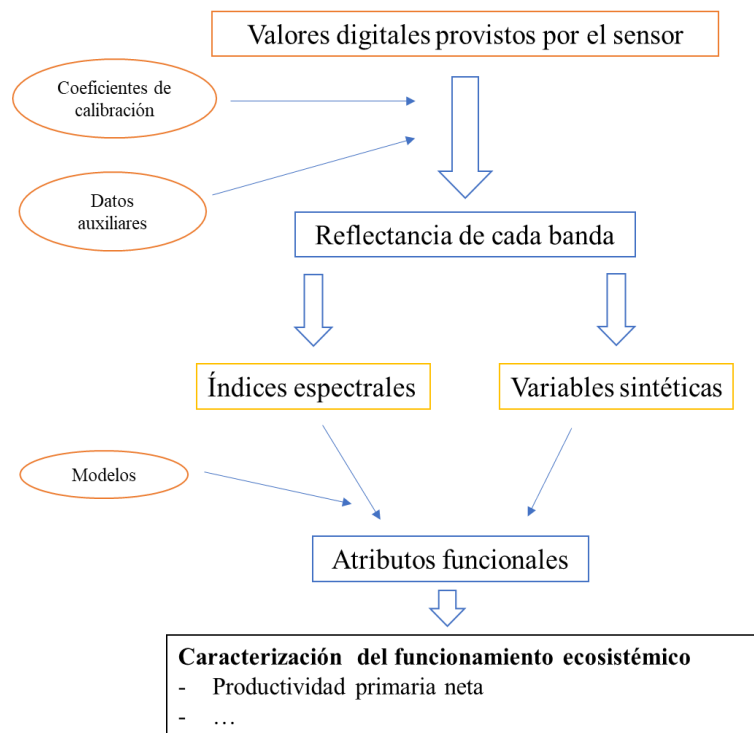


Figura No. 5. Esquema del procesamiento de datos espectrales para derivar estimaciones de variables funcionales del ecosistema

Fuente: adaptado de Paruelo (2008).

El comportamiento espectral de las superficies en las distintas porciones del espectro electromagnético (bandas), permite resultar en índices o variables sintéticas asociadas a procesos biofísicos. Algunos de estos índices y variables incluyen el Índice de Vegetación Normalizado (IVN), el Índice de Vegetación Mejorado (EVI ó IVM), el Índice de Reflectancia Fotoquímica (IRF) y el albedo de la superficie. Todos ellos pueden relacionarse de manera directa con atributos biofísicos de la superficie (por ejemplo, la fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por los tejidos verdes o la eficiencia en el uso de la radiación, Paruelo, 2008).

2.5.2.1 Índice de Vegetación Normalizado (IVN)

La estimación de la PPNA de recursos forrajeros perennes depende fundamentalmente de la cantidad de radiación efectivamente absorbida por los tejidos fotosintéticos (Di Bella et al., 2004). Esta cantidad puede estimarse a partir de la radiación incidente y de la proporción absorbida calculada en base a índices de vegetación derivados de sensores remotos (Paruelo et al., 2019).

Aunque diversos índices espectrales han sido propuestos como estimadores de la presencia y estado de la vegetación (Choudhury 1987, Baret y Guyot 1991, Ridao et al. 1998, Fensholt et al. 2004), el Índice de Vegetación Normalizado (o Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) ha sido y es el más utilizado. Según Paruelo (2008), el IVN dispone dos aspectos claves del comportamiento espectral de los tejidos fotosintéticos:

- la baja reflectancia en longitudes de onda correspondientes al rojo (debido a la absorción por parte de la clorofila).
- la alta reflectancia en la porción del infrarrojo cercano (debido a la estructura del mesófilo de las hojas).

El IVN se calcula como:

$$\text{IVN} = (\text{IR} - \text{R}) / (\text{IR} + \text{R})$$

En donde IR y R corresponden a la reflectancia en la porción infrarroja y roja del espectro respectivamente.

Existe una gran relación del IVN con la biomasa (Tucker 1977, Gerberman et al. 1984, Ripple 1985, Sellers 1985), el índice de área foliar o “IAF” (Curran 1983, Asrar et al. 1984, Baret et al. 1989) y la PPNA (Prince 1991, Paruelo et al. 1997). Según Paruelo (2008), se han generado numerosas aplicaciones a partir de estas relaciones del IVN en ecología regional, incluyendo clasificaciones de tipos de cobertura, tipos funcionales de ecosistemas, evapotranspiración, estimaciones de densidad de herbívoros (o de sus parámetros demográficos).

La correlación entre la PPNA y el IVN es mayor a 0,8 (Goward et al. 1985, Tucker et al. 1985, Box y Holben 1989, Burke et al. 1991, Prince 1991).

El IVN, está directamente relacionado con la absorción de radiación por las plantas, porque se basa en las propiedades espectrales de la vegetación verde de absorber intensamente la radiación visible que utiliza para la fotosíntesis (especialmente en la longitud de onda del rojo) y de reflejar la mayor parte de la radiación en la zona del infrarrojo cercano (Sellers, citado por Oyarzabal et al., 2011). Sin embargo, según Cristiano (2010), esta relación se debilita particularmente en tres situaciones:

1) Cuando hay forraje senescente: el canopeo todavía intercepta radiación incidente pero las hojas contienen menos pigmentos fotosintéticos por lo que el IVN disminuye (Leamer et al. 1978, Di Bella et al. 2004).

2) Cuando la cobertura es muy alta ya que la relación se satura (Myneni y Williams 1994, Joel et al. 1997, Ruimy et al. 1994, Viña y Gitelson 2005).

3) En situaciones de baja cobertura ya que la presencia de suelo desnudo altera la respuesta espectral de la vegetación y resulta difícil discriminar entre la vegetación y el suelo desnudo (Rondeax et al. 1996, Paruelo et al. 1997).

Por otro lado, la cantidad de radiación interceptada también depende de la superficie de los tejidos fotosintéticos y su disposición espacial. Los valores de la reflectancia van a depender principalmente de las propiedades ópticas de las hojas, pero la arquitectura del canopy puede también influir en la estimación de la $fRFA$ (Goel y Qin, 1996). Existe cierta controversia sobre las consecuencias de la arquitectura del canopy de las plantas y los mecanismos que controlan los valores de reflectancia. Por ejemplo, Colwell (1974), Jackson y Ezra (1985b), encontraron que la vegetación erectófila es capaz de atrapar una mayor cantidad de radiación en el dosel que las especies planófilas, aumentando así la capacidad para absorber la radiación. Por otra parte, Myneni y Williams (1994), sostienen que los canopeos con hojas horizontales interceptan más radiación incidente que aquellos que presentan inserción vertical de hojas, aumentando la reflectancia sobre todo en las longitudes de onda del infrarrojo cercano. Por lo tanto, las especies planófilas tendrían mayores valores de IVN que las plantas erectófilas. Además, el IVN es sensible tanto al valor absoluto del IAF como a su distribución espacial (Myneni y Williams, 1994). En resumen, es posible que la relación $fPAR - IVN$ se debilite en situaciones de estrés como también que difiera entre distintos tipos de vegetación (Colwell 1974, Jackson y Ezra 1985b, Myneni y Williams 1994, Turner et al. 2002).

El IVN presenta una relación alta y positiva con la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida ($fRFAA$) por la vegetación verde y por tanto con la productividad (Baret y Guyot 1991, Paruelo et al. 1997, Gower et al. 1999, Piñeiro et al. 2006). Existen trabajos que han demostrado tanto desde una perspectiva teórica como empírica que este índice es un estimador lineal de la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por los tejidos verdes o " $fRFAA$ " (Baret y Guyot 1991, Gamon et al. 1995, Myneni et al. 1995). Desde el punto de vista teórico, Sellers (1985), demostró que la relación exponencial entre $fRFAA$ y el índice de área foliar (IAF) puede ser descrita mediante un coeficiente de extinción ($kfRFAA$) que muestra la atenuación de la radiación en el tapiz. El IVN, también se relaciona con el IAF de manera exponencial y esta relación se caracteriza a su vez por un coeficiente de extinción $kIVN$ (Asrar et al., 1984). Como los valores de $kRFAA$ y de $kIVN$ son similares, $fRFAA$ e IVN están linealmente relacionados (Sellers, 1985). Todos estos autores nombrados en este párrafo comprobaron que los modelos teóricos de transferencia radiativa en un dosel, indican que la $RFAA$ puede ser estimada, si se conoce la cantidad de radiación reflejada en el visible y en una longitud de onda para la cual el coeficiente de extinción sea el doble que el de la luz visible. Esa longitud de onda corresponde al IR cercano.

La forma precisa de esa relación varía con la biomasa y una serie de relaciones semi-empíricas han sido propuestas: a) lineares (Choudhury 1987, Ruimy et al. 1994, Moreau et al. 2003), b) no-lineares (Potter et al., 1993) y c) una combinación de ambas.

Ruimy et al. (1994), con datos satelitales corregidos y filtrados con una intercepción cercana a 0, encontraron que la fPAR es función directa del IVN. Comúnmente se utiliza el modelo propuesto por Ruimy et al. (1994), que asume una relación lineal entre fRFAA y el IVN ya que el grado de ajuste es alto para la vegetación en activo crecimiento (Turner et al. 2002, Di Bella et al. 2004).

$$fRFA = -0,025 + 1,25 \times IVN$$

Gallego et al. (2017) calibraron localmente (Sierras del Este) el modelo mediante una interpolación no lineal (Potter et al., 1993) con valores calibrados para la región (Grigera et al., 2007b), y asignaron absorción nula (fRFAA=0) a valores de IVN medidos en áreas sin cobertura verde y absorción máxima (fRFAA=0.95) a valores de IVN de áreas con alta cobertura (pasturas con índice de área foliar mayor a 3). En la Figura No. 6 se presenta el modelo. La ecuación resultante fue:

$$fRFAA = \text{mín.} [SR / (SR_{\text{máx.}} - SR_{\text{mín.}}) - SR_{\text{mín.}} / (SR_{\text{máx.}} - SR_{\text{mín.}}), 0.95]$$

Donde $SR = (1 + IVN) / (1 - IVN)$, $SR_{\text{máx.}} = 11.62$, y $SR_{\text{mín.}} = 1.55$.

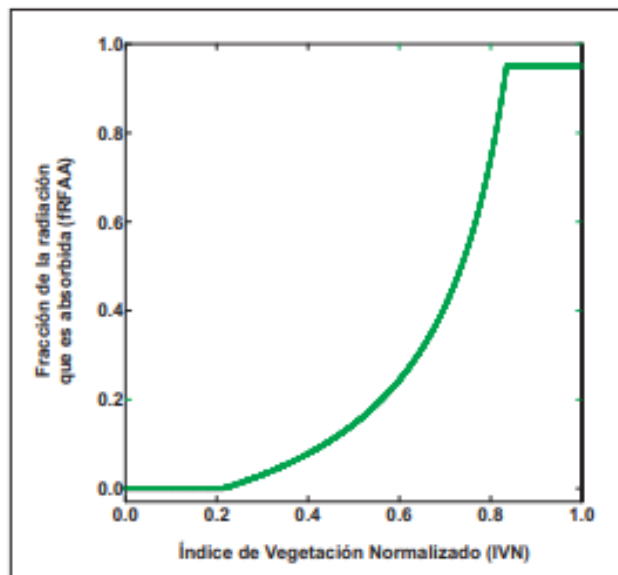
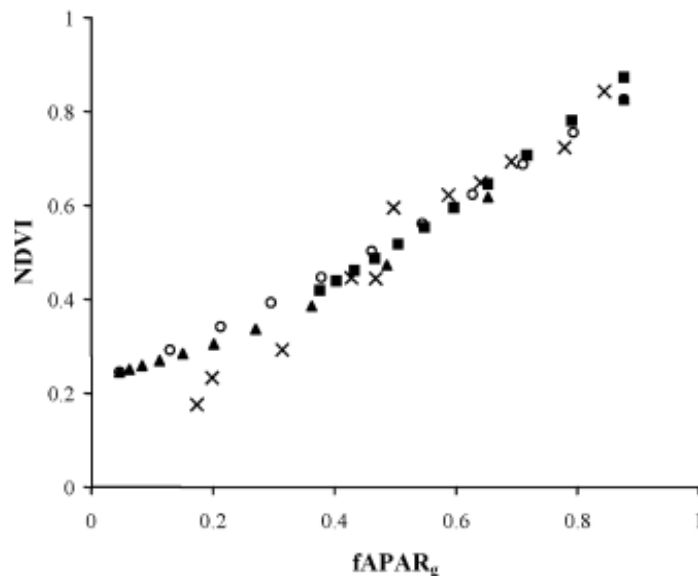


Figura No. 6. Modelo empírico para estimar la fracción de la radiación fotosintéticamente activa que es absorbida (fRFA) a partir del Índice de Vegetación Normalizado

Fuente: tomado de Gallego et al. (2017).

La relación entre el IVN y variables de estado como el IAF o la biomasa dependen de la arquitectura de la cubierta vegetal y de la cantidad de material senescente presente. La relación entre IVN y fRFAA está mucho menos afectada por la presencia de material senescente que la relación entre el IVN y la cobertura o el IAF Di Bella et al. (2004), investigaron el efecto del material senescente sobre el IVN y la estimación de fRFAA del total del tapiz vegetal y la proporción de forraje verde aislando tejidos verdes del material senescente. El IVN de los tejidos verdes (debajo del material senescente) se mantuvo constante pero el del total del tapiz vegetal disminuyó al aumentar la cobertura senescente. La fRFAA de todo el tapiz disminuyó ligeramente con el aumento de la cobertura de material no fotosintético a causa de un aumento del albedo. La fRFAA de los tejidos verdes mantuvo una relación lineal y positiva con el IVN (Figura No. 7).



(x)= medidas del primer experimento; (o)= simulaciones del primer experimento; (■)= simulación multicapa; (▲)= hojas senescentes – hojas verdes en simulación de capa completa.

Figura No. 7. Relación entre la fRFA de biomasa verde y NDVI para diferentes condiciones

Fuente: tomado de Di Bella et al. (2004).

2.5.2.2 Otros índices

Otro índice de vegetación comúnmente usado, fundamentalmente en los últimos años, es el Índice de Vegetación Mejorado (Enhanced Vegetation Index: EVI). El EVI., es un índice espectral similar en su concepción al IVN, pero que incorpora en su cómputo la banda del azul. Esto permite mejorar la calidad de las imágenes, evitando la saturación del índice a altos niveles de área foliar y reduciendo el efecto de la señal producida por el suelo. Al igual que el IVN, el EVI, tiene una relación estrecha y directa con la fRFAA. Esta relación entre los índices espectrales y la fRFAA, provee la base teórica para estimar la PPNA, a partir del IVN o el EVI (Baeza et al., 2011a).

Debido a la necesidad de datos adicionales a la reflectancia en el R y el IR, se han difundido índices espectrales derivados del IVN: se encuentra el Perpendicular Vegetation Index o “PVI”, el Soil-Adjusted Vegetation Index o “SAVI”, el Atmospherically Resistant Vegetation Index o “ARVI” y el Global Environment Monitoring Index o “GEMI”. Dado que son utilizados para situaciones específicas, así como la obtención de información en algunos casos más difíciles, es que no se han difundido tan masivamente como el IVN. Una de las mayores ventajas del IVN, es la posibilidad de calcularlo a partir de la información provista por la mayoría de los sensores de las plataformas de observación terrestre y muchos de los satélites meteorológicos. La normalización del índice, por otra parte, reduce el efecto de diferencia en iluminación de la superficie, sombra de nubes, algunas distorsiones asociadas a la topografía, etc. El IVN, exhibe algunos problemas relacionados con la saturación a altos niveles de biomasa y con su sensibilidad al sustrato debajo del tapiz (Paruelo, 2008).

2.5.3 Características de los satélites utilizados

2.5.3.1 Landsat

Existen diversos satélites puestos en órbita para la observación terrestre y la evaluación de sus recursos naturales. El programa Landsat co-liderado por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), es considerado como uno de los pioneros en brindar servicios de imágenes satelitales destinados al medio ambiente, basándose en la observación a alta resolución de la superficie terrestre, lanzando el primer satélite en 1972, Landsat 1, siendo el último en ponerse en órbita el Landsat 8 en 2013 (Sacristán, 2006). En setiembre del año 2021, se puso en órbita el Landsat 9 que ya está brindando sus servicios.

Los satélites Landsat (USGS, 2016) han evolucionado en su información elemental o píxel. Para principios de la década de los 80, el mismo era de 56 x 79 m, hoy

se registra en una dimensión de 30 x 30 m (Anexo No. 6). El satélite, posee un diverso número de bandas multiespectrales, para el caso del cálculo del Índice de Vegetación Normalizado (IVN), se utilizan las bandas 5 y 4 que representan las ondas rojas y las ondas infrarrojo cercano, respectivamente.

2.5.3.2 Sentinel

Los satélites Sentinel-2 (2A y 2B) son satélites de la ESA (European Space Agency) y son una nueva flota de satélites diseñada específicamente para proporcionar los abundantes datos e imágenes de que se nutre el programa Copernicus, de la Comisión Europea. Este programa único de vigilancia medioambiental está cambiando drásticamente la forma en que se gestiona el entorno, se entiende y abordan los efectos del cambio climático.

Los Sentinel-2 llevan una innovadora cámara multiespectral de alta resolución, con 13 bandas espectrales que aportan una nueva perspectiva de la superficie terrestre y la vegetación (ESA, 2015). La combinación de la alta resolución y las nuevas capacidades espectrales, así como un campo de visión que abarca 290 kilómetros de amplitud y sobrevuelos frecuentes, proporciona vistas de la Tierra sin precedentes.

La misión se basa en una constelación de dos satélites idénticos en la misma órbita, separados por 180 grados, para lograr una cobertura y una descarga de datos óptimos. Cada cinco días los satélites cubren todas las superficies terrestres, grandes islas y aguas costeras. Ésta proporciona información útil para las prácticas agrícolas y forestales, y para gestionar la seguridad alimentaria. Las imágenes de los satélites son empleadas para determinar varios índices vegetales, como el área con clorofila en la hoja y el contenido en agua. Esto es especialmente importante para predecir la producción de las cosechas, y para aplicaciones relativas a la vegetación de la Tierra.

Además de para vigilar el crecimiento de las plantas, Sentinel-2 puede mapear el estado y los cambios de la superficie terrestre, y observar las selvas. También alerta de la contaminación en lagos y aguas costeras. Las imágenes de inundaciones, erupciones volcánicas y deslizamientos contribuyen a gestionar las consecuencias de estos desastres, y colaboran en las tareas de ayuda humanitaria.

Con su cámara multiespectral y su amplia cobertura, la misión Sentinel-2 ofrece no solo continuidad, sino que amplía las capacidades de las misiones Spot, Rapideye y Landsat.

Según la USGS (2016), durante el desarrollo de Landsat 8 y Sentinel-2A, los científicos de calibración de ambos proyectos trabajaron en conjunto para realizar una

calibración cruzada de los sensores. Muchos científicos e investigadores esperan poder utilizar colectivamente datos de Landsat-8 y Sentinel-2A.

Las principales bandas Sentinel-2 visible e infrarrojo cercano tienen una resolución espacial de 10 metros, mientras que otras bandas tienen una resolución espacial de 20 metros o 60 metros como en el caso de las bandas costeras / aerosoles, vapor de agua y cirros. Para el cálculo de IVN, se utilizan las bandas 4 y 8, que corresponden a la fracción del espectro rojo e infrarrojo, respectivamente (Anexo No. 7).

En el Cuadro No. 4 se presenta un resumen de cómo se genera el IVN a partir de imágenes Landsat-8 y Sentinel-2.

Cuadro No. 4. Resumen de forma de cálculo a partir de Landsat-8 y Sentinel-2

	Landsat-8	Sentinel-2
Fórmula de IVN	$\frac{Banda_5 - Banda_4}{Banda_5 + Banda_4}$	$\frac{Banda_8 - Banda_4}{Banda_8 + Banda_4}$
Longitud de onda de la Banda correspondiente al rojo (μm)	0,63 – 0,67	0,65 – 0,68
Longitud de onda de la Banda correspondiente al infrarrojo cercano (μm)	0,85 – 0,88	0,78 – 0,90

2.5.3.3 Comparaciones entre estimaciones con distintos satélites

Paruelo et al. (2000), estudiaron la variación del Índice de Vegetación Normalizado y la Productividad Primaria Neta Aérea, entre los satélites NOAA/AVHRR y Landsat TM, en donde encontró que tienen dos fuentes principales de variabilidad, diferencias de estacionalidad y relacionadas con el sitio. En NOAA, la estacionalidad (resolución de 1000 m x 1000 m) es la única fuente de variabilidad, mientras que, para Landsat, se encuentran ambas fuentes. A su vez, el desvío estándar del IVN entre los sitios disminuyó a medida que la resolución espacial de la observación se volvió más gruesa. Los autores concluyen que Landsat es apropiado para captar diferencias entre sitios en la eficiencia de uso de la radiación, la composición botánica de la pastura o la arquitectura del canopeo.

Recientemente, Avogadro y Padró (2019), estudiaron la clasificación automática de imágenes captadas por los sensores MSI (MultiSpectral Imager) de Sentinel-2 y OLI (Operational Land Imager) de Landsat-8 en existencias de plantaciones forestales y concluyeron que el Sentinel-2 es el recomendado para hacer seguimiento por su mejora tanto en la resolución espacial como temporal.

2.6 EFICIENCIA DE USO DE LA RADIACIÓN

La eficiencia en el uso de la radiación (EUR) representa la eficiencia de conversión de energía en biomasa, una medida de la cantidad neta (tiene en cuenta la respiración) de carbohidratos sintetizados o tejidos generados (producto) por unidad de energía solar absorbida (insumo). La EUR (g de MS de biomasa/MJ de energía absorbida) es un coeficiente definido como la eficiencia en la conversión de la luz en materia seca mediante la fotosíntesis que resulta de la cantidad de PAR, absorbida por las plantas (Potter et al. 1993, Field et al. 1995).

Las plantas interceptan y absorben parte de la radiación solar que incide sobre ellas. A partir de la energía absorbida mediante la fotosíntesis sintetizan carbohidratos que utilizan para el crecimiento. Por lo tanto, la EUR es relativamente independiente tanto del área foliar y la biomasa de cada planta como del número de plantas (Oyarzabal et al., 2011).

Medir o estimar la EUR no es sencillo, y las pocas estimaciones disponibles no siempre pueden ser extrapolables a todas las estaciones de crecimiento y áreas de interés. Por un lado, la medición a campo de la EUR (Oyarzabal et al. 2011, Baeza et al. 2011b) presenta una serie de problemas fundamentales que limitan su aplicación: la disponibilidad de series largas de datos, la correspondencia entre la escala espacial a la cual se realizaron los cortes de biomasa y la estimación de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) por la vegetación y finalmente los errores asociados al cálculo de la PPNA a partir de variaciones en la biomasa (Oosterheld et al. 2011, Oyarzabal et al. 2011, Paruelo et al. 2019).

En el siguiente esquema (Figura No. 9) presentado por Oyarzabal et al. (2011), se denota el proceso a llevarse a cabo para despejar algebraicamente la EUR a partir del modelo ecofisiológico de Monteith (1972).

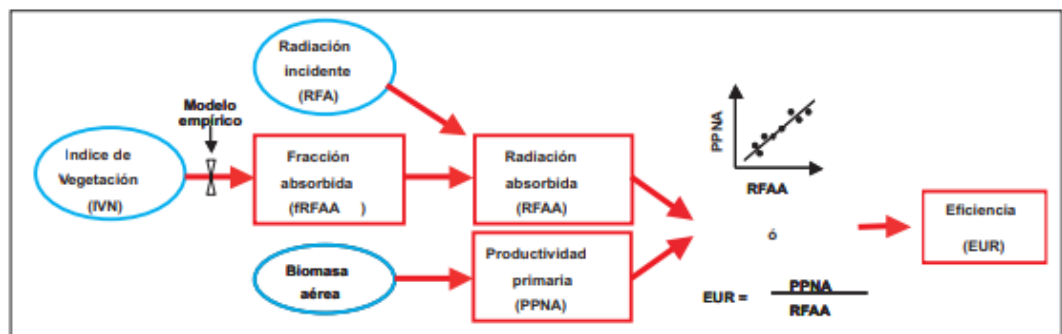


Figura No. 8. Esquema de estimación de la EUR a partir del Índice de Vegetación

Fuente: Oyarzabal et al. (2011).

El sistema de seguimiento forrajero activo en Uruguay ha permitido identificar algunos de los aspectos sobre los cuales trabajar para mejorar las estimaciones de PPNA. Uno de ellos es la estimación de la EUR, una de las variables en las cuales se basa el cálculo de PPNA propuesto por Monteith (1972). Para mejorar la estimación de la PPNA de los recursos forrajeros mediante sensores remotos y el modelo propuesto por Monteith (1977), es necesario conocer mejor la variabilidad espacial, temporal y entre tipo de coberturas de la EUR (Paruelo et al., 2019).

La eficiencia con la cual la energía absorbida es convertida en biomasa (gramos de biomasa por MJ de energía absorbida) explica una porción sustancialmente menor de la variabilidad espacial y temporal de la PPNA. Más aún, la EUR y la absorción de RFA, suelen estar correlacionadas para un mismo tipo de cobertura. Sin embargo, en ocasiones la EUR, determina diferencias en las tasas de acumulación de biomasa que pueden ser importantes desde el punto de vista aplicado, por ejemplo, para el cálculo mensual de raciones en sistemas ganaderos (Paruelo et al., 2019).

Monteith (1972), observó que la relación entre el RFAA y la PPNA, era lineal y con pendientes similares en varias especies cultivadas, por lo cual sugirió que la EUR presentaba valores relativamente constantes. Posteriormente, se reconoció que existe una importante variabilidad entre especies, grupos funcionales y ecosistemas (Ruimy et al. 1994, Gower et al. 1999, Turner et al. 2002). Además de la variabilidad entre especies, otros factores como el estadio fenológico, las condiciones climáticas como la temperatura y la disponibilidad de agua y nutrientes pueden alterar el valor de la EUR (Ruimy et al. 1994, Joel et al. 1997, Moreau et al. 2003, Turner et al. 2003, Piñeiro et al. 2006). Por otro lado, el pastoreo puede modificar los valores de la EUR ya que puede afectar, además de la estructura y composición florística de la vegetación, la tasa de crecimiento relativo y absoluto (Oosterheld et al., 1992).

Aquellos factores que afecten la fijación de C por parte del aparato fotosintético, pero no la generación de poder reductor y energía a partir de la transferencia de fotones, modificarán la EUR. Luego de producida la absorción de fotones por parte de los fotosistemas de los tejidos verdes, la cantidad de CO₂ que se puede reducir depende de la difusión de CO₂ al cloroplasto y de la actividad de la enzima RUBISCO, responsable de la reducción del dióxido de carbono. La difusión del CO₂ a los cloroplastos depende de la resistencia al flujo o de su inversa, la conductancia foliar. El grado de apertura de los estomas es el control más importante de la resistencia foliar a la difusión del CO₂. Por su parte el estado hídrico (el potencial agua) de la hoja determinará el grado de apertura de los estomas. De esto sigue que la disponibilidad de agua, a través de su efecto sobre el estado hídrico de la vegetación, afectará la EUR, al operar sobre la difusión del CO₂ (Paruelo et al., 2019).

Respecto a la actividad enzimática de la RUBISCO hay dos factores que la determinan. La concentración de RUBISCO y la temperatura. La cantidad de enzima

estará fundamentalmente limitada por la disponibilidad de N, y/o la eficiencia de uso de este nutriente por parte de las plantas. La temperatura afectará, a través de su Q10 (coeficiente de la tasa de variación al incrementar 10 °C) específico, la velocidad de las reacciones. Incrementos de N disponible para las plantas, genera aumentos en la RFAA y EUR. Al respecto, bajo condiciones de N limitantes vs no limitantes la tasa de crecimiento en verano y primavera puede ser entre un 15 a 42% respectivamente, de lo obtenido con la tasa más alta de fertilización con nitrógeno. La RFAA y EUR también aumentan por la fertilización con N, el primero probablemente debido a un desarrollo más rápido del área foliar y el segundo debido a una eficiencia fotosintética mejorada y/o una mayor partición de C en partes aéreas (Belanger et al., 1992).

El estrés hídrico en la vegetación puede reducir la producción de biomasa mediante dos mecanismos. Por un lado, se produce la senescencia temprana generando en ambos casos una disminución en la superficie foliar expuesta a la luz y por consiguiente una reducción en el fPAR. El segundo mecanismo es reduciendo la EUR para la producción de nueva biomasa por disminución de la utilización de los fotoasimilados para el crecimiento (Collino et al., 2001).

Por otro lado, el tipo fotosintético (C3 y C4) también podría generar diferencias en la EUR. Tanto en condiciones ideales de crecimiento como en condiciones de luz solar intensa, de elevadas temperaturas o de sequía, las plantas C4 son más eficientes que las C3 en producir materia seca ya que presentan menor fotorrespiración (Gosse et al. 1986, Byrd et al. 1992). Se han reportado diferencias en la EUR, bajo distintas condiciones nutricionales entre ambos tipos de plantas en donde la mayoría se han centrado en cultivos como el maíz, trigo o maní (Idinobaa et al., 2002). No obstante, existen pocos trabajos que cuantifiquen la EUR, y estudien sus variaciones entre ambos tipos de grupos funcionales, especialmente en gramíneas, sometidos a estrés hídrico, nutricional y a la interacción entre ambos factores ambientales.

Finalmente, son conocidos los efectos que genera el pastoreo en un pastizal, entre los cuales se puede citar el cambio en la diversidad de especies, la cobertura vegetal, la altura media de las plantas y la PPNA (Cargill y Jefferies 1984, Detling, 1987, Sala et al. 1988, McNaughton y Sabuni 1988). La remoción constante de biomasa en los sistemas pastoriles puede promover una reducción de la tasa de crecimiento absoluto por disminución de la cantidad de tejido fotosintético por planta. Sin embargo, es posible que el pastoreo aumente la tasa de crecimiento relativo (TCR: tasa de crecimiento por unidad de biomasa) de manera tal que la pérdida de biomasa sea completamente compensada por el aumento en la TCR (Oesterheld et al., 1992). La forma en que la vegetación responda a estos factores puede modificar la EUR.

Para un pastizal o cultivo, la EUR, tiene un máximo comparable con el rendimiento fotosintético a nivel de hoja en condiciones óptimas. Sin embargo, las bajas temperaturas y las restricciones hídricas y nutricionales, entre otros factores, reducen en

el campo el valor máximo de EUR (Prince 1991, Field et al. 1995, Gamon et al. 1995, Gower et al. 1999, Nouvellon et al. 2000).

La EUR, estimada a partir de valores del PRI (índice de reflectancia fotoquímica) derivados de datos MODIS mostraron una clara estacionalidad, con valores máximos en meses de invierno (junio y julio) y mínimos en meses de primavera (octubre y noviembre). Este patrón se repitió para las áreas ubicadas en distintas regiones del país (Oyarzabal y Paruelo, 2019).

Según Oyarzabal y Paruelo (2019), respecto del mínimo estacional (en primavera tardía), la EUR, resultó un 46% más alta en el invierno. Los valores máximos de EUR, se observaron cuando el nivel de radiación fue mínimo. Los cambios estacionales de PPNA observados fueron similares a las variaciones en valores de EUR calculados a partir de datos de cortes de biomasa. La EUR, disminuye marcadamente cuando los valores de radiación son altos y la magnitud de los déficits nutricionales e hídricos son mínimos (primavera tardía). Además de una fuerte variación estacional, la EUR derivada del PRI muestra una importante variación interanual. La EUR, a nivel mensual mostró una leve correlación negativa con la fRFA.

Cuantificar la EUR, permite conocer cómo varía. La EUR, varía entre tipos de vegetación, entre años y entre estaciones. Muestra una importante variación entre biomas, desde $0,27 \text{ g MJ}^{-1}$ para desiertos a $0,71 \text{ g MJ}^{-1}$ para selvas tropicales (Ruimy et al. 1994, Field et al. 1995). Entre años, las variaciones de EUR de pastizales semiáridos van desde $0,27$ a $0,35 \text{ g MJ}^{-1}$ (Nouvellon et al., 2000). Dentro de un año la variabilidad es mayor; se han reportado variaciones de la EUR entre estaciones en pastizales húmedos desde $0,2$ a $1,2 \text{ g MJ}^{-1}$ (Piñeiro et al., 2006) y desde $0,3$ a $1,3 \text{ g MJ}^{-1}$ (Oyarzabal et al., 2011). Parte de estas variaciones estacionales estuvieron asociadas positivamente con la precipitación y negativamente con la temperatura del aire (Piñeiro et al., 2006).

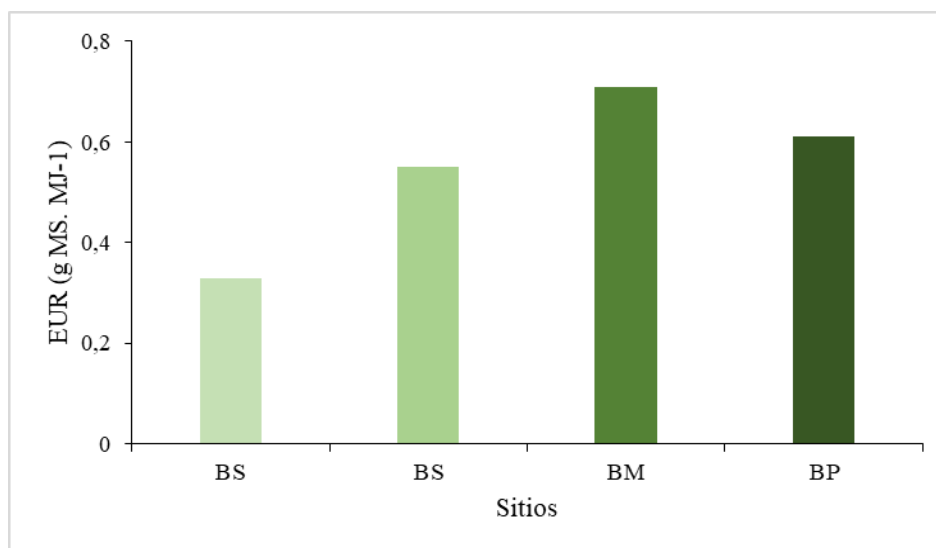
Los cambios estacionales en EUR, tienen consecuencias muy importantes sobre la estimación de la PPNA. Considerar una EUR constante a lo largo del año genera valores 17% menores en invierno y más del 20% mayores en primavera, respecto al cálculo de PPNA cuando la EUR se considera variable a nivel estacional (Oyarzabal y Paruelo, 2019).

Existen trabajos regionales (Piñeiro et al. 2006, Oyarzabal et al. 2011, Baeza et al. 2011b) que generaron estimaciones de EUR para distintos recursos forrajeros a partir de datos de cortes secuenciales de biomasa y mediciones de radiación absorbida (Oesterheld et al., 2011). Las estimaciones de EUR, derivadas de cortes de biomasa a campo tienen una gran variabilidad y desajustes en la escala de las estimaciones de PPNA, y de radiación absorbida. Por otro lado, las estimaciones de EUR, derivadas de

datos del sensor MODIS, dada la resolución espacial de estos, impiden percibir diferencias asociadas a comunidades.

Existen varias estimaciones de la EUR en Uruguay (Soca et al. 2011, Baeza et al. 2011b, Oyarzabal et al. 2011, Gallego et al. 2017, Asuaga y Berterreche 2019). De estos trabajos los de Oyarzabal et al. (2011), Paruelo et al. (2019), Asuaga y Berterreche (2019) fueron sobre Basalto.

Para el primero, Los valores de EUR, muestran un rango de variación entre 0,71 y 0,33 g MS. MJ⁻¹ para el sitio más productivo y menos productivo respectivamente (Figura No. 10).



BS = Basalto superficial; BM = Basalto de profundidad media; BP = Basalto Profundo

Figura No. 9. Eficiencia del uso de la radiación para distintos ambientes edáficos del Basalto

Fuente: adaptado de Oyarzabal et al. (2011).

Para Paruelo et al. (2019), la EUR promedio de una serie histórica del 2000-2016 en la Cuesta Basáltica, varió desde 0,42 a 0,57 g MS.MJ⁻¹ interanual. Dentro de los años varió de 0,40 a 0,58 g MS.MJ⁻¹, correspondiente a los meses octubre y junio respectivamente.

Asuaga y Berterreche (2019), reportan una variabilidad en la EUR, de 0,28 g MS.MJ⁻¹ a 0,50 g MS.MJ⁻¹. Utilizando datos de Berretta (1998e), encontraron una superioridad en la EUR, según el ambiente edáfico en cuestión. Los suelos profundos y

superficiales negros tuvieron una EUR promedio igual a 0,41 g MS.MJ⁻¹, y en los superficiales rojos fue 0,29 g MS.MJ⁻¹.

2.7 HIPÓTESIS

En base a los antecedentes citados durante la revisión bibliográfica, se determinaron las siguientes hipótesis:

- 1.1 La EUR de comunidades vegetales de pasturas naturales podría ser variable según la estación del año y sitio.
- 1.2 El modelo propuesto por Monteith puede ser utilizado para la estimación de PPNA de diferentes comunidades de campo natural.
- 1.3 Se puede estimar PPNA utilizando IVN a partir de imágenes Sentinel-2 con igual o mejor precisión que utilizando imágenes Landsat-8.1

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACIÓN DEL ESTUDIO

El estudio se llevó a cabo en la Estación Experimental de la Facultad de Agronomía de Salto (EEFAS) ubicada sobre la ruta nacional No. 31 km 21,5, paraje San Antonio, departamento de Salto (-31.3871, -57.7159).

3.2 CARACTERIZACIÓN EDÁFICA

La EEFAS, comprende siete grupos de suelos CONEAT característicos de Basalto como lo son 1.23, 1.21, 1.10b, 12.11, 12.22 y B03.1 y de formación Salto, S09.11 (ver Figura No. 10).

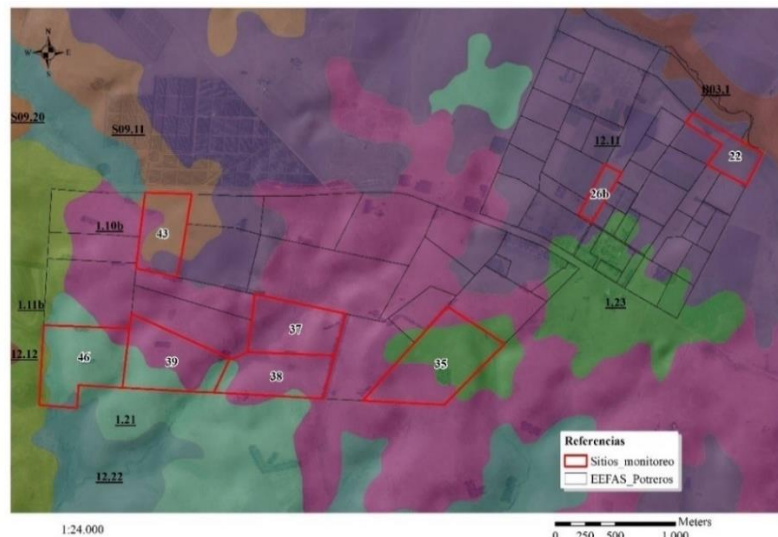


Figura No. 10. Mapa de potreros y grupos de suelos CONEAT

3.3 OBTENCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Datos de tasa de crecimiento fueron obtenidos mediante el método de jaulas de exclusión al pastoreo móviles (Frame, 1981). Al momento de la instalación inicial, en donde se cortó con tijera de aro a una altura de alrededor de 1 cm, en una superficie algo mayor a 1 m² y se colocó la jaula. Al final de cada periodo de tiempo de acumulación de forraje (45 días), se cortó con tijera de aro a la misma altura de 1 cm cuatro rectángulos de 0,2 x 0,5 m ubicados en las diagonales del cuadrado, representado por la base, totalizando una superficie cortada por jaula de 0,4 m². Anualmente de cada jaula se logró realizar ocho cortes.

Todos los datos fueron analizados, agrupando la información estacionalmente. El período abarca de utilización de datos de tasa de crecimiento, desde el 1 de marzo de 2013 hasta el 1 de marzo de 2021. A continuación, se detallan en el Cuadro No. 5 las fechas tomadas para comienzo y fin de cada estación:

Cuadro No. 5. Criterio de inicio y fin de estaciones

Estación	Inicio	Fin
Otoño	1 de marzo	31 de mayo
Invierno	1 de junio	31 de agosto
Primavera	1 de setiembre	30 de noviembre
Verano	1 de diciembre	28 de febrero (o 29 en caso de año bisiesto)

La información recabada comprende 30 jaulas de exclusión móviles distribuidas en 11 sitios. Hay algunas variantes en las unidades de suelo y grupos de suelos MAP. CONEAT (1979, Figura No. 11), reuniendo cuatro grupos de suelos de éste (Cuadro No. 6), dentro del área de estudio. En base a la recorrida realizada, algunos sitios son similares, en cuanto a tipos de suelos, topografía, comunidad vegetal, así como tratamientos respecto a manejo de la carga, control de especies subarborescentes con aplicación de herbicida con máquina de alfombra o pasada de rieles. Asimismo, hay situaciones donde se realizaron intervenciones con agregado de fertilizantes.

Las vegetaciones observadas se asemejan a lo descrito por Lezama et al. (2019). En lo definido como suelo superficial se asemeja a las descripciones del tipo B-I y B-II, luego el suelo medio presentaba zonas de tipo B-II y B-III, y suelo profundo al tipo B-III. En cuanto al suelo medio fertilizado, además presentaba una mayor frecuencia de gramíneas invernales productivas como *Bromus auleticus*, *Poa lanigera* y *Stipa neesiana*, constatando lo descrito por Berretta et al. (1998b), Boggiano et al. (2006), como respuesta a la fertilización nitrogenada en otoño e invierno.

Cuadro No. 6. Características de los sitios donde se recabaron los datos de crecimiento

Sitio	No. de jaulas	Unidad CONEAT	Tipo de campo	Observaciones
22	2	12.11	Sp	
26 a	2	12.11	Sp	
35	2	1.23	Ss	
37	3	1.10b	Sm	
38	3	1.10b	Sm	
39	3	1.10b	Sm	
43	3	S.09.11	Sp	
46 tes	6	1.10b	Sm	
46 tra	6	1.10b	Sm	Fertilización NP

Sp = suelo profundo; Ss = suelo superficial; Sm = suelo medio; tes = testigo sin fertilización; tra = tratamiento de fertilización anual con 15 unidades de P. ha⁻¹ y 100 unidades de N. ha⁻¹ durante once años; No. de jaulas indica la cantidad de jaulas instaladas en cada sitio.

Todas las jaulas fueron georreferenciadas, en el área dentro del cual se movilizaban anualmente luego de los sucesivos cortes.



Figura No. 11. Mapa de potreros de EEFA S., con resaltado de los sitios estudiados y georreferenciación de sus respectivas jaulas de exclusión con grupos de suelos CONEAT

La información de los sitios se agrupó utilizando la herramienta del análisis clusters. El análisis cluster, conocido como análisis de conglomerados, es una técnica estadística multivariante que busca agrupar elementos (o variables) tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos.

En el análisis de clusters, se utilizó la semejanza entre la variable PPNA, promedio estacional individual por jaula y se categorizaron mediante una clasificación asociativa (vecino más próximo) con el programa InfoStat Student (versión 2017, Universidad Nacional de Córdoba. Grupo Infostat, Córdoba, República Argentina).

Como producto de dicho análisis de clusters se asoció la información en cuatro categorías de agrupamiento de sitios: Ss (suelos superficiales), Sm (suelos medios), Sm F (suelos medios fertilizados) y Sp (suelos profundos), las cuales se presentan en el Cuadro No. 7. Se generaron cuatro grupos debido a que se logró agrupar las tasas de crecimiento diario promedio estacionales de las jaulas correspondientes a distintos tipos de suelos según MAP. CONEAT (1979) y, como en el caso de los suelos medios fertilizados, el agregado de fertilizante.

Para cada grupo se utilizó el set de datos de crecimiento medido en las jaulas de exclusión para obtener los valores de EUR, despejada a partir de su PPNA, medida por cortes de jaulas y los valores de RFAA. Fueron seleccionadas jaulas al azar entre 30-50% dependiendo del tamaño de cada grupo mediante la función aleatorio de Microsoft Excel (Microsoft Office Professional Edition 2019, Microsoft Corp., Redmond, WA, USA) para realizar calibraciones del modelo de estimación de PPNA, a las que se las llama como jaulas testigo. Los valores de EUR, calculados a partir del set de jaulas tomadas como testigo fueron utilizados para estimar la PPNA en otro set de jaulas agrupadas con igual criterio. Se utilizaron EUR únicas o variable estacionalmente para realizar las estimaciones.

Posteriormente, se comparó la PPNA medida y la PPNA estimada a partir del uso de EUR única o variable con diferentes pruebas de bondad de ajuste y análisis estadísticos de algunos de dichos ajustes (Montoya, 2013).

Cuadro No. 7. Resumen del set de datos utilizados a partir de la clasificación de los cluster

Sitio	Años	Estaciones	Tipo de suelo	N° Jaulas
35	8	4	Ss	2
22-26a-43	8	4	Sp	7
37-38-39-46 tes	6 y 8	4	Sm	15
46 tra	8	4	Sm F	6

Tra = fertilizado; tes = testigo; Ss = suelo superficial; Sm = suelo de profundidad media; Sm F = suelo de profundidad media fertilizado; Sp = suelo profundo.

3.4 OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES Y DATOS METEOROLÓGICOS

A partir de esos puntos georreferenciados se generaron polígonos de 10 x 10 metros (tamaño de píxel Sentinel-2) para contemplar a la zona en donde fue ubicada la jaula de exclusión a lo largo de los sucesivos cortes. La información extraída de sensores remotos fue individual, para tener una mayor captación de variabilidad espacial.

Se utilizó el modelo propuesto por Monteith (1972) y a partir de datos provistos por sensores remotos (Ruimy et al., 1994), se estimó la PPNA de cada polígono con vegetación herbácea con una resolución de 30 m:

$$PPNA [(kg MS) / (ha. día^{-1})] = RFAi [MJ / (ha. día^{-1})]. fRFAA EUR (kgMS. MJ^{-1})$$

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

Las estimaciones de productividad primaria neta aérea (PPNA) y de radiación fotosintéticamente activa absorbida por los tejidos verdes (RFAA) se obtuvieron siguiendo el protocolo presentado por Oyarzabal et al. (2011) y por Baeza et al. (2011b). La estimación de Eficiencia de Uso de la Radiación (EUR) se realizó para cada estación y corresponde al cociente $PPNA/RFAA$ (Paruelo et al., 2019).

Para estimar la fracción fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación ($fRFA_i$), en donde RFA es la radiación fotosintéticamente activa (entre 400 y 700 nm de long. de onda) que es equivalente aproximadamente al 50% de la radiación global para una latitud dada y $fRFA$ es la fracción de la RFA que es interceptada y absorbida por los tejidos vegetales, se usó un modelo de interpolación lineal (Ruimy et al., 1994), para los valores de IVN que fueron transformados a $fRFA$

$$(fRFA = -0,025 + 1,25 \times IVN)$$

El IVN, fue calculado a partir de la reflectancia en las porciones del espectro electromagnético correspondiente al rojo e infrarrojo ($IVN = (IR-R) / (IR+ R)$).

Se utilizaron 84 imágenes del sensor OLI (Operational Land Imager) a bordo del satélite Landsat-8, de las bandas 5 (IR.) y 4 (R.). Las imágenes utilizadas fueron descargadas desde Earth Explorer USGS con proceso de corrección atmosférica y usándose únicamente aquellos píxeles sin nubes o sombras y con bajos niveles de aerosoles en la atmósfera. Los análisis de imágenes y operaciones en Sistema de Información Geográfica (SIG), fueron llevados a cabo con ARCMAP-ARCGIS 10.4.1 (ESRI, Redlands, CA, US).

El periodo de descarga de datos abarco desde el 1 de marzo de 2013 hasta el 1 marzo de 2021. A partir de las imágenes de Landsat-8 se calculó el IVN y luego se extrajeron los valores de los píxeles donde se encontraban georreferenciadas individualmente las jaulas de cada sitio, utilizando el valor de un píxel con el fin de obtener datos más precisos de IVN, del lugar. En algún caso el polígono llego a abarcar dos o más píxeles, tomándose el valor promedio de los mismos. Este sensor tiene una resolución temporal de 16 días, con una resolución espacial de 30 x 30 metros.

Por otra parte, para Sentinel-2 el período de descarga de datos abarco desde el 25 de diciembre del 2018 hasta el 29 de diciembre del 2020. Sentinel posee una resolución temporal de 5 días, con una resolución espacial de 10 x 10 metros. Durante ese período se utilizaron 88 imágenes de los sensores a bordo de los satélites Sentinel-2A y 2B. Las imágenes utilizadas fueron descargadas desde Copernicus con proceso de

corrección atmosférica, usándose únicamente aquellos pixeles sin nubes o sombras y con bajos niveles de aerosoles en la atmósfera utilizando las bandas 4 (R) y 8 (IR). La metodología de cálculo y extracción de valores de IVN, así como la descarga y procesamiento de imágenes fue la misma que la utilizada con Landsat-8.

La radiación global fue tomada del banco de datos agroclimáticos de la estación INIA Salto Grande extraídos desde el Portal INIA Gras. De ese valor se consideró que un 50% de la misma, es RFAi (Akmal y Janssen, 2004).

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis de datos fueron utilizados las siguientes técnicas: el análisis de la muestra mediante la estadística descriptiva unidimensional y bidimensional y el análisis de regresión lineal y no lineal. Dichos análisis se realizaron con Microsoft Excel (Microsoft Office Professional Edition 2019, Microsoft Corp., Redmond, WA, USA) y con InfoStat Student (versión 2017, Universidad Nacional de Córdoba. Grupo Infostat, Córdoba, República Argentina). Para la regresión lineal simple entre la EUR, obtenida con Sentinel-2 y Landsat-8 se utilizó el procedimiento REG de SAS (SAS Campus Drive 2009, Cary, North Carolina 27513, USA).

3.5.1 Test de bondad de ajuste del modelo

Dado que se utilizó el modelo propuesto por Monteith (1972), se lo sometió a diferentes test de bondad de ajuste a partir de dos criterios. El primero es la diferencia entre el valor simulado frente al observado, determinándose que un tratamiento está bien simulado cuando la diferencia entre ellos se encuentra en el rango del 10%. Si esto ocurre en al menos el 70% del total de las simulaciones para cada valor de crecimiento (PPNA), puede considerarse que el modelo está calibrado.

El segundo criterio, fue comparar el resultado de los test con los rangos recomendados en cada indicador.

Para iguales sitios y periodos se tomaron valores promedio estacionales de los dos últimos años, obtenidos de cortes de jaulas de exclusión y calculados a partir de imágenes de cámaras montadas en el satélite Landsat-8 y fueron comparados con valores obtenidos a partir de imágenes de cámaras a bordo de los satélites Sentinel 2-A y 2-B. La metodología fue la misma que la presentada anteriormente, modificando la fuente de imágenes utilizada, ya que estas plataformas difieren en resolución espacial y temporal.

El motivo por el cual se compararon solo los dos últimos años fue que la plataforma de sensores de Sentinel-2 quedo operativa a partir de finales de 2018, por lo cual solo esos años fueron posibles de comparar con datos de Landsat.

También se tomaron valores promedio estacionales desde el otoño 2013 hasta el verano 2021, calculados a partir de imágenes de cámaras a bordo de Landsat-8 con la misma metodología, siendo comparados con los obtenidos a partir de cortes en jaulas de exclusión.

3.5.1.1 Coeficiente de determinación (R^2)

Es definido como el valor cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson. Puede ser interpretado como la magnitud de la varianza del modelo comparado con la varianza total observada. El rango de valores que puede tomar se encuentra entre 0 y 1. Cuando R^2 se aproxima a 1 indica una buena agregación de los resultados del modelo con los datos observados y, normalmente, valores por encima de 0,5 son considerados aceptables.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)(S_i - MS)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - MO)^2 \sum_{i=1}^n (S_i - MS)^2}} \right]^2$$

Dónde: R^2 es coeficiente de determinación; S es valores simulados en cada uno de los casos de estudio; O es valores observados en cada uno de los n caso de estudio; MO es el valor medio de los n valores observados; MS es el valor medio de los n valores simulados; n. número de observaciones.

La desventaja de este coeficiente es que solo se cuantifica la dispersión, es decir, que un modelo que sistemáticamente sobrestime o subestime las observaciones puede tener un buen valor de R^2 (Raes et al., 2009).

3.5.1.2 Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)

Es uno de los indicadores estadísticos más ampliamente utilizados (Jacovides y Kontoyiannis, 1995). Esta variable tiene como ventaja medir la magnitud media de la diferencia entre los valores observados y los simulados en las mismas unidades, aplicándose para evaluar el rendimiento del modelo. Toma valores desde 0 a $+\infty$, siendo mejor el ajuste cuanto más cercano al 0. No diferencia entre sobrestimaciones y subestimaciones.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}$$

Donde RMSE es raíz del error cuadrático medio; Si es valores simulados; Oi es valores observados; n es número de observaciones.

Se establece como límite aceptable un resultado que alcance valores del $\pm 20\%$ respecto a la media.

3.5.1.3 Raíz del Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE)

Debido a que la RMSE, se expresa en unidades de la variable en cuestión, esto no permite que el modelo sea comprobado para un amplio rango de condiciones ambientales (Jacovides y Kontoyiannis, 1995). Es por esa razón que la RMSE puede ser normalizada usando el valor medio de la variable observada. NRMSE, es expresada como %, indicando la diferencia relativa entre datos obtenidos por el modelo y las observaciones.

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2} \cdot 100$$

Donde NRMSE es raíz del error cuadrático medio normalizado; \bar{O} es media de los datos observados; Si es valor simulado; Oi es valores observados; n es número de observaciones.

Cuando NRMSE, es inferior al 10% puede considerarse como excelente, si se encuentra entre 10 y 20% buena, aceptable de 20 a 30% y mala si supera al último valor (Raes et al., 2009).

3.5.1.4 Eficiencia del Modelo de Nash-Sutcliffe (EF)

Determina la magnitud relativa de la varianza de los residuos comparado con la varianza de los valores observados (Nash y Sutcliffe, 1970). Otra forma de ver el estadístico es analizar que tan bien se ajusta los datos observados frente a los simulados en la línea 1:1. Es una medida de robustez del modelo y cuyo rango es de $-\infty$ a 1. Valores de EF, de 1 indica una coincidencia perfecta, valores de EF, de 0 indican que las predicciones del modelo son tan próximas como el valor medio observado y valores de EF, negativos ocurren cuando la media de las observaciones tiene una mejor predicción de lo que resulta el modelo (Raes et al., 2009).

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Oi - MO)^2}$$

Donde: EF es eficiencia del modelo; Si es valores simulados; Oi es valores observados; MO es valor medio de los n valores observados; n es número de observaciones.

EF al igual que ocurre con el R², no es muy sensible a las sobrestimaciones o subestimaciones del modelo. El criterio utilizado para este indicador es que se obtengan valores que superen al 0.

3.5.1.5 Desviación Media (DM)

Aporta al análisis de si las predicciones del modelo tienden a sobrestimar o subestimar los datos observados. Las unidades de medida son las mismas que la variable en estudio. Cuanto más se aproxima a 0, los resultados ajustan mejor a la realidad.

$$DM = \frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)}{n}$$

Al igual que el RMSE, en este estadístico se impone el mismo criterio indicando con un límite superior del $\pm 20\%$.

3.5.1.6 Índice de agregación de Willmott o estadístico “d”

Representa la relación existente entre el error cuadrático medio y el error potencial (Willmott, 1982). El rango se encuentra entre 0 y 1, 0 indica que no se tiene ajuste alguno, siendo 1 un ajuste perfecto entre lo observado y lo predicho por el modelo.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (|Si - MO| + |Oi - MO|)^2}$$

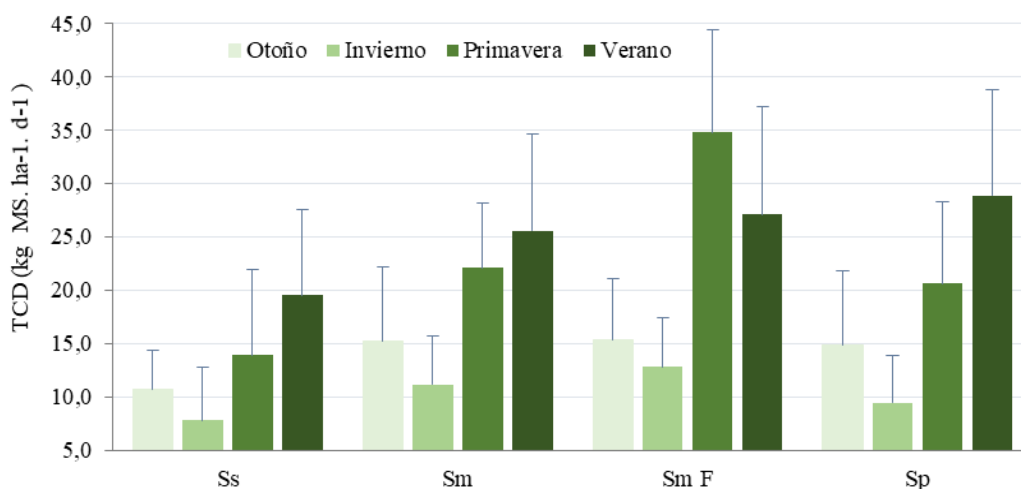
Donde: d es índice de agregación de Willmott; Si es valores simulados; Oi es valores observados; MO es valor medio de los n valores observados; n es número de observaciones.

La desventaja que ofrece este estadístico es que se pueden obtener valores relativamente altos (sobre 0,65) incluso cuando la robustez del modelo es pobre. Así mismo, este estadístico no es muy sensible a sobrestimaciones o subestimaciones sistémicas (Kruse et al., 2005).

4 RESULTADOS

4.1 PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA AÉREA (PPNA)

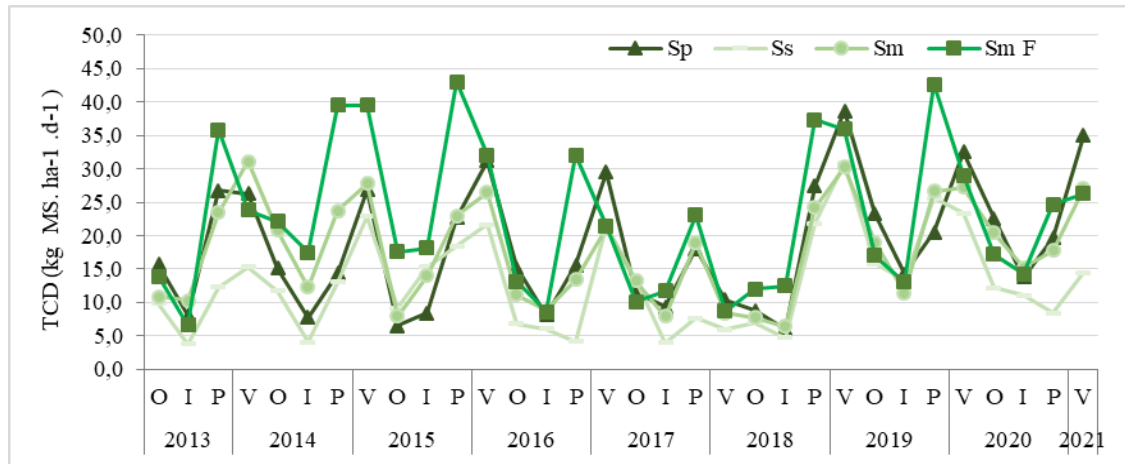
La PPNA, fue variable entre estaciones (Figura No. 12). En otoño-invierno el crecimiento fue menor, mientras que para primavera-verano se alcanzaron los valores máximos de crecimiento anuales. El verano fue la estación con mayores valores de crecimiento promedio para todos los sitios, con la excepción de los sitios en que se agregó tratamiento con fertilización nitrógeno-fosfatada.



Ss es suelo superficial; Sm es suelo de profundidad media; Sm F es suelo de profundidad media fertilizado; Sp es suelo profundo. Barras indican desvíos estándar.

Figura No. 12. Tasa de crecimiento diario observada (TCD) en cada estación para cada sitio estudiado

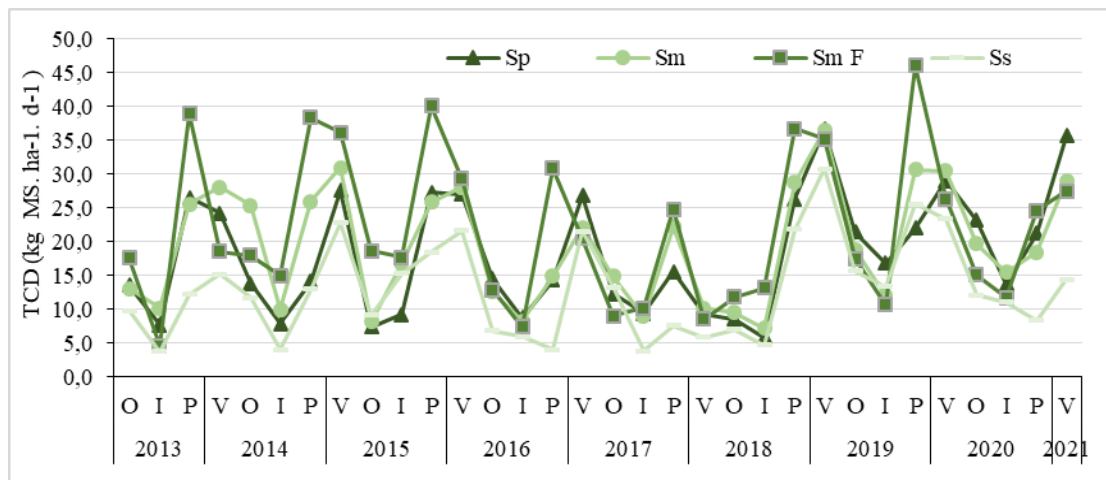
Se puede visualizar, que el comportamiento de las tasas de crecimiento en todo el set de datos (Figura No. 13) es muy similar a las observadas en aquellas que se utilizaron como testigo en la estimación propuesta (Figura No. 14).



Ss es suelo superficial; Sm es suelo de profundidad media; Sm F es suelo de profundidad media fertilizado; Sp es suelo profundo, O es otoño, I es invierno, P es primavera, V es verano.

Figura No. 13. Evolución de la tasa de crecimiento diario estacional observada (TCD) de en cada sitio, durante la serie histórica 2013-2021

Durante la serie histórica de datos utilizados, existió un período que inicia en otoño 2017 hasta el invierno 2018, en el que las tasas de crecimientos fueron bajas, notándose que, en la primavera, aunque existió un aumento en la tasa de crecimiento, el máximo fue de 26 kg MS.ha⁻¹.d⁻¹ (46 tratamiento), valor que es inferior al registrado en dicha estación en el resto de los años. Durante ese período ocurrió un déficit hídrico que se inició desde mediados de la primavera 2017 y persistió hasta fines del verano 2018.

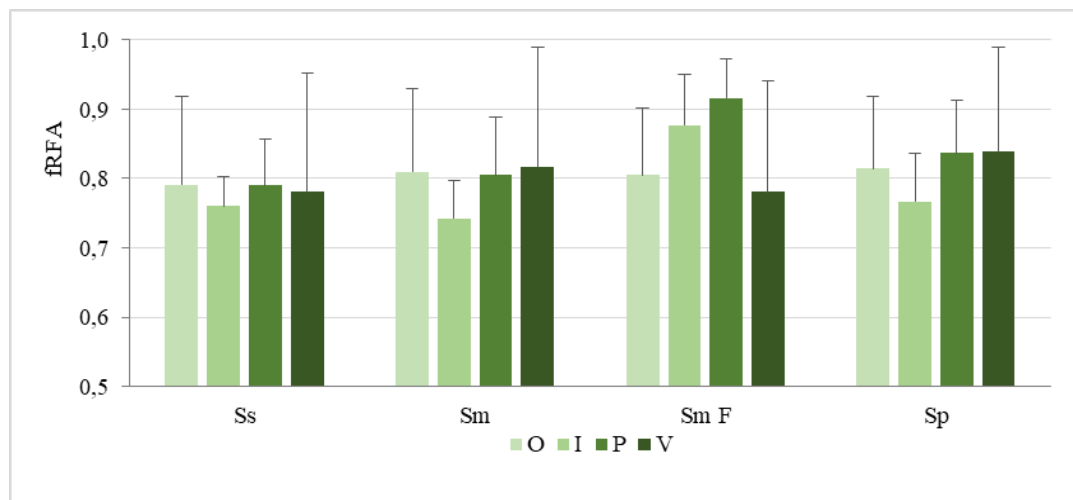


Ss es suelo superficial; Sm es suelo de profundidad media; Sm F es suelo de profundidad media fertilizado; Sp es suelo profundo, O es otoño, I es invierno, P es primavera, V es verano.

Figura No. 14. Evolución de la tasa de crecimiento diario estacional observada (TCD) de las jaulas utilizadas como testigos, durante la serie histórica 2013-2021

4.2 FRACCIÓN INTERCEPTADA DE LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA

La fracción interceptada de la radiación fotosintéticamente activa es variable entre estaciones y entre sitios (Figura No.15). En el sitio Sm F la vegetación no solo logró interceptar una mayor proporción de la cantidad de energía disponible para producir biomasa, sino que alcanzó niveles cercanos a la saturación en invierno y primavera. En particular en invierno, para el resto de los sitios, el comportamiento estacional fue similar, con valores de intercepción mínimos anuales.

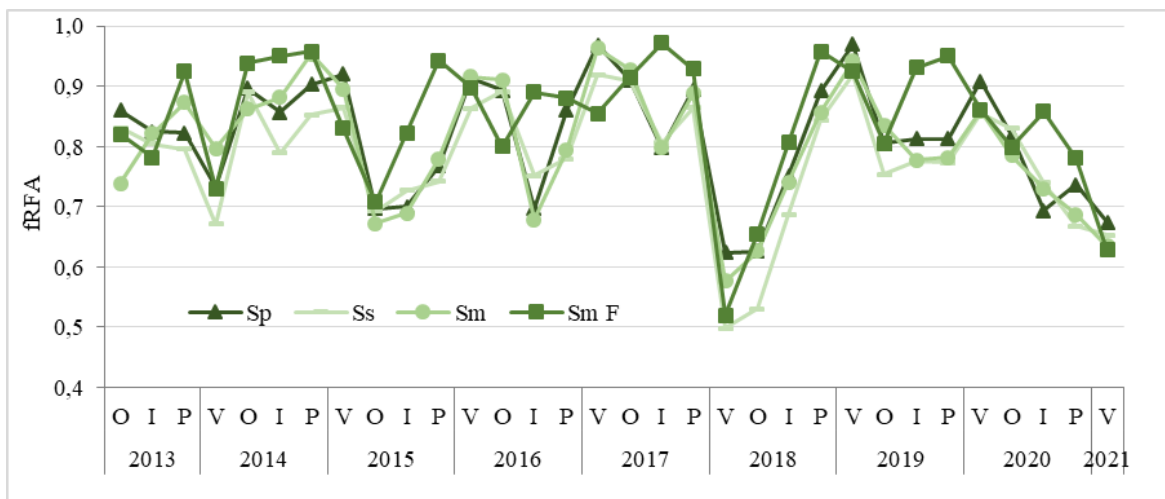


Ss es suelo superficial; Sm es suelo de profundidad media; Sm F es suelo de profundidad media fertilizado; Sp es suelo profundo, O es otoño, I es invierno, P es primavera, V es verano. Barras indican desvío estándar.

Figura No. 15. Fracción interceptada de la Radiación Fotosintéticamente Activa (fRFA) para cada estación de los sitios estudiados, a partir de datos provistos por los sensores de Landsat-8

La variabilidad entre sitios es menor que la registrada en las tasas de crecimiento diario (Figura No. 16). Sin embargo, pueden notarse diferencias en el comportamiento estacional de la reflectancia entre sitios. Se pueden establecer tres períodos dentro de la serie histórica. El primero es hasta la primavera 2017. Hasta ese momento, la fRFA, varió en un rango de 0,65 a 0,95. Lo ocurrido durante la primavera-verano del 2017-2018, genera una baja importante en la fRFA, en el verano 2018, logrando valores de 0,5. Aquí se establece un segundo período, en el que paulatinamente para todos los sitios la fRFA, aumenta hasta el verano 2019. Por último, el tercer

período, que se inicia en el otoño 2019, a partir del cual, existe una tendencia a la baja en valores de esta variable.

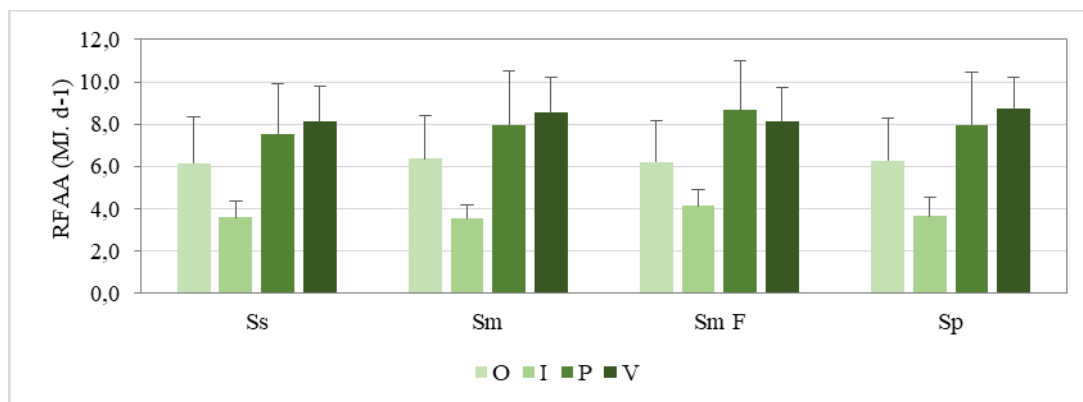


Ss es suelo superficial; Sm es suelo de profundidad media; Sm F es suelo de profundidad media fertilizado; Sp es suelo profundo, O es otoño, I es invierno, P es primavera, V es verano.

Figura No. 16. Evolución de la fracción interceptada de la Radiación Fotosintéticamente Activa (fRFA) en cada estación en los sitios durante la serie histórica (2013-2021)

4.3 RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA ABSORBIDA

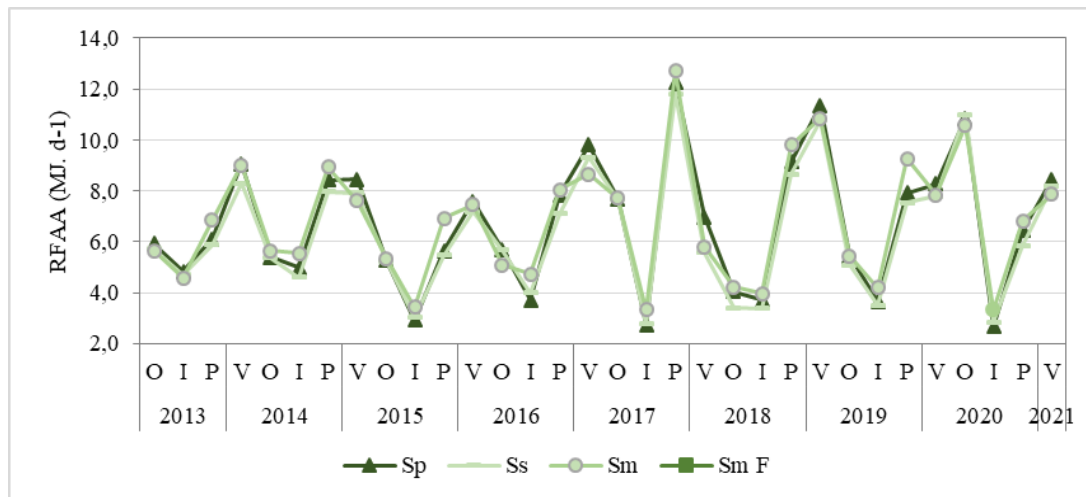
Es en las estaciones de primavera y verano donde hay un mayor potencial productivo para los distintos sitios, siendo invierno, la estación más limitante en este parámetro debido a la menor radiación incidente (Figura No. 18).



Ss es suelo superficial; Sm es suelo de profundidad media; Sm F es suelo de profundidad media fertilizado; Sp es suelo profundo, O es otoño, I es invierno, P es primavera, V es verano. Barras indican desvío estándar.

Figura No. 17. Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) diaria a nivel estacional obtenida a partir de datos provistos por Landsat-8 de los sitios estudiados

En el caso de esta variable, es destacable su baja variabilidad entre sitios, obteniendo valores máximos en verano, y mínimos en invierno (Figura No. 18). Sin embargo, existen excepciones. La misma ocurre en el caso que se inicia en los valores máximos registrados en primavera 2017 hasta los mínimos registrados de este indicador, en verano 2018, indica un comportamiento entre ambiente (RFAi) y vegetación (fRFA) muy particular considerando que fue de manera inversa respecto al resto de los años. La baja nubosidad de la primavera 2017, por ende, la alta RFAi, durante ese periodo fue interceptada por una vegetación que al inicio estaba en una buena condición fotosintetizante. Posteriormente en el verano, la vegetación probablemente se encontraba en su mayoría senescente, producto del déficit hídrico, lo que determina una disminución en la disponibilidad de forraje. Estos factores incidieron en conjunto para que ocurriera una magnitud en ese momento que ronda los 6 MJ.d⁻¹.

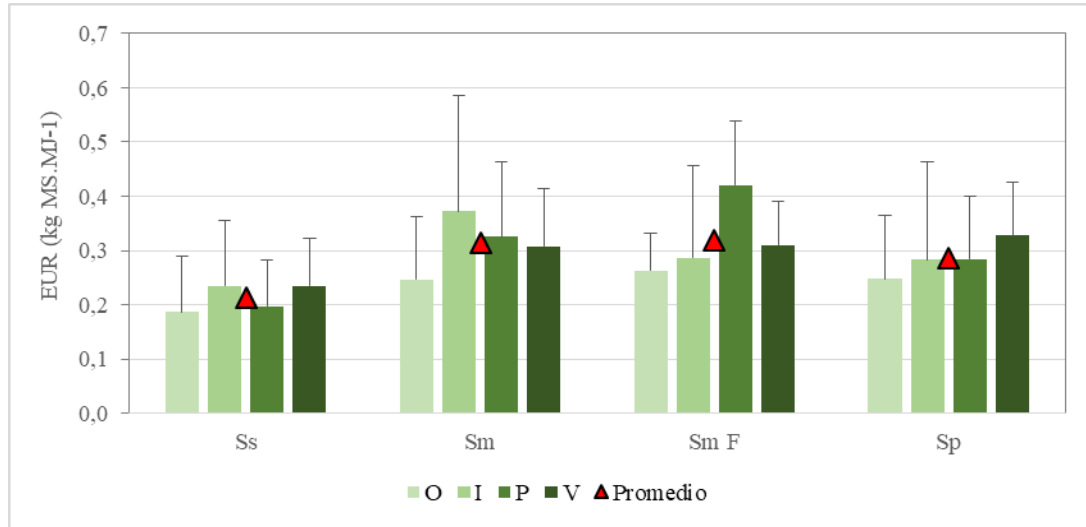


Ss es suelo superficial; Sm es suelo de profundidad media; Sm F es suelo de profundidad media fertilizado; Sp es suelo profundo, O es otoño, I es invierno, P es primavera, V es verano.

Figura No. 18. Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida (RFAA) diaria a nivel estacional de los sitios durante la serie histórica (2013-2021)

4.4 EFICIENCIA DEL USO DE LA RADIACIÓN

La EUR, presentó valores mínimos promedios diarios entre las estaciones en otoño y entre sitios en Ss. Además, el valor máximo promedio diario estacional se generó en primavera solo en Sm F, mientras que en el resto de los sitios ocurre en otras estaciones. Cabe destacar, en general existe una gran variabilidad en la EUR



Ss es suelo superficial; Sm es suelo de profundidad media; Sm F es suelo de profundidad media fertilizado; Sp es suelo profundo, O es otoño, I es invierno, P es primavera, V es verano. Barras indican desvío estándar en relación al promedio.

Figura No. 19. EUR estimada a partir de datos provistos por Landsat de los sitios estudiados

4.5 PPNA ANUAL ESTIMADA UTILIZANDO EUR ÚNICA PARA TODO EL AÑO Y VARIABLE PARA CADA ESTACIÓN

Se compararon la PPNA estimada a partir de imágenes provistas por la plataforma Landsat-8 con la PPNA real (información generada a partir de los datos de cortes de jaulas de exclusión). El coeficiente de determinación (R^2) de la regresión entre valores de PPNA anual ($\text{kg MS}\cdot\text{ha}^{-1}$) estimados y medidos fue de 0,83 y 0,79 a partir de la utilización de EUR variable estacional o única, respectivamente.

De acuerdo con los test realizados se encontró un buen ajuste en los valores de la PPNA estimada comparada con la observada, tanto para estimaciones con EUR única como variables (Figura No. 20).

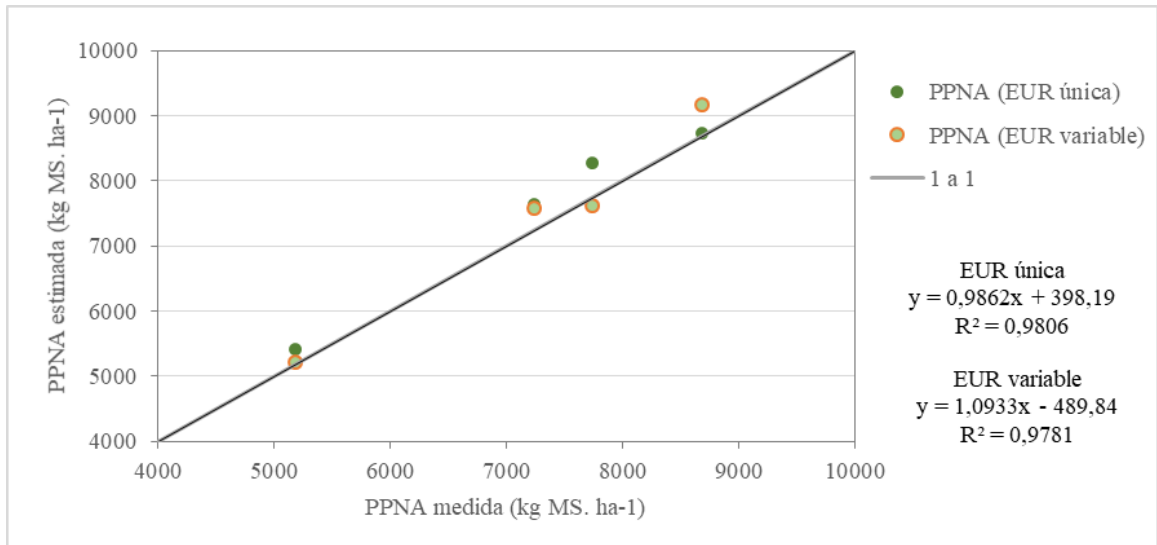
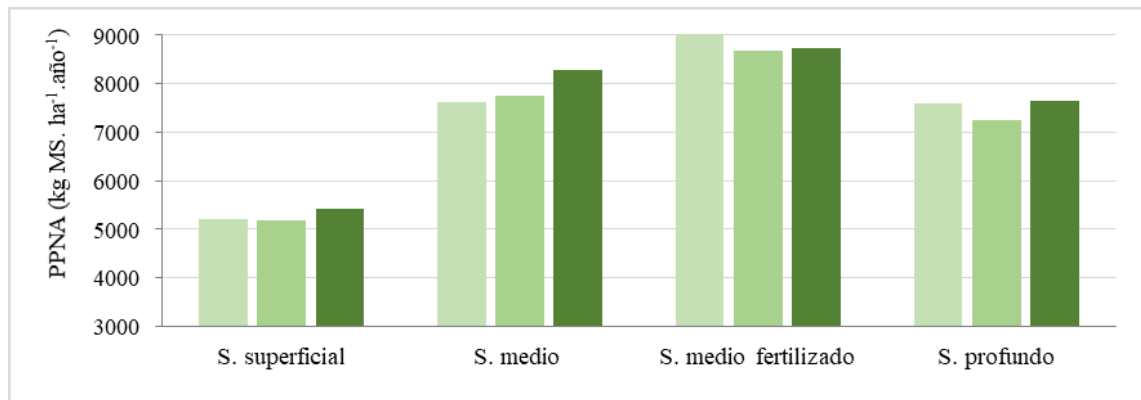


Figura No. 20. Regresión de PPNA anual medida y PPNA anual estimada a partir del uso de EUR única o variable

La PPNA real anual promedio, varió desde 5120 a 9120 kg MS. ha⁻¹, según el tipo de suelo y manejo (sitio). Mientras que la misma osciló de 5715 a 9529 y de 5691 a 9341 kg MS. ha⁻¹, cuando se estimó con EUR, variable y única, respectivamente (Figura No. 21). Las mayores producciones se registraron en los suelos medios fertilizados, y las menores en los suelos superficiales.



Ss es suelo superficial; Sm es suelo de profundidad media; Sm F es suelo de profundidad media fertilizado; Sp es suelo profundo. Barras grises a la izquierda es PPNA medida a partir de EUR variable estacional, barras verde claro al medio es PPNA medida, barras verdes a la derecha es PPNA estimada a partir de EUR única.

Figura No. 21. PPNA anual real y estimada a partir de EUR estacional única o variable en los sitios estudiados

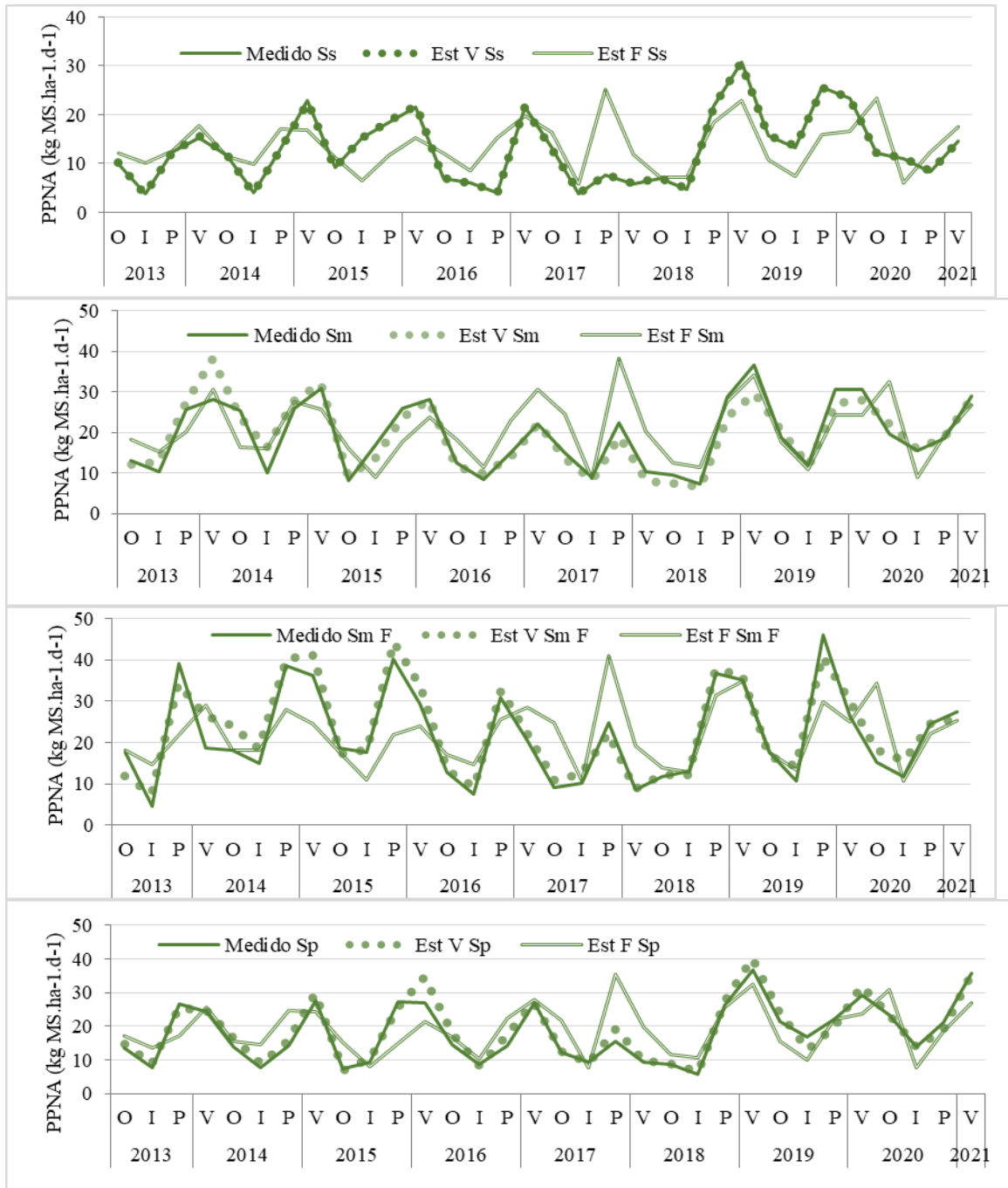
Además, se realizaron regresiones de ajustes lineales a nivel estacional para conocer la variabilidad intra-anual en el ajuste del modelo (Cuadro No. 8), ya que no se encontraron diferencias en las dos estimaciones anuales entre la utilización de EUR única y variable para los valores estimados y los valores medidos (Figura No. 20). La estimación por estación demuestra mejores ajustes al utilizar EUR variables por estación (Cuadro No. 8).

Los coeficientes de determinación entre valores de PPNA estacional estimados utilizando EUR variable y valores de PPNA estacional reales variaron entre un mínimo de 0,62 a un máximo de 0,94 (Cuadro No. 8). El ajuste resultó en mayores valores utilizando EUR variable en las mediciones en los suelos medios, medios fertilizados y profundos y con menor magnitud en suelos superficiales. También se realizaron análisis de regresión entre valores de PPNA estacional estimados utilizando EUR única y valores de PPNA reales. El rango de coeficientes de determinación osciló entre valores mínimo y máximo 0,23 y 0,46, respectivamente, por lo que no se lograron valores mínimos aceptables.

Cuadro No. 8. Coeficiente de determinación (R^2) de valores estimados y medidos, utilizando EUR variable y única para cada uno de los sitios estudiados

Tipo de suelo	EUR	R^2
Ss	V	0,622
	U	0,228
Sp	V	0,947
	U	0,402
Sm	V	0,871
	U	0,462
Sm F	V	0,923
	U	0,337

Ss es suelos superficiales; Sm es suelos medios; Sm F es suelos medios fertilizados; Sp es suelos profundos; EUR es eficiencia del uso de la radiación; V es variable por estación; U es única anual.



Medido es datos medidos con cortes de jaulas.; Est V es datos estimados a partir de EUR variable; Est F es datos estimados a partir de EUR única; O es otoño; I es invierno; P es primavera; V es verano.

Figura No. 22. Evolución de la PPNA diaria promedio estacional para suelos superficiales (Ss), medios (Sm), medios fertilizados (Sm F) y profundos (Sp) con datos

medidos a partir de cortes de jaulas y con datos estimados utilizando EUR única anual y variable por estación

En la Figura No. 22 se muestra que para todos los tipos de suelos, la estimación de la PPNA a partir de EUR única anual (línea doble) no acompaña la PPNA medida (línea continua) a lo largo de las estaciones, dando como resultados valores de PPNA superiores e inferiores. Por otra parte, la estimación de la PPNA a partir del uso de EUR variable estacional (línea de puntos), acompaña a la PPNA medida (línea continua), con el mismo patrón de crecimiento estacional.

4.6 AJUSTE DEL MODELO CON USO DE LA EUR ÚNICA O VARIABLE

Las tasas de crecimiento diarias promedio anual para los cuatro agrupamientos de sitios determinadas a partir de cortes (real) y estimadas con la utilización de una EUR única o variable se presentan en el Cuadro No. 9. Cabe destacar, que las tasas estacionales de crecimiento diario, utilizando una EUR tanto única como variable, presentaron valores similares. Sin embargo, la variabilidad es mayor al utilizar una EUR variable.

Cuadro No. 9. Tasas de crecimiento diario, desvíos estándar y coeficientes de variación de los distintos agrupamientos utilizando EUR variable, única o a partir de datos reales

	EUR	n	TCD	Desvío estandar	C.V.
		-	kg MS. ha ⁻¹ . d ⁻¹	kg MS. ha ⁻¹ . d ⁻¹	%
Sp	real	32	18,09	8,75	48,37
	variable	32	18,96	9,28	48,95
	única	32	19,09	7,44	38,97
Sm	real	32	19,36	8,52	44,01
	variable	32	19,07	8,44	44,26
	única	32	20,67	7,87	38,07
SmF	real	32	21,7	11,29	52,03
	variable	32	22,91	11,07	48,32
	única	32	21,83	7,68	35,18
Ss	real	32	12,97	7,53	58,06
	variable	32	13,02	7,57	58,14
	única	32	13,53	5,16	38,14

Ss es suelos superficiales; Sm es suelos medios; Sm F es suelos medios fertilizados; Sp es suelos profundos; EUR es eficiencia del uso de la radiación, real es datos extraídos de TCD de cortes en jaulas de exclusión.

En el Cuadro No. 10 se demuestra, para todos los test de bondad de ajuste realizado, que en los indicadores calculados existe una superioridad en el ajuste del modelo, cuando se utiliza una EUR variable entre estaciones, respecto a usar un valor único estacional.

Cuadro No. 10. Pruebas de bondad de ajuste del modelo en suelos superficiales, suelos medios con y sin el agregado de fertilización y profundos con uso de EUR anual única y variable

	EUR	R ²	RMSE	NMRSE	Nash "EF"	Willmott "d"
	-	-	kg MS. ha ⁻¹ . d ⁻¹	%	-	-
Sp	variable	0,95	0,31	1,73	0,93	0,99
	única	0,40	0,63	3,48	0,34	0,94
Sm	variable	0,87	0,35	1,82	0,87	0,98
	única	0,46	0,59	3,05	0,38	0,95
SmF	variable	0,92	0,39	1,82	0,91	0,98
	única	0,34	0,64	2,96	0,33	0,93
Ss	variable	1,00	0,10	0,75	1,00	1,00
	única	0,26	0,75	5,79	0,21	0,87

Sp es suelo profundo; Sm es suelo medio; Sm F es suelo medio fertilizado; Ss es suelo superficial.

4.7 CORRELACIÓN DE VALORES DE EUR OBTENIDOS CON SENTINEL-2 Y LANDSAT-8

La estimación de EUR, con ambos satélites presento un ajuste medido a partir del coeficiente de determinación (R²), de 0,92 (Figura No. 23). Debe mencionarse que los dos valores alejados del ajuste se debieron a que el valor de IVN promedio de esa estación fue medido a partir de un solo valor para Landsat-8, mientras que en Sentinel-2 se lograron promediar cuatro valores (producto de la corrección de calidad de imágenes).

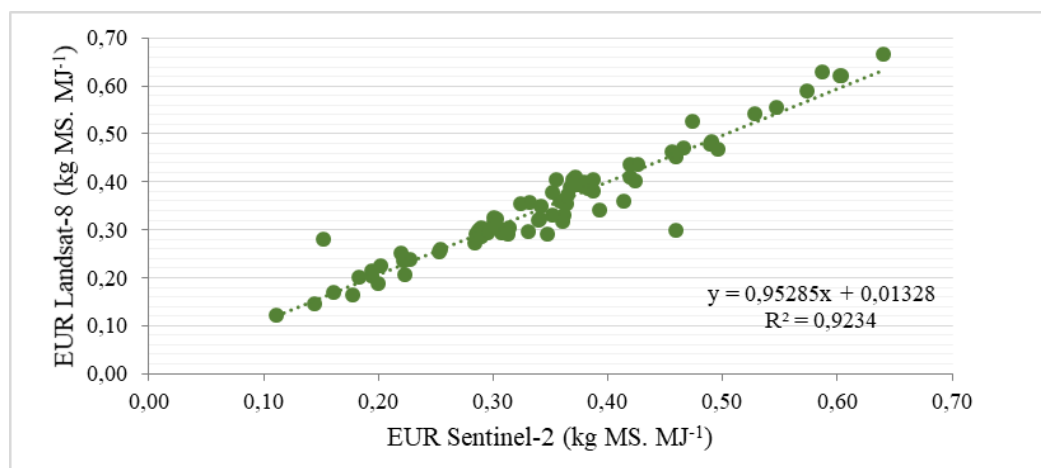


Figura No. 23. Asociación entre EUR estimadas a partir de Sentinel-2 y Landsat-8

La EUR medida entre ambos satélites fue de R^2 0,92 con un valor de $p \leq 0.0001$.

A partir de la EUR promedio de todo el periodo de coincidencia de información de ambos satélites, se estimó la PPNA promedio estacional a lo largo de ese período. A continuación, en el Cuadro No. 11 se presenta la tasa de crecimiento diaria promedio del periodo, el desvío estándar y el coeficiente de variación.

Cuadro No. 11. Tasas de crecimiento promedio diario, desvíos estándar y coeficientes de variación de datos medidos y resultantes a partir de uso de EUR estimada con Sentinel-2 y Landsat-8

Satélite	n	TCD	Desvío estándar	C.V.
	-	kg MS. ha ⁻¹ . d ⁻¹	kg MS. ha ⁻¹ . d ⁻¹	%
Sentinel-2	81	22,92	8,26	36,05
Landsat-8	81	22,88	8,26	36,09
medido	81	22,70	8,29	36,53

n es número de datos, TCD es tasa de crecimiento promedio diaria, C.V. es coeficiente de variación.

Se realizaron los distintos test de bondad de ajuste del modelo entre los datos medidos y los resultantes a partir del uso de EUR, proveniente de los dos satélites (Cuadro No. 12), observando que para ambos satélites todos los indicadores obtuvieron valores excelentes, existiendo en el caso de Sentinel-2 coincidencia perfecta en tres de los cinco indicadores evaluados.

Cuadro No. 12. Pruebas de bondad de ajuste del modelo de datos medidos y resultantes a partir del uso de EUR estimada con Sentinel-2 o Landsat-8

Satélite	R ²	RMSE	NMRSE	Nash "EF"	Willmott "d"
	-	kg MS. ha ⁻¹ . d ⁻¹	%	-	-
Sentinel-2	1,00	0,09	0,41	1,00	1,00
Landsat-8	0,96	0,15	0,64	0,96	1,00

5 DISCUSIÓN

5.1 LA EUR PODRÍA SER VARIABLE SEGÚN LA ESTACIÓN DEL AÑO Y SITIO

La EUR, posee una importante variabilidad, producto de una gran cantidad de factores, entre ellos: tipos de especies, grupos funcionales, estado fenológico, la temperatura y disponibilidad de agua y nutrientes (Ruimy et al. 1994, Joel et al. 1997, Moreau et al. 2003, Turner et al. 2003, Piñeiro et al. 2006), así como la modificación generada por la defoliación en la estructura y composición florística de la vegetación (Oosterheld et al., 1992). Por ende, es de esperar que la EUR estacional de distintos sitios posea una suficiente variabilidad como para contemplarla en los modelos de estimación de la PPNA

Según los resultados obtenidos la PPNA, anual promedio de un sitio puede estimarse utilizando una EUR única con ajustes muy buenos (Figura No. 20). Sin embargo, cuando se estimó estacionalmente en un período de ocho años, existen momentos en los que la estimación con EUR única no acompaña al patrón de crecimiento estacional medida a partir de cortes de jaulas, como sí se observa en estimaciones a partir del uso de EUR variables (Figura No. 22). Soca et al. (2011), en pasturas naturales del Cristalino realizaron para un año la estimación de PPNA mensual (comparado con estimación a partir de corte de jaula) observando que, al utilizar una EUR única, aunque el patrón estacional de producción resultó similar entre ambas formas de estimación, la magnitud de la PPNA total resultó superior a la estimada por cortes de jaula. Además, encontraron una similar tendencia cuando se comparó con información de más años (2000-2007).

Cuando se comparó con la información de crecimiento obtenida en las jaulas seleccionadas de los cuatro sitios de estudio la PPNA estimada diaria promedio con EUR única se sub y sobreestimó la PPNA. Por otra parte, el desvío estándar siempre fue inferior en comparación a la PPNA medida y la estimada a partir del uso de EUR variable, lo que estaría indicando que el modelo con este tipo de EUR pierde variabilidad. Como era de esperar, además, los indicadores de los test de bondad de ajuste del modelo registran superioridad con el uso de la EUR variable en todos los sitios, en relación al uso de EUR única.

Si se quisiera utilizar el modelo en otras regiones del país, debe ser tomada en cuenta las características del sitio, aunque sí podrían ser utilizadas como referencia las EUR presentadas en este trabajo.

5.2 EL MODELO PROPUESTO POR MONTEITH PUEDE SER UTILIZADO PARA LA ESTIMACIÓN DE PPNA DE DISTINTOS SITIOS

Oyarzabal et al. (2011), estimaron la EUR en pastizales naturales del Basalto en tres sitios con distintas características edáficas y comunidades dominantes, registrando que las diferencias entre sitios observadas en PPNA fueron evidentes también en la EUR, y que existió una relación positiva entre la profundidad del suelo (o disponibilidad hídrica) y la magnitud de la EUR.

En los resultados de esta tesis, al comparar la PPNA anual de los cuatro sitios (Figura No. 12) se observa una inferioridad de los suelos superficiales frente a los de mayor profundidad, desde 37% (Sm) al 74% (SmF). Estacionalmente ocurre una situación muy similar. Estas diferencias se evidenciaron también en la EUR obtenida en los suelos superficiales, que registró valores sensiblemente menores, tanto en promedio anual como estacionales, a la del resto de los sitios. Como era de esperar los suelos de mayor profundidad y disponibilidad hídrica, presentaron valores superiores de EUR y en la estación de verano, - estación en la que existe una mayor probabilidad de déficit hídrico (Bettolli et al., 2010) - indica un gradiente de magnitud de la EUR que se relaciona al tipo de suelo. Esto puede explicarse porque suelos con menor capacidad de almacenaje de agua (Durán 1985, 1998) presenten una situación de déficit hídrico antes en el tiempo que suelos con mayor profundidad (Bettolli et al., 2010), y se genere una senescencia foliar temprana que reduciría la EUR para la producción de nueva biomasa por disminución de uso de fotoasimilados para el crecimiento (Collino et al., 2001). También hay un efecto debido a la composición botánica (más proporción de especies C4 en suelos profundos) que podría generar esas diferencias en EUR (Gosse et al. 1986, Byrd et al. 1992) bajo condiciones de luz solar intensa y elevadas temperaturas.

Por otro lado, en invierno y primavera la mayor PPNA estacional se obtuvo en SmF (Figura No. 12). La EUR en invierno fue mayor en los Sm (y con una gran variabilidad), mientras que en primavera, fue superior en SmF (Figura No. 19). La fRFA en invierno fue mayor en SmF (18% mayor) respecto a los otros sitios, lo que se debe probablemente a un mejor estado de la vegetación (mayor concentración de RUBISCO) y a un crecimiento activo de las especies invernales por el agregado de N Sin embargo, la radiación incidente y la temperatura podrían ser en esta estación los factores limitantes en la producción de forraje (Belanger et al. 1992, Piñeiro et al. 2006, Bettolli et al. 2010). Durante el otoño no existieron diferencias notorias entre sitios en la PPNA, lo que puede explicarse por ser una estación “de transición” en donde comienzan a brotar las especies C3 (invernales) y las C4 (estivales) están en su mayoría florecidas y culminando su ciclo de producción.

En otras regiones del país este modelo podría ser utilizado y generando estimaciones que probablemente tengan una precisión como las presentadas en este trabajo. La fRFA, permite considerar la variabilidad espacio-temporal mejorando la

precisión de la estimación siendo tenida en cuenta por lo menos, en periodos estacionales. En casos de no lograr la estimación de EUR por falta de información de campo, la EUR presentada en este trabajo podría tomarse como referencia para estimar otras regiones aunque probablemente el ajuste no sea tan preciso como con las calibraciones aquí realizadas, se ajustarán muy bien debido a la capacidad de contemplar la variabilidad por imágenes satelitales.

5.3 SE PUEDE ESTIMAR PPNA UTILIZANDO IVN A PARTIR DE IMÁGENES SENTINEL-2 CON IGUAL O MEJOR PRECISIÓN QUE UTILIZANDO IMÁGENES LANDSAT-8

Como se mencionó durante la Revisión Bibliográfica, se sabe que a una menor resolución espacial se logran captar mayores fuentes de variabilidad (Paruelo et al., 2000) y que la plataforma Sentinel-2 brinda beneficios en cuanto a la captación de la heterogeneidad, así como en la posibilidad de obtener una mayor cantidad de datos tanto temporal como espacialmente (Avogadro y Padró, 2019), lo que hace que sea una plataforma muy potente para la estimación de la producción de forraje.

Utilizando datos de EUR, calculados a partir de Landsat-8 y Sentinel-2, se realizó un ajuste estadístico de regresión lineal. Se demostró que el ajuste de regresión (R^2) entre ambas plataformas fue muy alto. Cuando se realizaron selección de imágenes por calidad (teniendo en cuenta nubes, entre otros agentes), para algunas de las estaciones se obtuvieron entre una a dos imágenes de Landsat-8 y probablemente no se haya podido contemplar la variabilidad en el IVN, dentro de esas estaciones en particular. Utilizando la plataforma Sentinel-2 en todas las estaciones se logró trabajar con por lo menos una imagen mensual.

La plataforma Sentinel-2 podría ser utilizada para realizar seguimientos de PPNA en tiempo real con niveles de precisión mayores y en menores lapsos de tiempo que los utilizados con Landsat-8. Paruelo et al. (2000), concluyen que en resoluciones espaciales y temporales como las de imágenes provistas por sensores Landsat se logran captar diferencias entre sitios en la EUR Además, con la ventaja de una ventana de datos de más años que plataformas más modernas como Sentinel que poseen una mayor resolución espacio-temporal. A su vez, los rangos dentro de cada banda entre los sensores de ambas plataformas son compatibles (Cuadro No. 4). Esto permitiría generar coeficientes de EUR, calculados a partir de una serie de imágenes Landsat-8 de varios años y utilizarlos en estimaciones de PPNA con Sentinel-2 o con ambas plataformas.

6 CONCLUSIONES

La PPNA, medida mediante cortes de jaulas fue variable entre estaciones del año, además de obtener diferencias entre tipos de suelos. Para estimar la PPNA de las pasturas naturales mediante el modelo propuesto por Monteith (1972), es recomendable utilizar EUR variable según la estación del año y sitio, y no una EUR única anual, ya que los resultados serán poco precisos y no contemplarán las diferencias existentes entre tipos de suelos y entre las estaciones del año.

La PPNA, estimada con EUR, única sub y sobre estima los datos de crecimiento obtenidos a partir de cortes de jaulas, en particular en momentos críticos como sobreestimar en condiciones de estrés hídrico y cuando se utiliza para estimaciones a nivel estacional o de periodos menores. Sin embargo, cuando es utilizada para estimaciones en periodos anuales el ajuste es similar a cuando se utiliza EUR variable. Además, se nota como la PPNA estimada con EUR variable, ajusta muy bien al crecimiento real viendo como se muestra que acompaña a la curva de PPNA estacional obtenida a partir de cortes de jaulas.

El modelo propuesto por Monteith es recomendado para la estimación de la PPNA, pudiendo utilizarse como una herramienta para conocer el comportamiento de la producción de forraje generada en distintos sitios. Además, posee una gran capacidad de reunir información de varios años y de grandes áreas gracias al uso de imágenes satélites.

Las estimaciones del IVN, a partir de datos provistos de satélites como Sentinel-2 y Landsat-8 son muy precisas. Además, utilizar sensores como Sentinel-2 de los cuales se puede obtener mejor resolución temporal y espacial, le da mayor robustez al modelo para generar seguimiento de la PPNA a lo largo del tiempo.

Los resultados de las estimaciones son similares, aunque con mayor precisión en Sentinel-2, debido a que, para un mismo lapso de tiempo y unidad de superficie, Sentinel-2 brinda una mayor cantidad de datos. Además, dado que las bandas utilizadas para la estimación del IVN de esos satélites son muy similares, se permitiría utilizar en simultáneo ambas plataformas ya que se genera aún más información en un mismo lapso de tiempo y unidad de superficie.

Se debe seguir estudiando el comportamiento de la EUR en pasturas naturales en distintas regiones del país, bajo distintas variables de manejo, ya sea intensidad de pastoreo, agregado de nutrientes y/o especies, así como de diferentes comunidades vegetales que componen el paisaje del campo natural. La EUR presenta una gran variabilidad, y debe ser tenida en cuenta.

Estimar la PPNA de manera precisa y con una resolución espacial y temporal compatible con la escala a la cual se toman las decisiones, es un punto crítico en el uso y la conservación de los pastizales (Golluscio, 2009) y el sostenimiento del resto de la cadena trófica.

7 RESUMEN

La productividad primaria neta aérea (PPNA) es el determinante principal de la disponibilidad de forraje en los sistemas de producción ganadera extensiva y el principal control de la capacidad de carga animal. Mediante el uso de sensores remotos es posible estimar la PPNA a bajo costo y en tiempo real, basándose en el modelo de Monteith que establece que la PPNA resulta del producto entre la radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) y de la eficiencia de uso de la radiación (EUR) de las plantas. La EUR, es menos variable que la RFAA, por lo que se suelen utilizar EUR únicas para distintos recursos forrajeros. Sin embargo, se reconoció que existe una importante variabilidad entre especies, grupos funcionales y ecosistemas. Además, otros factores como el estado fenológico, las condiciones climáticas como la temperatura y la disponibilidad de agua y nutrientes pueden alterar el valor de la EUR. Por lo tanto, esta simplificación puede llevar a estimaciones poco precisas, más aún en campo natural en donde su composición botánica es heterogénea y varía según el tipo de suelo. Se han registrado valores de EUR con variabilidad espacial y temporal en pasturas naturales y concuerdan que tanto la disponibilidad de agua y nutrientes como la composición botánica son las principales fuentes de variación de la EUR. Por otra parte, la RFAA depende de la fracción con que esa radiación es absorbida (fRFA) y de la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFAi). La fRFA, puede estimarse a partir del uso de sensores remotos. Actualmente Landsat-8 y Sentinel-2 son las plataformas de libre acceso con mayor resolución espacial, sin embargo, existen algunas diferencias en resolución espacial, temporal y espectral entre ambas. Este trabajo se llevó a cabo en la Estación Experimental de la Facultad de Agronomía en Salto y reúne datos de treinta jaulas de las que se extrajeron las tasas de crecimiento ocho veces al año por un periodo de ocho años (2013-2021). Para un mejor aprovechamiento de la información se reagruparon en cuatro categorías mediante un análisis de clusters de semejanza entre la PPNA de cada jaula resultando en categorías asociadas a la disponibilidad de recursos: Ss (suelos superficiales), Sm (suelos medios), Sm F (suelos medios fertilizados) y Sp (suelos profundos). Se evaluó el uso de EUR únicas y variables, realizando estimaciones de PPNA anual y estacionalmente, a las que se les sometió una serie de pruebas de ajuste de bondad. Además, se realizaron estimaciones con ambos satélites de EUR en un período de dos años (2019-2021) para evaluar su relación y compatibilidad. El uso de EUR únicas parece ser una opción válida para estimar la PPNA anualmente, mientras que, para realizar estimaciones estacionalmente deben utilizarse EUR variables entre sitios para lograr contemplar la variabilidad espacio-temporal de las pasturas naturales. Landsat-8 y Sentinel-2 son compatibles y parecen ser una opción muy buena para estimar la PPNA en tiempo real y en lapsos frecuentes para realizar seguimientos de la producción forrajera.

Palabras clave: Campo natural; Sensores remotos; PPNA; RFAA; EUR; fRFA; Landsat-8; Sentinel-2.

8 SUMMARY

Aboveground Net Primary Productivity (ANPP) is the main determinant of forage availability in extensive livestock production systems and the main control of animal carrying capacity. Through the use of remote sensors, it is possible to estimate the ANPP at low cost and in real time, based on the Monteith model, which establishes that the ANPP results from the product of absorbed photosynthetically active radiation (APAR) and the radiation-use efficiency (RUE) from plants. RUE, is less variable than APAR, so fixed RUE is often used for different forage resources. However, it was recognized that there is significant variability between species, functional groups and ecosystems. Furthermore, other factors such as phenological status, climatic conditions such as temperature and the availability of water and nutrients can alter the value of the RUE. Therefore, this simplification can lead to inaccurate estimates, especially in the natural field where its botanical composition is heterogeneous and varies according to the type of soil. RUE, values with spatial and temporal variability have been recorded in natural pastures and it is agreed that both the availability of water and nutrients and the botanical composition are the main sources of variation of the RUE. On the other hand, APAR depends on the fraction with which this radiation is absorbed (fPAR) and on the incident photosynthetically active radiation (PAR_i). The fPAR, can be estimated from the use of remote sensing. Currently Landsat-8 and Sentinel-2 are the free access platforms with the highest spatial resolution, however there are some differences in spatial, temporal and spectral resolution between them. This work was carried out at the Experimental Station of the Faculty of Agronomy in Salto and gathers data from thirty cages from which the growth rates were extracted eight times a year for a period of eight years (2013-2021). For a better use of the information, they were regrouped into four categories by means of an analysis of clusters of similarity between the ANPP of each cage, resulting in categories associated with the availability of resources: Ss (surface soils) Sm (middle soils) Sm F (middle soils fertilized) and Sp (deep soils). The use of fixed and variable RUE was evaluated, making annual and seasonal estimates of ANPP, which were subjected to a series of goodness adjustment tests. In addition, estimates were made with both RUE satellites over a two-year period (2019-2021) to assess their relationship and compatibility. The use of fixed RUE seems to be a valid option to estimate the ANPP annually, while, to estimate seasonally, variable RUE should be used between sites to be able to contemplate the spatio-temporal variability of natural pastures. Landsat-8 and Sentinel-2 are compatible and seem to be a very good option for estimating in real time and at frequent intervals to monitor forage production.

Keywords: Natural Grassland; Remote Sensing; ANPP; APAR; RUE; fPAR; Landsat-8; Sentinel-2.

9 BIBLIOGRAFÍA

1. Akmal, M.; Janssen, M. J. J. 2004. Productivity and light use efficiency of perennial ryegrass with contrasting water and nitrogen supplies. *Field Crops Research*. 88:143-155.
2. Allen, V. G.; Batello, C.; Berretta, E. J.; Hogdson, J.; Kothman, M.; Li, X.; Mc Ivor, J.; Milne, J.; Morris, C.; Peeters, A.; Sanderson, M. 2011. An international terminology for grazing lands and grazing animals. *Grass and Forage Science*.66:2-28.
3. Altesor, A.; Oesterheld, M.; Leoni, E.; Lezama, F.; Rodríguez, C. 2005. Effect of grazing on community structure and productivity of a uruguayan grassland. *Plant Ecology*. 179:83-91.
4. _____; Ayala, W.; Paruelo, J. M. 2011. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Montevideo, INIA. 234 p. (FPTA no. 26).
5. _____; López-Mársico L.; Paruelo J. M. eds. 2019a. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II. Montevideo, INIA. 167 p. (FPTA no. 69).
6. _____; Ferrón, M.; Gallego, F.; López Mársico, L.; Pezzani, F.; Lezama, F.; Baeza, S.; Leoni, S; García, S; Pereira, M.; Costa, B.; Orihuela, D.; Cáceres, D.; Rossado, A.; Paruelo, J. M. 2019b. ¿Pastizales degradados o conservados? Una descripción objetiva de la heterogeneidad generada por el manejo ganadero. *In*: Altesor, A.; López-Mársico L.; Paruelo J. M. eds. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II. Montevideo, INIA. pp. 51-72 (FPTA no. 69).
7. Anomale, M. V.; Peñafort, C.; Bocco, O.; Macor, L.; Bruno, M.; Bagnis, E. 2016. Seguimiento forrajero mediante sensores remotos. Río Cuarto, Universidad Nacional de Río Cuarto. Cátedra Producción Bovina de Carne II. 14 p.
8. Aplin, P. 2005. Remote sensing: ecology. *Progress in Physical Geography*.29:104-113.
9. Arias, W. 1963. Problemas del Basalto. Anuario de la Sociedad de Mejoramiento de Praderas. Montevideo. 7:161-170.

10. Asrar, G.; Fuchus, M.; Kanemasu, E. T.; Hatfield, J. L. 1984. Estimation absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*. 76:300-306.
11. Asuaga, A.; Berterretche, M. 2019. Uso sostenible del campo natural. Montevideo, INIA. 228 p. (FPTA no. 73).
12. Avogadro, E. G.; Padró García, J. C. 2019. Diferenciación de plantaciones forestales en Entre Ríos (Argentina): comparación de métodos de clasificación aplicados a imágenes Sentinel-2 y Landsat-8. *GeoFocus*. 24:117-139.
13. Ayala, W.; Bendersky, D. 2017. Modificaciones de la productividad del campo natural vía incorporación de especies y nutrientes: oportunidades y consecuencias. In: Reunión del Grupo Técnico en Forrajeras del Cono Sur, Grupo Campos (24^a., 2017, Tacuarembó, Uruguay). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 14-23.
14. Baethgen, W. 1997. Vulnerability of the agricultural sector of Latin America to climate change. *Climate Research*. 9:1-7.
15. Baeza, S.; Lezama, F.; Piñeiro, G.; Altesor, A.; Paruelo, J. M. 2010. Spatial variability of above-ground net primary production in uruguayan grasslands: a remote sensing approach. *Applied Vegetation Science*. 13:72-85.
16. _____; Altesor, A.; Paruelo, J. M.; Lezama, F. 2011a. Caracterización funcional en pastizales y sus aplicaciones en Uruguay. In: Altesor, A.; Ayala, W.; Paruelo, J. M. eds. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Montevideo, INIA. pp. 163-182 (FPTA no. 26).
17. _____; Gallego, F.; Lezama, F.; Altesor, A.; Paruelo, J. M. 2011b. Cartografía de los pastizales naturales en las regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas. In: Altesor, A.; Ayala, W.; Paruelo, J. M. eds. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Montevideo, INIA. pp. 33-54 (FPTA no. 26).
18. _____; Rama, G.; Lezama, F. 2019. Cartografía de los pastizales en las regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas. Ampliación y actualización. In: Altesor, A.; López-Mársico, L.; Paruelo, J. M. eds. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II. Montevideo, INIA. pp. 27-48 (FPTA no. 69).

19. Baret, F.; Guyot, G.; Major, D. J. 1989. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. *Photogrammetria*. 43:241-256.
20. _____; _____. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*. 35:161-173.
21. Barros, V.; Menéndez, A.; Nagy, G. 2005. El cambio climático en el Río de la Plata. Buenos Aires, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. 200 p.
22. Belanger, G.; Gastal, F.; Lemaire, G. 1992. Growth Analysis of a Tall Fescue Sward Fertilized with Different Rates of Nitrogen. *Crop Science*. 32:1371-1376.
23. Bemhaja, M. 1994. Fertilización nitrogenada en sistemas ganaderos. In: Seminario de Actualización Técnica (1994, La Estanzuela, Colonia). Nitrógeno en pasturas. Montevideo, INIA. pp. 49-56 (Serie Técnica no. 51).
24. _____. 1996. Producción de pasturas en Basalto. In: Risso, D. F.; Berretta, E. J.; Morón, A. eds. Producción y manejo de pasturas. Montevideo, INIA. pp. 231-239 (Serie Técnica no. 80).
25. Berretta, E. J. 1998a. Efecto del pastoreo y de la introducción de especies en la evolución de la composición botánica de pasturas naturales. In: Seminario de Actualización Tecnologías para Basalto (1998, Tacuarembó). Pasturas. Montevideo, INIA. pp. 91-97 (Serie Técnica no. 102).
26. _____.; Risso, D.; Levratto, J.; Zamit, W. 1998b. Mejoramiento de campo natural de Basalto fertilizado con nitrógeno y fósforo. In: Seminario de Actualización Tecnologías para Basalto (1998, Tacuarembó). Pasturas. Montevideo, INIA. pp. 63-73 (Serie Técnica no. 102).
27. _____. 1998c. Presentación. In: Seminario de Actualización Tecnologías para Basalto (1998, Tacuarembó). Pasturas. Montevideo, INIA. pp. 3-4 (Serie Técnica no. 102).
28. _____. 1998d. Principales características de las vegetaciones de los campos de Basalto. In: Reunión del Grupo Técnico Regional del Cono Sur en Mejoramiento y Utilización de los Recursos Forrajeros del Área Tropical y Subtropical, Grupo Campos (14^a, 1998, Termas del Arapey, Salto). Anales. Montevideo, INIA. pp. 11-19 (Serie Técnica no. 94).

29. _____.; Bemhaja, M. 1998e. Producción estacional de comunidades naturales sobre suelos de Basalto de la unidad Itapebí Tres Árboles con diferentes frecuencias de corte. In: Seminario de Actualización Tecnologías para Basalto (1998, Tacuarembó). Pasturas. Montevideo, INIA. pp. 21-31 (Serie Técnica no. 102).
30. _____.; _____. 1998f. Producción estacional de comunidades naturales sobre suelos de Basalto de la unidad Queguay Chico. In: Seminario de Actualización Tecnologías para Basalto (1998, Tacuarembó). Pasturas. Montevideo, INIA. pp. 11-20 (Serie Técnica no. 102).
31. _____. 2005. Producción y manejo de la defoliación en campos naturales de Basalto. In: Seminario de Actualización Técnica en Manejo de Campo Natural (2005, Treinta y Tres). Trabajos presentados. Montevideo, INIA. pp. 61-73 (Serie Técnica no. 151).
32. Bettolli, M. L.; Altamirano, M. A.; Cruz, G.; Rudorff, F.; Martínez, A.; Arroyo, J.; Armoa, J. 2010. Pastura natural de Salto (Uruguay); relación con la variabilidad climática y análisis de contextos futuros de cambio climático. *Revista Brasileira de Meteorología*. 25 (2):248-259.
33. Bidegain, M.; Caffera, R. M. 1991. Comportamiento de la precipitación en la región Sureste de América del Sur (Uruguay), asociado con los Índices de Oscilación Sur (IOS) y El Niño (TSM). In: Congreso Argentino de Meteorología (4^{o.}, 1991, Buenos Aires, Argentina). Anales. Buenos Aires, CAM. s.p.
34. _____.; Krecl, P. 1998. Comportamiento de la temperatura en el Sudeste de Sudamérica (Uruguay), asociado al fenómeno ENSO. In: Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología (8^{o.}), Congreso Brasileño de Meteorología (10^{o.}, 1998, Brasilia, Brasil). Anais. Brasilia, SBMET. s.p.
35. Biscoe, P. V.; Gallagher, J. N. 1977. Weather, dry-matter, production and yield. In: Long Aston Symposium on Environmental Effects on Crop Physiology (5^{th.}, 1975, Bristol, England). Proceedings. Long Ashton, University of Bristol. pp. 75-100.
36. Boggiano, P.; Formoso, D.; Zanoniani, R. 2006. Alternativas para la conservación productiva de las pasturas naturales del Uruguay. In: Simposio Internacional en Producción Animal (2^{o.}, 2006, Santa María, Brasil). Trabajos presentados. Montevideo, s.e. p. irr.

37. Bologna, J. 1997. Los recursos naturales de la región de Basalto superficial: limitantes y oportunidades. In: Foro sobre Basalto Superficial (1997, Artigas, Uruguay). Trabajos presentados. Montevideo, Plan Agropecuario. pp. 10-42.
38. Box, E. O.; Holben, B. N. 1989. Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux. *Vegetatio*. 80:71-89.
39. Burke, I. C.; Kittel, T. G. F.; Lauenroth, W. K.; Snook, P.; Yonker, M.; Parton, W. J. 1991. Regional analysis of the Central Great Plains. *Bioscience*. 41:685-692.
40. Byrd, G. T.; Sage, R. F.; Brown, R. H. 1992. A Comparison of dark respiration between C₃ and C₄ plants. *Plant Physiology*. 100(1):191-198.
41. Carámbula, M. 1997. Pasturas naturales mejoradas. Montevideo, Hemisferio Sur. 524 p.
42. Cardozo, G.; Reyno, R.; Ayala, W.; Cuadro, R.; Fernández, P.; Beretta, A.; Jaurena, M.; Lattanzi, F. 2017. Is Phosphorus a limiting factor for the productivity of natural Campo's grassland? In: Grasslands Resources for Extensive Farming Systems in Marginal Lands: major Drivers and Future Scenarios (19th, 2017, Sardinia, Italy). Proceedings. *Grassland Science in Europe*. 22:302-304.
43. Cargill, S. M.; Jefferies, R. L. 1984. Nutrient limitation of primary production in a sub-arctic salt marsh. *Journal of Applied Ecology*. 21:657-668.
44. Castells, D.; Gazarro, H.; Tarmezana, A. 1971. Evaluación de especies con posibilidades de ser introducidas en suelos de Basalto. Informe del sector forrajeras. Montevideo, Facultad de Agronomía. Cátedra de Forrajeras. pp. 1 - 7.
45. Choudhury, B. J. 1987. Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment*. 22:209-233.
46. Collino, D. J.; Dardanelli, J. L.; Sereno, R.; Racca, R. W. 2001. Physiological responses of Argentine peanut varieties to water stress. Light interception, light use efficiency and partitioning of assimilates. *Field Crops Research*. 70:177-184.

47. Colwell, J. E. 1974. Vegetation canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*.3:175-183.
48. Corsi, W. C. 1978. Clima. *Miscelánea CIAAB*. no. 18:255-266.
49. Cristiano, P. M. 2010. Estimación de la productividad primaria mediante el modelo de eficiencias y sensores remotos. Tesis Doctoral. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. 107 p.
50. Curran, P. J. 1983. Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*. 309:257-270.
51. _____. 1985. *Principles of remote sensing*. London, Longman. 260 p.
52. Detling, J. K. 1987. Grass response to herbivory. In: Carpinera, J. L. ed. *Integrated Pest Management on Rangeland*. Boulder, CO, Westview. pp. 56-68.
53. Di Bella, C. M.; Rebella, C. M.; Paruelo, J. M. 2000. Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. *International Journal of Remote Sensing*. 21:791-797.
54. _____.; Paruelo, J. M.; Becerra, J. E.; Bacour, C.; Baret, F. 2004. Experimental and simulated evidence of the effect of senescent biomass on the estimation of fPAR from NDVI measurements on grass canopies. *International Journal of Remote Sensing*. 25:5415-5427.
55. Durán, A. 1985. *Los suelos del Uruguay*. Montevideo, Hemisferio Sur. 398 p.
56. _____. 1998. Caracterización de suelos de la región basáltica del Uruguay. In: Reunión del Grupo Técnico Regional del Cono Sur en Mejoramiento y Utilización de los Recursos Forrajeros del Área Tropical y Subtropical, Grupo Campos (14^a., 1998, Termas del Arapey, Salto). *Anales*. Montevideo, INIA. pp. 3-10 (Serie Técnica no. 94).
57. ESA (European Space Agency, EU). 2015. *Sentinel-2 User Handbook*. s.l. 64 p.
58. Fensholt, R.; Sandholt, I.; Rasmussen, M. S. 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*. 91:490-507.

59. Fernández, N.; Piñeiro, G. 2008. La caracterización de la heterogeneidad espacial de los ecosistemas: el uso de atributos funcionales derivados de datos espectrales. *Ecosistemas*. 17:64-78.
60. Field, C. B.; Randerson, J. T.; Malmström, C. M. 1995. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 51:74-88.
61. Frame, J. 1981. Herbage mass. In: Hodgson, J.; Baker, R. D.; Davies, A.; Laidlaw, A. S.; Leaver, J. D. eds. *Sward measurement handbook*. Edimburg, The British Grassland Society. pp. 39-69.
62. Gallagher, J. N.; Biscoe, P. V. 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *Journal of Agricultural Science*. 91:47-60.
63. Gallego, F.; Lezama, F.; Pezzani, F.; López-Mársico, L.; Leoni, E.; Mello, A. L.; Costa, B. 2017. Estimación de la productividad primaria neta aérea y capacidad de carga ganadera: un estudio de caso en Sierras del Este, Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*. 21(1):120-130.
64. Gamon, J. A.; Field, C. B.; Goulden, M. L.; Griffin, K. L.; Hartley, A. E.; Joel, G.; Valentini, R. 1995. Relationships between NDVI, canopy structure and photosynthesis in three californian vegetation types. *Ecological Applications*. 5:28-41.
65. Gerberman, A. J.; Cuellar, J. A.; Gausman, H. W. 1984. Relationship of sorghum canopy variables to reflected infrared radiation for 2 wavelengths and 2 wavebands. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 50:209-214.
66. Goel, N. S.; Qin, W. 1996. From leaf to scene: scaling problems in remote sensing of vegetation. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (1st, 1996, Lincoln, England)*. *Memories*. Lincoln, s.e. pp. 526-528.
67. Golluscio, R. 2009. Receptividad ganadera: marco teórico y aplicaciones prácticas. *Ecología Austral*. 19:215- 232.
68. Gosse, G.; Varlet-Grancher, C.; Bonhomme, R.; Chartier, M.; Allirand, J. M.; Lemaire, G. 1986. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*. 6 (1):47-56.

69. Goward, S. N.; Tucker C. J.; Dye, D. G. 1985. North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high-resolution radiometer. *Vegetatio*. 64:3-14.
70. Gower, S. T.; Kucharik, C. J.; Norman, J. M. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, fPAR and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment*. 70:29-51.
71. Grigera, G.; Oesterheld, M.; Durante, M.; Pacín, F. 2007a. Evaluación y seguimiento de la productividad forrajera. *Revista Argentina de Producción Animal*. 27(2):137-148.
72. _____.; _____.; Pacín, F. 2007b. Monitoring forage production with MODIS data for farmers' decision making. *Agricultural Systems*. 94:637-648.
73. Guido, A.; Díaz, V. R.; Baldassini, P.; Paruelo, J. M. 2014. Spatial and temporal variability in aboveground net primary production of Uruguayan grasslands. *Rangeland Ecology and Management*. 67:30-38.
74. Haydock, K. P.; Shaw, N. H. 1975. The comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*. 15:663-670.
75. Hernández, J.; Otegui, O.; Zamalvide, J. P. 1995. Formas y contenidos de fósforo en algunos suelos de Uruguay. Facultad de Agronomía (Montevideo). *Boletín de Investigación* no. 42. 320 p.
76. Idinobaa, M. E.; Idinobaa, P. A.; Gbadegesinb, A. S. 2002. Radiation interception and its efficiency for dry matter production in three crop species in the transitional humid zone of Nigeria. *Agronomie*. 22:273-281.
77. Jackson, R. D. 1985a. Evaluating evapotranspiration at local and regional scales. *Proceedings of the IEEE*. 73:1086-1096.
78. _____.; Ezra, C. E. 1985b. Spectral response of cotton to suddenly induced water stress. *International Journal Remote Sensing*. 6:177-185.
79. Jacovides, C. P.; Kontoyiannis, H. 1995. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agricultural Water Management*. 27:365-371.

80. Jarvis, P. G.; Leverenz, J. W. 1983. Productivity of temperature, deciduous and evergreen forests. In: Lange, O. L.; Nobel, P. S.; Osmond, C. B.; Ziegler, H. eds. *Physiological Plant Ecology IV. Encyclopedia of Plant Physiology*. Berlin, Springer-Verlag. v. 12, pp. 233-280.
81. Jaurena, M.; Formoso, D.; Miller, R.; Rebuffo, M. 2013. Campo natural: patrimonio del país y fundamento de la estabilidad productiva de la ganadería. *Revista INIA*. no. 32:30-35.
82. _____.; Giorello, D.; Antúnez, J.; Díaz, S.; Sosa, M.; Zago, R. 2015a. Efectos de la fertilización NP en la evolución de la cobertura de gramíneas nativas perennes en condiciones de riego y secano. In: *Jornada de Divulgación Manejo de la Fertilización de Pasturas, Forrajes y Campo Natural Bajo Riego Suplementario (2015, Tambores, Tacuarembó). Trabajos presentados*. Montevideo, INIA. pp. 23-29 (Actividades de Difusión no. 742).
83. _____.; Antúnez, J.; Díaz, S.; Zago, R.; Sosa, M.; Wunderlich, E; Justo, A. 2015b. Evolución del índice verde del campo natural en condiciones de riego y secano. In: *Jornada de Divulgación Manejo de la Fertilización de Pasturas, Forrajes y Campo Natural Bajo Riego Suplementario (2015, Tambores, Tacuarembó). Trabajos presentados*. Montevideo, INIA. pp. 21-22 (Actividades de Difusión no. 742).
84. Joel, G.; Gamon, J. A.; Field, C. B. 1997. Production Efficiency in Sunflower: the Role of Water and Nitrogen Stress. *Remote Sensing of Environment*. 62:176-188.
85. Kerr, J. T.; Ostrovsky, M. 2003. From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology and Evolution*. 18:299-305.
86. Krause, D. P.; Boyle, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*. 5:89-97.
87. Leamer, R. W.; Noriega, J. R.; Wiegand, C. L. 1978. Seasonal changes in reflectance of two wheat cultivars. *Agronomy Journal*. 70:113-118.
88. Lezama, F.; Altesor, A.; Pereira, M.; Paruelo, J. M. 2011. Descripción de la heterogeneidad florística en los pastizales naturales de las principales regiones geomorfológicas de Uruguay. In: Altesor, A.; Ayala, W.; Paruelo, J. M. eds. *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales*. Montevideo, INIA. pp. 15-32 (FPTA no. 26).

89. _____.; Pereira, M.; Altesor, A.; Paruelo, J. M. 2019. ¿Cuán heterogéneos son los pastizales naturales en Uruguay? *In*: Altesor, A.; López-Mársico L.; Paruelo J. M. eds. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II. Montevideo, INIA. pp. 15-26 (FPTA no. 69).
90. McNaughton, S. J.; Sabuni, G. A. 1988. Large African mammals as regulators of vegetation structure. *In*: Weger, M. J. A.; Van der Aart, P. J. M.; During H. J.; Verhoeven. J. T. A. eds. Plant form and vegetation structure: adaptation, plasticity and relation to herbivore. The Hague, SPB Academic. pp. 339-354.
91. _____.; Oosterheld, M.; Frank, D.; Williams, K. 1989. Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature*. 341(1):142-144.
92. MAP. CONEAT (Ministerio de Agricultura y Pesca. Comisión Nacional de Estudio Agroeconómico de la Tierra, UY). 1979. Índices de productividad grupos CONEAT. Montevideo. 167 p.
93. _____. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1979. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: descripción de suelos. Montevideo. v. 3, 452 p.
94. MDN. DNM (Ministerio de Defensa Nacional. Dirección Nacional de Meteorología, UY). 1996. Normales climatológicas. Montevideo, Uruguay. s.p.
95. MGAP. DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, UY). 2011. Censo general agropecuario 2011. Montevideo. 146 p.
96. _____.; _____. 2017. Anuario estadístico agropecuario 2017. Montevideo. 214 p.
97. Millot. J. C.; Methol, R.; Risso, D. 1987. Relevamiento de pasturas naturales y mejoramientos extensivos en áreas ganaderas del Uruguay. Montevideo, FUCREA. 199 p.
98. Monteith, J. L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*. 9:747-766.

99. _____. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 281:277-294.
100. Montoya, F. 2013. Calibración y validación de modelos para la simulación de patata (*Solanum tuberosum L.*) bajo diferentes tratamientos de riego con pivot en condiciones semiáridas. Tesis doctoral. Albacete, España. Universidad de Castilla-La Mancha. 313 p.
101. Moran, M. S. 2000. New imaging sensor technologies suitable for agricultural management. *Aspects of Applied Biology*. 60:1-10.
102. Moreau, S.; Bosseno, R.; Gu, X. F.; Baret, F. 2003. Assessing the biomass dynamics of Andean bofedal and totora high-protein wetland grasses from NOAA/AVHRR. *Remote Sensing of Environment*. 85:516-529.
103. Myneni, R. B.; Williams, D. L. 1994. On the relationship between FPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*. 49:200-211.
104. _____.; Hall, F. G.; Sellers, P. J.; Marshak, A. L. 1995. The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 33:481-486.
105. Nagendra, H. 2001. Using remote sensing to assess biodiversity. *International Journal of Remote Sensing*. 22:2377-2400.
106. Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Model. *Journal of Hydrology*. 10:282-290.
107. Nosoetto, M. D.; Jobbágy, E. G.; Paruelo, J. M. 2005. Land use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology*. 11(7):1101-1117.
108. Nouvellon, Y.; Seen, D. L.; Rambal, S.; Bégué, A.; Moran, M. S.; Kerr, Y.; Qi, Y. J. 2000. Time course of radiation use efficiency in a shortgrass ecosystem: Consequences for remotely sensed estimation of primary production. *Remote Sensing of Environment*. 71:43-55.
109. Oosterheld, M.; Sala, O. E.; McNaughton, S. J. 1992. Effect of Animal Husbandry on Herbivore-Carrying Capacity at a Regional Scale. *Nature*. 356(1):234-236.

110. _____.; Loreti, J.; Semmartin, M.; Paruelo, J. M. 1999. Grazing, fire, and climate effects on primary productivity of grasslands and savannas. In: Walker, L. ed. Ecosystems of disturbed ground. Amsterdam, Netherlands, Elsevier. pp. 287-306.
111. _____.; Paruelo J. M.; Oyarzabal, M. 2011. Estimación de la productividad primaria neta aérea a partir de diferencias de biomasa y de integración de la radiación absorbida. In: Altesor, A.; Ayala, W.; Paruelo, J. M. eds. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. pp. 113-119 (FPTA no. 26).
112. Oyarzabal, M.; Oesterheld, M.; Grigera, G. 2011. ¿Cómo estimar la eficiencia en el uso de la radiación mediante sensores remotos y cosechas de biomasa? In: Altesor, A.; Ayala, W.; Paruelo, J. M. eds. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. pp. 51-72 (FPTA no. 26).
113. _____.; Paruelo, J. M. 2019. Dinámica de la productividad primaria de las comunidades de pastizal de Uruguay. In: Altesor, A.; López-Mársico L.; Paruelo J. M. eds. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II. Montevideo, INIA. pp. 111-122 (FPTA no. 69).
114. Paruelo, J. M.; Epstein, H. E.; Lauenroth, W. K.; Burke, I. C. 1997. ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the US. *Ecology*. 78:953-958.
115. _____.; Lauenroth, W. K.; Burke, I. C.; Sala, O. E. 1999. Grassland precipitation-use efficiency varies across a resource gradient. *Ecosystems*. 2:64-68.
116. _____.; Di Bella, C.; Arzadum, M.; Lafontaine, J.; Cahuepé, M.; Rebella, C. M. 2000. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. *Applied Vegetation Science*. 3:189-195.
117. _____. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*. 17(3):4-22.
118. _____.; Texeira, M.; Staiano, L.; Mastrangelo, M.; Amdan, L.; Gallego, F. 2016. An integrative index of Ecosystem Services provision based on remotely sensed data. *Ecological Indicators*. 71:145-154.
119. _____.; Oyarzabal, M.; Cordon, G.; Lagorio, M. G.; Pereira, M. 2019. Estimación de la eficiencia de uso de la radiación en recursos forrajeros perennes del Uruguay. In: Altesor, A.; López-Mársico L.; Paruelo J. M.

eds. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II. Montevideo, INIA. pp. 123-137 (FPTA no. 69).

120. Piñeiro, G.; Oesterheld, M.; Paruelo, J. M. 2006. Seasonal variation in aboveground production and radiation uses efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems*. 9:357-373.
121. Potter, C.; Randerson, J.; Field, C.; Matson, P.; Vitousek, P.; Mooney, H.; Klooster, S. 1993. Terrestrial ecosystem production-a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*. 7:811-841.
122. Prince, S. 1991. Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981- 1988. *International Journal of Remote Sensing*. 12:1301-1311.
123. Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Fereres, E. 2009. AquaCrop: the FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*. 101:426-437.
124. Richmond, A.; Kaufmann, R. K.; Myneni, R. B. 2007. Valuing ecosystem services: a shadow price for net primary production. *Ecological Economics*. 64(2):454-462.
125. Ridao, E.; Conde, J.; Minués, I. 1998. Estimating fAPAR from nine vegetation indices for irrigated and non irrigated faba bean and semi leafless pea canopies. *Remote Sensing of Environment*. 66:87-100.
126. Ripple, W. J. 1985. Asymptotic reflectance characteristics of grass vegetation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 43:1915-1921.
127. Rodríguez Palma, R.; Rodríguez, T. 2010a. Fertilización de campo natural: forraje crecido. *In*: Congreso de la Asociación Uruguaya de Producción Animal (3º., 2010, Montevideo). Abstracts. *Agrociencia (Uruguay)*. 14 (3):133.
128. _____.; _____. 2010b. Fertilización de campo natural: productividad animal. *In*: Congreso de la Asociación Uruguaya de Producción Animal (3º., 2010, Montevideo). *Agrociencia (Uruguay)*. Abstracts. 14 (3):134.
129. Rondeaux, G.; Steven, M.; Baret, F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 55:95-107.

130. Rosengurtt, B. 1944. Las formaciones campestres y herbáceas del Uruguay: 4^a. contribución. Montevideo, Agros. 44 p.
131. _____. 1977. Campos pedregosos. Paysandú, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. EEMAC. 11 p.
132. Ruimy, A.; Saugier, B.; Dedieu, G. 1994. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research*. 99:5263-5283.
133. Running, S. W.; Thornton, P. E.; Nemani, R. R.; Glassy, J. M.; Sala, O. E.; Jackson, R. B.; Mooney, H. A.; Howarth, R. W. 2000. Global Terrestrial Gross and Net Primary Productivity from the Earth Observing System. In: Sala, O. E.; Jackson, R. B.; Mooney, H. A.; Howarth, R. W. eds. *Methods in Ecosystem Science*. New York, Springer. pp. 44-57.
134. Rusticucci, M.; Renom, M. 2008. Variability and trends in indices of quality-controlled daily temperature extremes in Uruguay. *International Journal of Climatology*. 28:1083-1095.
135. Sala, O. E.; Parton, W. J.; Joyce, L. A.; Lauenroth, W. K. 1988. Primary Production of the Central Grassland Region of the United States. *Ecology*. 69(1):40-45.
136. _____.; Austin, A. 2000. Methods of Estimating Aboveground Net Primary Productivity. In: Sala, O. E.; Jackson, R. B.; Mooney, H. A.; Howarth, R. W. eds. *Methods in Ecosystem Science*. New York, Springer. pp. 31-43.
137. Scotford, I. M.; Miller, P. C. H. 2005. Applications of spectral reflectance techniques in northern European cereal production: a review. *Biosystems Engineering*. 90(3):235-250.
138. Sellers, P. J. 1985. Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration. *International Journal of Remote Sensing*. 6:1335-1372.
139. Soca, P.; Do Carmo, M.; Urchupia, A.; Claramunt, M. 2011. Variabilidad espacial y temporal de la producción primaria neta aérea como determinante de la producción ganadera: experiencias locales. In: Altesor, A.; Ayala, W.; Paruelo, J. M. eds. *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales*. Montevideo, INIA. pp. 147-162 (FPTA no. 26).

140. Soriano, A. 1991. Río de la Plata grasslands. *In*: Coupland, R. T. ed. *Natural Grasslands: introduction and Western Hemisphere*. Amsterdam, Elsevier. pp. 367-407.
141. Termezana, A. 1976. Región Basáltica. *In*: Durán, A. coord. *Avances en pasturas IV*. Montevideo, Uruguay, CIAAB. t. 1, pp. 9-37.
142. Texeira, M.; Oyarzabal, M.; Piñeiro, G.; Baeza, S.; Paruelo, J. M. 2015. Land cover and precipitation controls over long-term trends in carbon gains in the grassland biome of South America. *Ecosphere*. 6(10):196.
143. Tucker, C. J. 1977. Resolution of grass canopy biomass classes. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 43:1059-1067.
144. _____. 1980. Remote sensing of leaf water content in the near infrared. *Remote Sensing of Environment*. 10:23-32.
145. _____.; Towshend, J. R.; Goff, T. E. 1985. African land-cover classification using satellite data. *Science*. 227:369-375.
146. Turner, W.; Sterling, E. J.; Janetos, A. C. 2001. Contribution of remote sensing to biodiversity conservation: a NASA approach. *Conservation Biology*. 15:832-953.
147. _____.; Gower, S. T.; Cohen, W. B.; Gregory, M.; Maiesperger, T. K. 2002. Effect of spatial variability in light use efficiency on satellite-based NPP monitoring. *Remote Sensing of Environment*. 80:397-405.
148. _____.; Urbanski, S.; Bremer, D.; Wofsy, S. C.; Meyers, T.; Gower, S. T.; Gregory, M. 2003. A cross-biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production. *Global Change Biology*. 9:383-395.
149. USGS (United States Geological Survey, US). 2016. *Data users handbook*. Sioux Falls, South Dakota. 106 p.
150. Viña, A.; Gitelson, A. A. 2005. New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops. (en línea). *Geophysical Research Letters*. 32(17):1-4. Consultado 15 mar. 2021. Disponible en doi: 10.1029/2005GL023647.
151. Willmot, C. J. 1982. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 63:1309-1313.

10 ANEXOS

Anexo No. 1. Unidades de suelos de la región Basalto

Unidades de suelos	Superficie (ha)	% País	Suelos predominantes	Suelos asociados
Suelos superficiales				
Cuch. Haedo-P. Toros (CH-PT)	1.011.523	5,74	Litsoles	Bruno-Vertisoles Afloramientos
Queguay Chico (Qch)	634.158	3,60	Litsoles	Lito – Bruno – Vertisoles Afloramientos
Subtotal	1.645.681	9,34		
Suelos medios				
Curtina (Cu)	805.781	4,57	Lito – Verti – Brunosoles	Litsoles – Afloramientos – (Fluvisoles)
Masoller (Ma)	87.992	0,50	Lito – Verti – Brunosoles	Planosoles – Afloramientos – (Litsoles)
Subtotal	893.773	5,07		
Suelos profundos				
Arapey (Ay)	115.698	0,67	Vertisoles	Fluvisoles
Baygorria	89.531	0,51	Brunosoles – Vertisoles	Litsoles
Cuaró (Cr)	87.992	0,50	Bruno – Verti – Planosoles	Lito – (Argisoles)
Itapebí-Tres Arboles (I-TA)	1.256.516	7,13	Brunosoles Vertisoles	Lito – (Planosoles Fluvisoles)
Subtotal	1.549.737	8,81		
Total	4.089.191	23,22		

Fuente: adaptado de MAP. DSF (1979).

Anexo No. 2. Tasa de crecimiento diario de forraje (kg MS. ha⁻¹.día⁻¹) por estación de los suelos superficiales pardo rojizo y negro y suelo profundo de la unidad Queguay Chico

Suelo		Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Superficial pardo rojizo	Media	10,1	6,8	4,9	9,9
	Desv. típ.	4,9	2,9	2,5	3,9
	C.V. (%)	49	43	51	40
Superficial	Media	13,6	8,8	6,1	13,0

negro	Desv. típ.	5,9	3,6	2,4	4,3
	C.V. (%)	43	41	40	33
Profundo	Media	17,2	10,9	7,3	14,8
	Desv. típ.	7,8	4,2	3,1	4,4
	C.V. (%)	45	38	42	30

Fuente: adaptado de Berretta y Bemhaja (1998f).

Anexo No. 3. Distribución estacional (%) y su variabilidad por estación de la producción de forraje de los suelos superficiales pardo rojizo y negro, y suelo profundo de la unidad Queguay Chico

Suelo		Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Superficial pardo rojizo	Media	31,4	21,1	15,7	31,7
	Desv. típ.	12,8	6,0	5,8	9,8
	C.V. (%)	41	28	37	31
Superficial negro	Media	32,1	21,0	14,9	32,0
	Desv. típ.	15,5	5,5	5,1	9,6
	C.V. (%)	36	26	34	30
Profundo	Media	33,3	21,5	15,1	30,1
	Desv. típ.	12,0	6,3	6,4	8,8
	C.V. (%)	36	29	42	29

Fuente: adaptado de Berretta y Bemhaja (1998f).

Anexo No. 4. Producción anual de forraje (kg MS. ha⁻¹) por tipo de suelo con cortes estacionales en la unidad Itapebí - Tres Árboles en un periodo de 1984 a 1987

Suelo	Producción anual
Superficial pardo rojizo	2996
Superficial negro	3737
Profundo	4747

Fuente: adaptado de Berretta (1998e).

Anexo No. 5. Tasa de crecimiento diario de forraje (kg MS. ha⁻¹) por estación de distintos tipos de suelo de Basalto de la unidad Itapebí - Tres Arboles, desde 1984 a 1987

Suelo		Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Superficial pardo rojizo	Media	5,74	9,12	4,49	13,36
	Desv. típ.	2,24	4,01	2,11	6,01
	C.V. (%)	39,0	43,9	47,0	45,0
Superficial negro	Media	5,78	12,98	5,96	16,09
	Desv. típ.	2,55	1,34	2,06	6,63
	C.V. (%)	44,1	10,3	34,6	41,2
Profundo	Media	10,15	12,74	6,36	22,63
	Desv. típ.	3,83	0,66	2,24	6,43
	C.V. (%)	37,8	5,2	35,2	28,4

Fuente: adaptado de Berretta (1998e).

Anexo No. 6. Sensores a bordo del Landsat-8 y sus características

Sensor	Número de banda	Nombre de la banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)	Aplicaciones
OLI	1	Costera (Coastal)	0.43 – 0.45	30	Estudios costeros y de aerosoles
OLI	2	Azul	0.45 – 0.51	30	Cartografía batimétrica, que distingue el suelo de la vegetación y la vegetación caducifolia de la vegetación de coníferas
OLI	3	Verde	0.53 – 0.59	30	Destaca los picos de máxima vegetación, que son útiles para evaluar el vigor de las plantas
OLI	4	Roja	0.63 – 0.67	30	Distingue las laderas de vegetación
OLI	5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 – 0.88	30	Destaca el contenido de biomasa y las costas
OLI	6	Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1.57 – 1.65	30	Distingue la humedad del suelo y de la vegetación; penetra a través de nubes finas
OLI	7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2.11 – 2.29	30	Mejora de la lectura de la humedad del suelo y la vegetación y la penetración a través de nubes finas
OLI	8	Pancromática (Pan)	0.50 – 0.68	30	Resolución de 15 metros, definición de imagen más nítida
OLI	9	Cirros (Cirrus)	1.36 – 1.38	30	Mejor detección de la contaminación en cirros
TIRS	10	Sensor térmico infrarrojo 1 (TIRS 1)	10.60 – 11.19	30	Resolución de 100 metros, mapeo térmico y humedad estimada del suelo
TIRS	11	Sensor térmico infrarrojo 2 (TIRS 2)	11.50 – 12.51	30	Resolución de 100 metros, mapeo térmico y humedad estimada del suelo

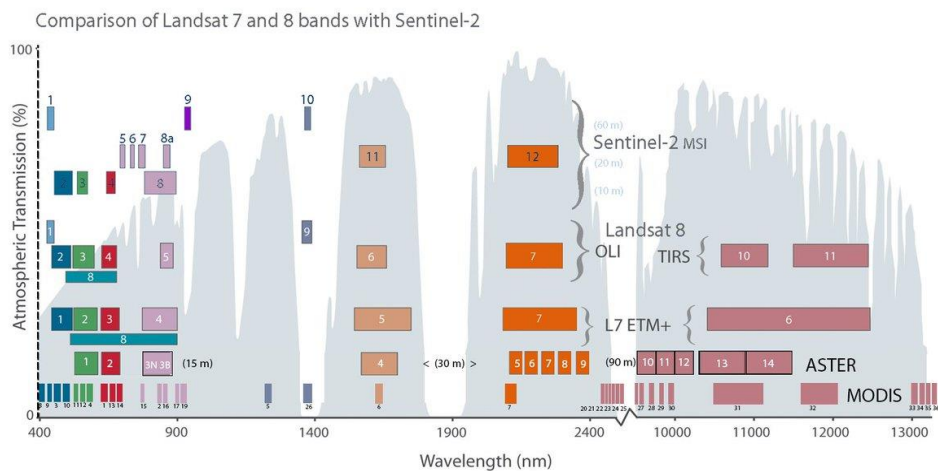
Fuente: adaptado de USGS (2016).

Anexo No. 7. Principales características espectrales de Sentinel-2

Bandas S-2	Longitud de onda (nm)	Resolución (m)	Descripción
B1	443	60	Ultra Azul (Aerosol)
B2	490	10	Azul
B3	560	10	Verde
B4	665	10	Rojo
B5	705	20	Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)
B6	740	20	Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)
B7	783	20	Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)
B8	865	20	Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR)
B9	940	60	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B10	1375	60	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B11	1610	20	Onda Corta Infrarroja (SWIR)
B12	2190	20	Onda Corta Infrarroja (SWIR)

Fuente: ESA (2015).

Anexo No. 8. Comparación de las bandas de los sensores a bordo de Landsat 7 y 8 con Sentinel-2

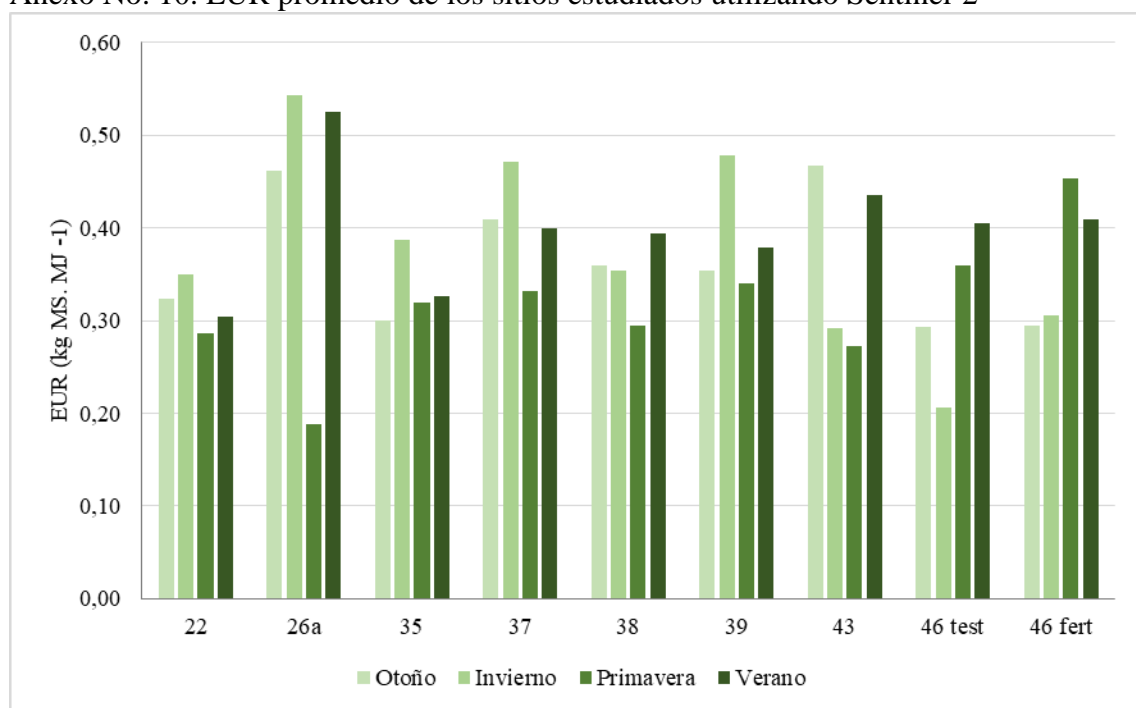


Fuente: USGS (2016).

Anexo No. 9. EUR de los sitios estudiados utilizando Sentinel-2

Año	Estación	22	26a	35	37	38	39	43	46 test	46 fert
2019	Verano	0,32	0,40	0,29	0,31	0,26	0,30	0,37	0,32	0,36
2019	Otoño	0,32	0,46	0,30	0,41	0,36	0,35	0,47	0,29	0,30
2019	Invierno	0,35	0,54	0,39	0,47	0,35	0,48	0,29	0,21	0,30
2019	Primavera	0,29	0,19	0,32	0,33	0,29	0,34	0,27	0,36	0,45
2020	Verano	0,30	0,53	0,33	0,40	0,39	0,38	0,44	0,40	0,41
2020	Otoño	0,22	0,21	0,12	0,20	0,23	0,25	0,24	0,20	0,17
2020	Invierno	0,40	0,62	0,38	0,67	0,62	0,59	0,63	0,48	0,44
2020	Primavera	0,25	0,39	0,15	0,39	0,29	0,30	0,30	0,29	0,36
2021	Verano	0,28	0,56	0,16	0,29	0,30	0,32	0,40	0,33	0,30

Anexo No. 10. EUR promedio de los sitios estudiados utilizando Sentinel-2



Anexo No. 11. EUR de los sitios estudiados utilizando Landsat-8

Landsat EUR		22	26a	35	37	38	39	43	46 test	46 fert
2019	Verano	0,30	0,36	0,28	0,30	0,25	0,29	0,36	0,30	0,33
2019	Otoño	0,34	0,46	0,31	0,42	0,36	0,36	0,50	0,31	0,31
2019	Invierno	0,34	0,53	0,38	0,47	0,32	0,49	0,29	0,22	0,31

2019	Primavera	0,29	0,20	0,34	0,35	0,30	0,39	0,28	0,41	0,46
2020	Verano	0,29	0,47	0,30	0,38	0,37	0,35	0,42	0,37	0,37
2020	Otoño	0,20	0,19	0,11	0,18	0,22	0,22	0,23	0,19	0,16
2020	Invierno	0,39	0,60	0,39	0,64	0,60	0,57	0,59	0,49	0,43
2020	Primavera	0,25	0,37	0,14	0,37	0,35	0,29	0,29	0,29	0,36
2021	Verano	0,15	0,55	0,18	0,31	0,46	0,36	0,42	0,36	0,33

Anexo No. 12. EUR de los sitios estudiados utilizando Landsat-8

