Incorporación de las TICs en el proceso de gestión, monitoreo y control de sistemas pastoriles de producción de leche.

FONDO SECTORIAL INNOVAGRO

Postulación 2009_Modalidad II

PE_FSA_2009_1_1614

ÍNDICE

Introducción **3**

Antecedentes **4**

Objetivos del Proyecto **8**
Objetivos específicos 8

Metodología **9**
Calibración 9
Pasturas 9
Verdeos de Invierno 9
Verdeos de verano 10
Desdoblamiento espectral 12
Establecimientos en seguimiento 16

Resultados obtenidos **18**
Calibración 18
Tasas de Crecimiento 19
Por recurso 19
Por año 21

Difusión y Divulgación **24**
Portal Lechero 24
Otros medios 26

Aplicaciones **28**

Agradecimientos **28**

Bibliografía **29**

INTRODUCCION

La siguiente publicación se enmarca dentro del proyecto denominado “Incorporación de las TICs en el proceso de gestión, monitoreo y control de sistemas pastoriles de producción de leche” en adelante “Seguimiento Forrajero Satelital”.

El mismo se desarrollo a partir de una alianza entre CONAPROLE (como empresa privada) e instituciones públicas de Uruguay y de Argentina. La dirección del proyecto estuvo a cargo de Ing. Agr. PhD Pablo Chilibroste representando a la Facultad de Agronomía (EEMAC). Además participo activamente en todo el desarrollo del proyecto el LART (Laboratorio Regional de Teledetección) de la FAUBA, Universidad de Buenos Aires (UBA) y se contó con el apoyo de la Facultad de Ciencias de la UDELAR de nuestro país. La Figura 1 muestra la estructura de trabajo desarrollada en el marco del proyecto y las personas que estuvieron vinculadas al mismo, para las distintas instituciones.

La alianza gestionó financiamiento en la modalidad de subsidio, ante la ANII (Agencia Nacional de Investigación e Innovación) en el marco de la convocatoria al fondo sectorial INNOVAGRO. En septiembre de 2010 esta solicitud de financiamiento para la ejecución del Proyecto fue aprobado por Resolución del Directorio (FOR.INS.548; Postulación: PR_FSA_2009_1).En dicha convocatoria se presentaron 93 proyectos de los cuales fueron beneficiaron 18 proyectos.

Figura 1: Estructura de la organización del trabajo durante el desarrollo del proyecto

El inicio formal del proyecto fue en julio del 2011, una vez que se firmaron los acuerdos entre las instituciones y se contrataron a los técnicos responsables de su ejecución.

ANTECEDENTES

Uno de los principales problemas que tienen los sistemas de producción lecheros es no contar con un método objetivo, racional y estandarizado para estimar la productividad forrajera. No poder cuantificar esta información de manera rutinaria, dificulta la adecuada toma de decisiones en los establecimientos.

Cuantificar la productividad de una pastura, o cualquier otro tipo de recurso forrajero es fundamental para establecer la carga animal adecuada, planificar y manejar los excesos y déficits de forraje, entre otros. A pesar de la importancia de conocer esta variable, hay muy poca información disponible debido fundamentalmente a la dificultad para estimarla. Tradicionalmente las estimaciones se realizan a campo, a partir de cosechas sucesivas del forraje. Estos datos se utilizan para hacer extrapolaciones espaciales y temporales que generalmente no representan la situación particular de un lugar. A su vez, la disponibilidad de dichas estimaciones es escasa.

Cuantificar la productividad forrajera es particularmente importante en sistemas intensivos como los tambos. Estos sistemas requieren relativamente un mejor ajuste del manejo de los recursos forrajeros que otros sistemas ganaderos. En este sentido, un sistema de seguimiento de la productividad forrajera que opere con una frecuencia rutinaria, en tiempo real, y basado en una robusta base biofísica, es una herramienta muy valiosa para mejorar la productividad y eficiencia de estos sistemas (Grigera et al., 2007a y 2007b).

En Uruguay los sistemas de producción de leche han experimentado un proceso sostenido de intensificación en los últimos años, con el objetivo de incrementar la producción por animal y por hectárea. La productividad por hectárea ha crecido en torno al 5% anual en los últimos 20 años. Sin embargo, en ese proceso se han perdido aproximadamente la mitad de las unidades de producción. Existen diversos caminos a recorrer en el proceso de intensificación del uso de los recursos, que a su vez están vinculados con diferentes niveles de complejidad (La Manna, 2008). La estrategia dominante de intensificación en Uruguay ha estado basada en el aumento de la carga animal y niveles crecientes de suplementación (Hernández, 2008) y un esquema forrajero que intenta una alta productividad en el corto plazo.

La utilización en forma estructural de pasturas de corta duración de ciclo invernoprimaveral determina que la rotación exponga en otoño entre un 40-70% del área como barbecho y disminuya el área efectiva de pastoreo. Esto reduce la producción y persistencia del forraje e incrementa el costo por unidad de producto asociado a una menor estabilidad del sistema (Chilibroste, 2003; Soca et al., 2008).

Las cargas promedios de los tambos en Uruguay se ubican en torno a 1 Vaca masa por hectárea por año (Chilibroste et al., 2009; Diea, 1997; FUCREA, 2008). Tradicionalmente estos valores se consideran bajos cuando se los compara con las cargas utilizadas por sistemas pastoriles de otros países tales como Nueva Zelandia o Irlanda con cargas entre 3 y 4 vacas por hectárea.

En cambio, cuando se utiliza el índice de carga comparativa (kg de peso vivo/tonelada de forraje producido) los valores de Uruguay son significativamente más altos (150-200 kg peso

vivo por tonelada de MS producida) que los de Nueva Zelandia (85-90 kg PV/TT MS producida) (Chilibroste, 2009). Esta situación genera una condición de sobreexplotación del recurso pastura en prácticamente todas las estaciones del año, situación que es solo parcialmente aliviada por los niveles de suplementación utilizados y los manejos que previenen el acceso de los animales al pastoreo (Chilibroste et al., 2007). Este aspecto pone de relieve la importancia de contar con un sistema en tiempo real de monitoreo de la condición forrajera y que ayuda a la toma de decisiones de alimentación y manejo del rodeo.

Adicionalmente, análisis de registros obtenidos en el marco de un proyecto de largo plazo llevado adelante por el Área de Producción Primaria y Relaciones Cooperativas de CONAPROLE, muestran que las estrategias de intensificación basadas en un incremento de la biomasa producida en la rotación pastura-cultivos han sido exitosas desde el punto de vista económico-financiero (Chilibroste et al., 2009); mientras que las que se han basado en el uso de concentrados sin incrementos proporcionales en la producción de biomasa han tenido resultados más pobres y un mayor nivel de exposición a variaciones de relaciones de precios y/o clima.

Los incrementos en la intensidad de defoliación pueden obtenerse mediante aumentos de la carga animal y/o reducción en la oferta de forraje por vaca. El incremento de la carga animal aumenta el porcentaje de utilización del forraje en forma instantánea. Esto trae como consecuencia una menor altura en el remanente y cambios en la tasa de crecimiento, lo cual trae consecuencias en la producción estacional y/o total de forraje (Bryan et al., 2000 y Cullen et al., 2006). Esto ha provocado incrementos en la vulnerabilidad de los sistemas frente al cambio climático y no necesariamente mejoras de la producción de leche (Chilibroste et al., 2009). Es por ello que entender y cuantificar la producción y utilización de forraje en el largo plazo toma un valor sumamente importante. En este sentido, el Proyecto se caracteriza por incorporar una herramientas para el monitoreo de recursos forrajeros, llamado Seguimiento Forrajero (Seguimiento Forrajero Satelital).

El Sistema de Seguimiento Forrajero estima la productividad forrajera (o la tasa de crecimiento del forraje) desde el año 2000 a la actualidad. Tanto la información histórica como la que ocurre actualmente se entrega mensualmente, desagregándola por tipo de recurso forrajero y a distintas escalas: regional o nacional.

Este proyecto propuso utilizar estimaciones de productividad forrajera como soporte para la toma de decisiones de manejo y planificación en tambos. Las estimaciones fueron entregadas por el sistema de Seguimiento Forrajero desarrollado por investigadores del Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección (LART-Universidad de Buenos Aires, Argentina; Grigera et al., 2007a y 2007b).

El sistema está basado en que la productividad forrajera (PF) en un período está determinada por la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAA) por las plantas y por la eficiencia con que esa energía es transformada en materia seca aérea (EUR) (Monteith 1972, 1977):

$$PF\ (Kg/ha/mes) = RFAA\ (MJ/ha/mes) * EUR\ (KgMS/MJ)$$

A su vez, la RFAA es el producto entre la radiación fotosintéticamente activa incidente (medida en estación meteorológica) y la fracción de esta que es absorbida por las hojas verdes (fRFA), que depende de la cantidad y disposición espacial del área foliar. La fRFA puede ser estimada con razonable precisión a partir de la teledetección y esa relación es el vínculo entre la productividad forrajera y los sensores remotos (Paruelo et al., 2000). La EUR puede ser calculada a partir de estimaciones independientes de la productividad forrajera y la radiación absorbida, o ser tomada de estimaciones de la literatura, o a partir de modelos con base en variables ambientales (Piñeiro et al., 2006). La EUR es mucho menos variable que la RFAA para un recurso forrajero determinado (Paruelo et al., 2000).

El índice de vegetación normalizado (IVN, también llamado índice verde) es el más común entre los índices que se calculan a partir de observaciones satelitales para el seguimiento de la vegetación. El IVN está directamente relacionado con la fRFA porque se basa en las propiedades de la vegetación verde de absorber intensamente la radiación visible (especialmente en la longitud de onda del rojo), utilizada para la fotosíntesis, y de reflejar la mayor parte de la radiación en la zona del infrarrojo cercano (Sellers et al., 1992). El IVN se calcula según: IVN = (pir - pr)/(pr + pir), donde pr y pir son las reflectancias (proporción de la radiación incidente que es reflejada) de la superficie en la longitud del rojo y el infrarrojo cercano, respectivamente.

Hasta hace unos pocos años, la estimación de la fRFA de forma continua en el tiempo y a nivel de potrero estuvo limitada por la baja resolución espacial (píxeles muy grandes) de los sensores satelitales. En este sentido, el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA, es un instrumento superador porque combina alta resolución espacial y temporal (tamaño de píxel <6 ha y frecuencia de observación de un mismo sitio prácticamente diaria) con georeferenciación, correcciones atmosféricas y detección de nubosidad notablemente mejoradas respecto de los sensores utilizados anteriormente (Huete et al., 2002). Estas características son requisitos básicos para poder realizar un seguimiento de los recursos forrajeros a la escala de potrero.

El seguimiento consta de un sistema de información geográfica (SIG) que tiene digitalizados los contornos de los potreros de interés, que contribuyen con información al proyecto. Además, incorpora información de radiación incidente (RFAI), índices de vegetación (IVN), coeficientes de eficiencia en el uso de la radiación (EUR, calibrados con cosechas de biomasa específicamente para los recursos del país), y tipo de recurso forrajero de cada potrero provisto por los productores (Grigera et al., 2007a). A partir de esta información, una serie de cálculos internos generan estimaciones de productividad o de radiación absorbida mensual.

Un software (SegF, Programador: Víctor Suárez) específicamente desarrollado para el seguimiento forrajero, maneja y almacena la información en una base de datos relacional y tiene implementados los procedimientos de carga de datos; realiza automáticamente todos los cálculos necesarios para estimar la productividad forrajera en rutinas programadas (Figura 2).

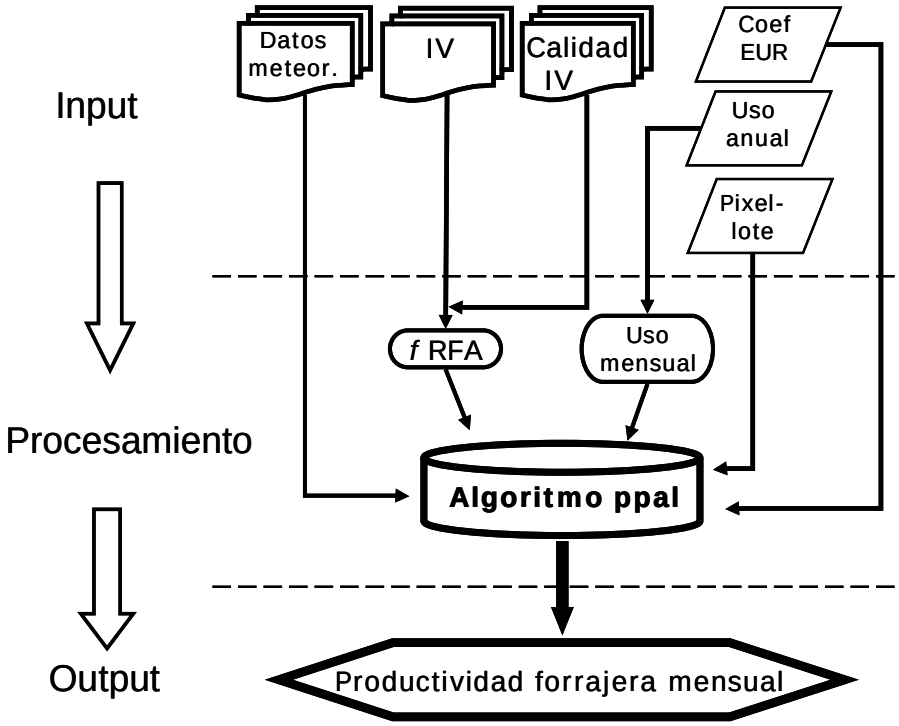


Figura 2: Diagrama de flujo de los principales procesos de cálculo del sistema de seguimiento de la productividad forrajera. El algoritmo principal está basado en la lógica de la eficiencia en el uso de la radiación (EUR). Algunos datos de entrada son actualizados mensualmente (ícono de varias capas) y otros con menor frecuencia (íconos de una sola capa). Por ejemplo, el uso anual es actualizado anualmente y los coeficientes de EUR son actualizados solo si se genera nueva información al respecto. IV, índice de vegetación; Calidad IV, información de calidad de las imágenes satelitales (presencia de aerosoles y/o nubosidad); f RFA, fracción de la radiación fotosintéticamente activa incidente absorbida por la vegetación. Tomado de Grigera et al., 2007 con modificaciones.

La inmensa ventaja que proporciona esta metodología es que permite estimar la productividad forrajera en áreas extensas, desde el año 2000 y con frecuencia mensual, algo que sería prácticamente imposible con métodos de estimación tradicionales (Grigera et al., 2007a). De esta manera, el sistema de seguimiento de la productividad forrajera permite cuantificar las variaciones tanto entre sitios como entre meses, estaciones o años.

El desafío fue implementar estas estimaciones en sistemas más intensivos como los tambos, ya que el mismo ha sido utilizado para sistemas extensivos como la ganadería. El proyecto abordó un problema sobre el que existe muy poca experiencia, como el de utilizar rutinariamente el seguimiento forrajero en sistemas con potreros sensiblemente más chicos que los de ganadería extensiva y con otros tipos de recursos forrajeros. Adicionalmente, fue objetivo del proyecto transferir el conocimiento a productores y técnicos que trabajan en sistemas de producción más intensivos en el uso del forraje. El uso de las tasas de crecimiento para "presupuesto alimenticio" es parte de la utilidad de esta herramienta pudiendo ser utilizada esta información por todos los productores y asesores de la cuenca de CONAPROLE.

Para la divulgación masiva de esta información generada se desarrolló un panel de información en el portal web de la cooperativa (http://www.eleche.com.uy/) donde se presenta de forma

amigable, en gráficos y cuadros comparativos, el crecimiento mensual de las principales pasturas utilizadas, para cada una de las zonas de la cuenca lechera de CONAPROLE.

El sistema fue calibrado a partir de cortes de biomasa de los principales recursos del país, en distintos sitios de la cuenca lechera Uruguaya.

También se realizó la digitalización de los campos con la información de usos históricos y actuales para obtener la estimación de Productividad de Materia Seca por cada establecimiento involucrado en el proyecto que luego fueron llevados a valores promedio para las distintas zonas de la cuenca lechera.

Luego, las estimaciones de productividad forrajera fueron generadas en el laboratorio LART a partir de datos de satélites provistos por la NASA, alrededor del día 15 de cada mes, una vez incorporada la información meteorológica y satelital del mes inmediatamente anterior; y procesados por el software (Seg-F). Los resultados fueron volcados a la base de datos y puestos a disposición de usuarios a nivel zonal para cualquier usuario remitente a la Cooperativa.

Durante el desarrollo del proyecto se contrató técnicos que trabajaron estrechamente vinculadas a CONAPROLE y que recibieron capacitación en las distintas metodologías desarrolladas por el LART y Facultad de Agronomía; quedado instaladas las capacidades para la instalación de un laboratorio de seguimiento forrajero dentro de la empresa.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo general del proyecto fue Implementar el uso de Imágenes Satelitales para estimar la productividad de diferentes recursos forrajeros utilizados en sistemas de producción de leche del Uruguay.

Los objetivos específicos fueron:

1. Calibrar la información entregada por el SegF para los principales recursos forrajeros utilizados en los tambos
2. Disponer de información por recurso forrajero y por zona en forma mensual así como la productividad histórica; en los casos en que los sitios seleccionados lo permitan.
3. Construir un panel de información que facilite la divulgación mensual de la información obtenida a través de la web de CONAPROLE.

METODOLOGIA

Calibración

La CALIBRACION del sistema consistió en ajustar la estimación de la productividad forrajera que surge de las cosechas de biomasa con los datos otorgados por los sensores remotos. Este proceso incluyo 2 fuentes de información: los cortes de biomasa que se realizaron durante el transcurso del proyecto y el uso de la información de tasas de crecimiento del proyecto Alimentación – Reproducción (CONAPROLE 2003-2005).

Para los cortes realizados en el ámbito del proyecto se seleccionaron 23 potreros de 11 productores de la Cooperativa (Figura 3 y 4). A partir de un muestreo mensual, para el período 2012-2013, en cada uno de los potreros se pudo obtener información de los 13 recursos forrajeros de mayor utilización en la lechería Uruguaya. Se procesaron aproximadamente 1080 muestras en el laboratorio de la Facultad de Ciencias.

La selección de sitios de corte debió seguir algunos criterios:

1- Áreas extensas de un mismo recurso
2- Homogéneo en cobertura y composición
3- Sitios representativos para las zonas administrativas de Conaprole

A continuación se detallan los métodos de cosecha realizados, ya que fueron variables según el recurso forrajero.

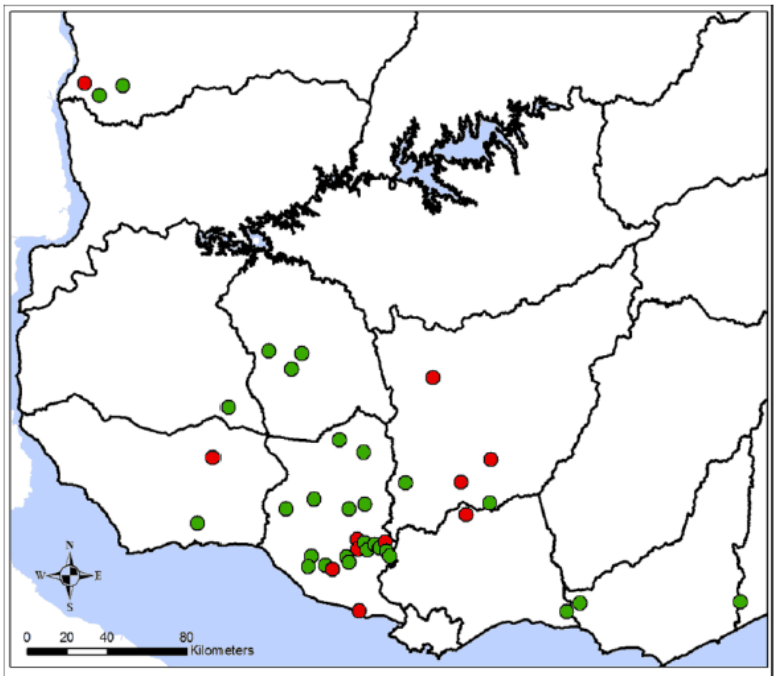
Para el caso de **pasturas** (en base a festuca o alfalfa de primer, segundo y tercer año) y **verdeos de invierno** (avena y raigrass) se utilizaron dos métodos; el método de doble muestreo y las jaulas de exclusión.

<u>Doble muestreo:</u> Se utilizó la metodología de doble muestreo por apreciación visual (Haydock y Shaw, 1975). Este método se basa en definir una escala de 3 a 5 puntos por apreciación visual (dependiendo de la heterogeneidad de la pastura) tomando en cuenta la altura y densidad del forraje (1- muy bajo, 2-bajo, 3-medio 4-medio alto 5-alto). La elección de los puntos se realizó luego de recorrer el potrero para que de esta formar escoger representativamente las escalas. Se excluyeron los puntos extremos, es decir extremadamente altos o bajos que no son representativos de lo que se encuentra en el área a muestrear (outliers). También se evitaron áreas con pisoteo extremo y zonas con deyecciones animal. Una vez culminada la recorrida se seleccionaron 3 sitios (uno para cada categoría) donde se realizaron 2 cortes de biomasa tomando como referencia un cuadrante de 30x30 cm. En los puntos de corte marcados se medió la altura del disponible y el corte se realizó el al ras de suelo. Posteriormente, en el laboratorio de Facultad de Ciencias, se procedió con el secado (en estufa a 70 ºC por 48hs) y pesado de las muestras. Se realizaron cortes antes y después de los pastoreos, para obtener de esta manera el remanente y rebrote del recurso a medir.

Con los tres o cinco puntos de la escala y su respectivo valor de MS se calcularon regresiones lineales Yi= (ajx+ boi). Utilizando estas ecuaciones, con el valor promedio de la escala visual de las parcelas (X) se obtiene así el valor de disponibilidad en Kg. de MS/há.

Jaulas móviles: La determinación de las TC diaria para cada tratamiento se estimó mediante la utilización de jaulas de exclusión móviles (Haydock et al., 1975). Se instalaron al azar 3 jaulas por tratamiento (1 metro x 1 metro) al momento del inicio de los pastoreos en cada tratamiento, colocadas en las zonas de la pastura que presentaban una situación de rebrote lo más cercano posible al pastoreo. Luego de cada corte las jaulas eran movidas para otro sitio dentro del mismo potrero. Previamente al corte se determinaron las alturas por cuadro con el objetivo de determinar las relaciones de altura-biomasa aérea de forraje (Frame, 1993). Los cortes se realizaron con cuadros de 0.20*0.50cm a una altura del suelo de 1 cm. La frecuencia entre cortes dependió de la entrada y salida de los pastoreos en cada parcela y estación del año la cual era controlada en función de la disponibilidad de forraje (KgMS/Ha) Durante el otoño se manejaron aproximadamente 30-45 días entre cortes, en invierno 30-60 días y para la primavera 20-30dias. Luego de transcurridos los días de crecimiento y cortados los rectángulos, se procede a cambiar de lugar la jaula, cortándose el disponible inicial, lo que determina que se realicen 4 rectángulos por jaula, dos en un sitio (disponible inicial) y dos en el nuevo sitio (disponible remanente). El peso seco se determinó secando el forraje recolectado en estufa a 70ºC durante 72 horas. El dato de tasa de crecimiento (KgMS/Ha.d-1) se obtuvo dividiendo la diferencia entre el forraje disponible inicial y remanente sobre los días transcurridos entre cortes.

Para el caso de los **verdeos de verano** se utilizó el método de corte sobre la línea de siembra. Los verdeos de verano que fueron cosechados para la calibración de los datos fueron: Maíz, Sorgo Granífero y Sorgo Forrajero. Dentro del potrero seleccionado se procedió a identificar la zona donde se ubicaba el píxel. Se descartaron los bordes para evitar posibles efectos del mismo. El píxel se recorrió en forma de diagonal, y cada 30 metros de realizó un corte sobre la línea de siembra. Se cortó a 1 cm del suelo y 1 metro a lo largo de la línea de siembra. En total se cortaron 20 muestras por fecha de corte. Cada muestra colectada fue etiquetada y guardada en bolsas. Las muestras se secaron en estufa a 70 ºC durante al menos 4 días. Los cortes se realizaron a los 30, 60 y 90 días a partir de la fecha de siembra.



Sitios donde se realizaron cortes para la calibración

Sitios en seguimiento

Figura 3: Ubicación de los predios donde se realizaron los cortes para la calibración del sistema y aquellos donde se realiza el seguimiento forrajero.

CA	Elibel	1
	Gloria Noya	4
	Jorge Noya	3
	Morales	1
	Sergio Torterolo	1
ES	Fernando Gutierrez	5
	Guillermo Clements	8
	Pablo Bordaberry	7
FL	Gualconda 1	9
	Gualconda 2	5
	Los Buhos	17
LN	EEMAC	4
	San Manuel	5
	San Sebastián	11
LS	Batistti	6
	Bell	3
	El rumbo	6
R1	Bonino	2
	Bonino 2	8
	Klassen	2
	La Horqueta	9
	La Rabida	10
	Soria	2

SJ	Berot	2
	Carlett	6
	Carlos Torterolo	6
	El Pilar	9
	El Totoral	3
	Flores Placeres	2
	La Laguna	1
	Nazabal	4
	Reinante	1
	Rincón de Albano T1	2
	Rincón de Albano T2	5
	San Marcos	7
	Santa Carolina	6
	Víctor Hugo DeLeón	3
SR	Los Naranjales U1	9
	Los Naranjales U2	6
	SfC33	4
	SPLSR	6
	Suave Brisa	1

Sitios de corte
n° potreros por productor

Figura 4: Nombre de los productores que colaboraron con el proyecto y el número de potreros por establecimientos. Los marcados con rojo representan a los sitios de corte.

La segunda fuente de información utilizada para calibrar el sistema fue la generada en el marco del proyecto Alimentación – Reproducción llevado a cabo por Conaprole durante los años 2003-2005. Dado que los sitios donde se realizaron los cortes no cumplían con las

condiciones que se plantearon anteriormente, se debió desarrollar una metodología específica, denominada “desdoblamiento espectral”, para poder utilizar dicha información. El desarrollo estuvo a cargo del LART-FAUBA, y consiste en la combinación de dos sensores satelitales y los datos de corte.

Desdoblamiento Espectral

Para los datos generados durante 2003-2005 fue necesario combinar la información espectral que proveen dos sensores con distinta resolución espacial: MODIS y LANDSAT. La razón para usar estos dos sensores fue que los potreros en donde se estimó la productividad tienen un tamaño menor al del píxel o mínima unidad de observación (5,3 ha) del sensor que tiene mayor detalle en el tiempo (paso diario, imágenes MODIS). En cambio, el sensor que tiene píxeles más pequeños (0,9 ha, imágenes Landsat) y que permiten caracterizar razonablemente bien a los lotes en pastoreo no asegura un buen detalle en el tiempo (3 ó 4 imágenes por año). Sabemos que la cobertura de los recursos forrajeros (estimada a partir de la fRFAA) varía a lo largo del año de acuerdo con la fenología de las especies, y que la resolución temporal de MODIS es lo suficientemente alta como para caracterizarla, pero la superficie de los potreros o parcelas de pastoreo en los tambos (en muchos casos menores a 5 ha) demanda mayor resolución espacial (Figura 5). Por lo tanto se desarrolló una metodología que permitiera aprovechar la ventaja del detalle temporal de las imágenes MODIS con la mejor resolución espacial de las imágenes LANDSAT.

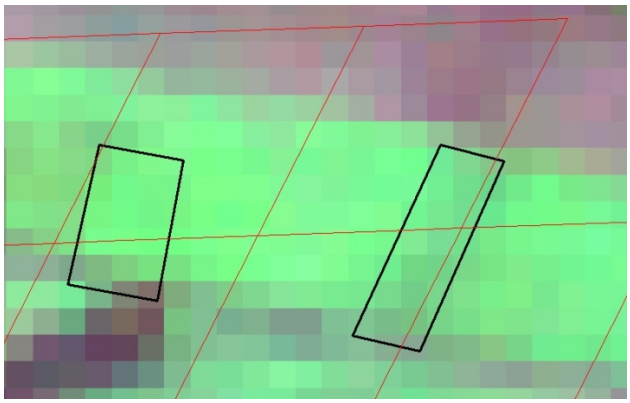


Figura 5: Ejemplo de la escasa superposición entre los potreros y los píxeles Modis. Sobre una imagen LANDSAT se presentan los límites de los potreros de Arrambide (en negro) y los píxeles de la imagen MODIS (en rojo).

El desarrollo de la metodología para procesar los datos de tasa de crecimiento para el período 2003-2005 requirió de probar el supuesto de efectos aditivos, es decir, la señal espectral de un pixel MODIS puede ser explicada por la señal de los píxeles LANDSAT contenidos dentro de ese pixel MODIS. En la Figura 6 puede observarse que tanto el NDVI como el EVI de un pixel MODIS pueden ser explicados mayormente por el promedio del NDVI de los píxeles LANDSAT contenidos en él. Esto fue probado tanto para pixeles MODIS puros (Figura 7a), es decir que coincidieron en su totalidad con una cobertura, como en píxeles impuros que son los que coincidieron con más de una cobertura (Figura 7b, correlaciones no mostradas).

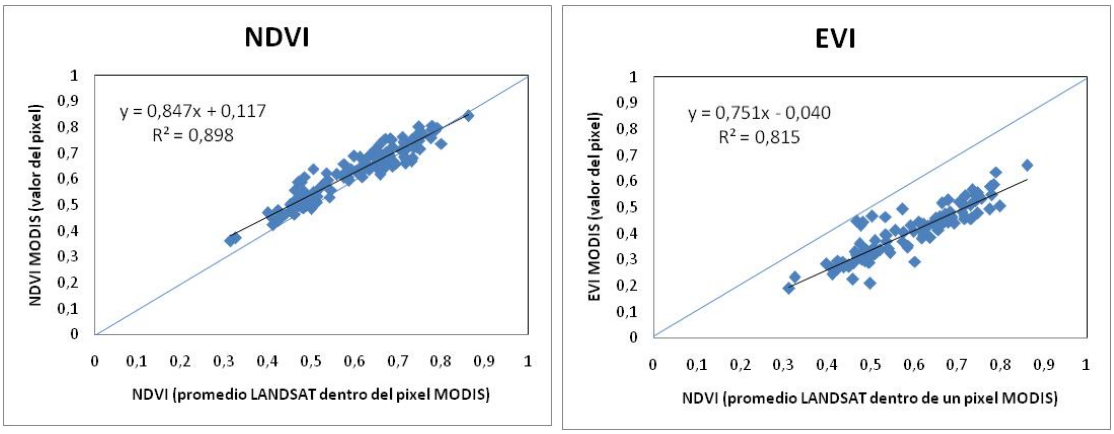


Figura 6: Valores de NDVI y EVI de píxeles MODIS en función del NDVI promedio de los pixeles LANDSAT que contiene cada pixel MODIS.

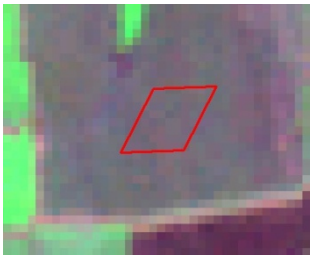


Figura 7a: En rojo un píxel MODIS (5,3 ha) que incluye un solo tipo de cobertura, también llamado píxel "puro". Los píxeles más pequeños coloreados son los correspondientes a la imagen Landsat (0,9 ha).

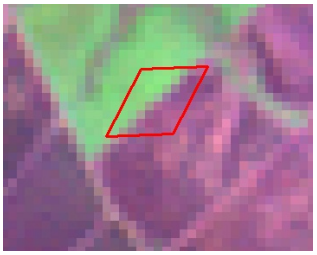


Figura 7b: En rojo un píxel MODIS (5,3 ha) que incluye dos tipos de coberturas, también llamado píxel "no puro". Los píxeles más pequeños coloreados son los correspondientes a la imagen Landsat (0,9 ha).

Los píxeles de las imágenes LANDSAT que se promediaron siempre fueron puros, es decir que correspondían a un único tipo de recurso forrajero. En los píxeles MODIS "no puros" se calculó el promedio ponderado de los píxeles LANDSAT según la superficie ocupada por cada cobertura (Figura 8). Primero se calculó el promedio del valor de NDVI LANDSAT para cada cobertura con píxeles puros y luego se estimó el valor de la mezcla multiplicando al NDVI por la proporción que ocupaba cada superficie (ver Ejemplo 1).

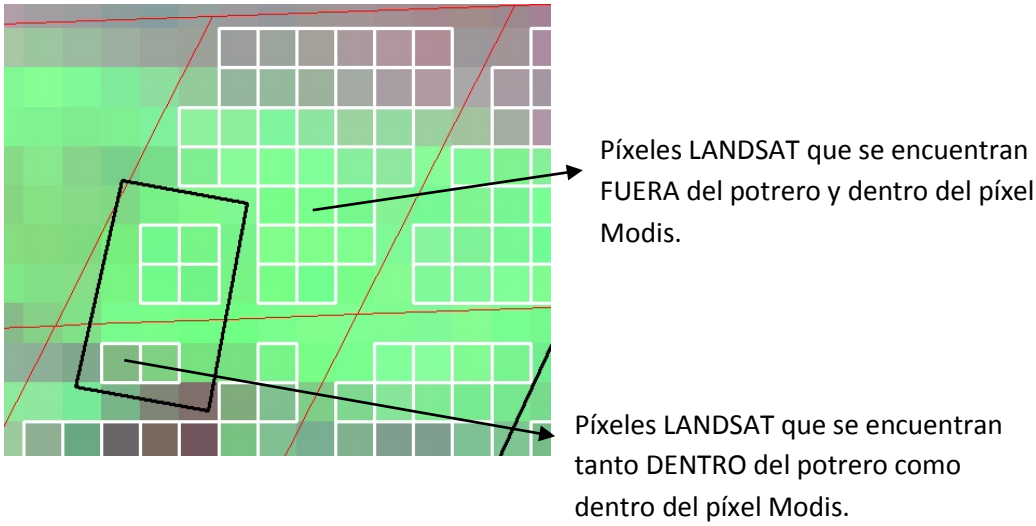
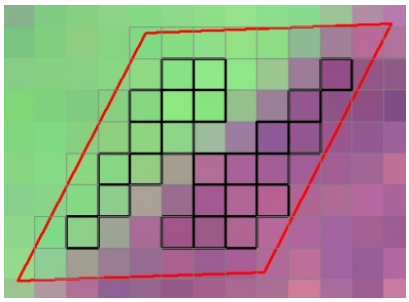


Figura 8: Superposición de píxeles en el potrero del campo de Arrambide donde se hicieron estimaciones de tasa de crecimiento de forraje. El polígono de línea negra corresponde al perímetro del potrero, en rojo se presentan los píxeles MODIS y en blanco los píxeles LANDSAT puros.



Ejemplo 1: La cobertura "A" (en verde) ocupa el 47% del pixel MODIS y la cobertura "B" (en violeta) el 53%. El promedio de NDVI (LANDSAT) de la cobertura "A" estimado con 11 píxeles puros es 0,81 y el de la cobertura "B" estimado con 13 píxeles puros es 0,32. Según el supuesto de aditividad, el valor esperado o predicho de NDVI de un pixel MODIS (rombo rojo) sería igual a la suma de los índices ponderada por la superficie.

*NDVI (promedio landsat dentro de píxel modis) = 0.81 * 0.47 + 0.32 * 0.53*

Evaluamos en qué medida este valor predicho se correlacionó con los valores observados.

Como el supuesto de aditividad no fue rechazado se pudo desarrollar la metodología para estimar la fRFAA con la resolución temporal que provee MODIS y la espacial de LANDSAT. El caso que sigue es un ejemplo de los cálculos para los cortes realizados en el potrero del establecimiento de Arrambide, y que se repitieron en el resto de los establecimientos (Arancio, Cabrera, Clements, Noya, Rivoir, Tortarelo).

Para el primer conjunto de datos, los cortes de biomasa se realizaron entre fines de abril de 2003 y noviembre de 2004, que para la escena LANDSAT en la que se encuentran los potreros (224-83) sólo estuvieron disponibles 4 imágenes en cada año (Figura 9; algo similar para el resto de los potreros/establecimientos). Entonces, para aumentar la resolución temporal se combinaron los 4 valores disponibles en ese año (provistos por LANDSAT) con los que provee MODIS con menor resolución espacial (Figura 5).

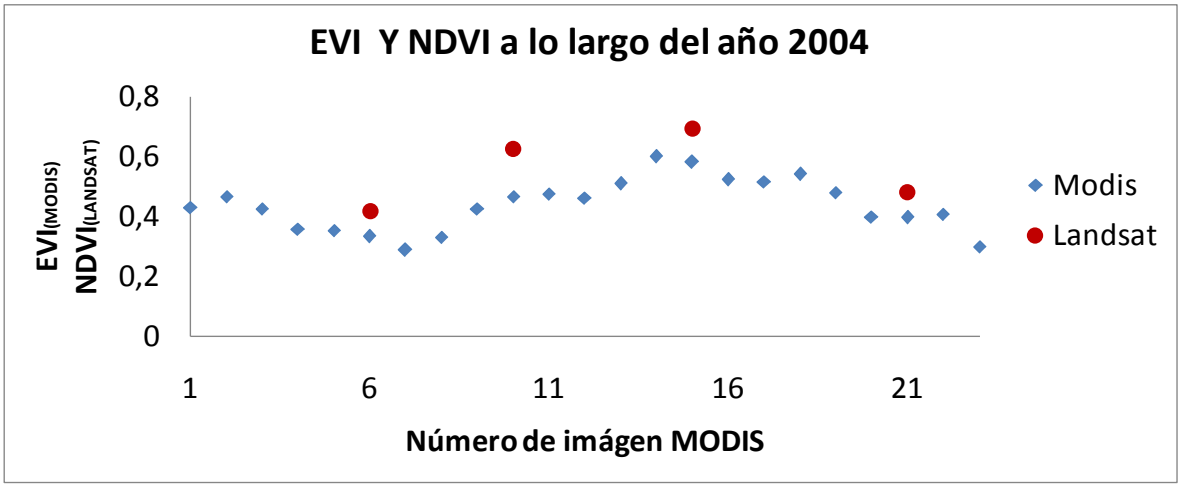


Figura 9: Valores de EVI provistos por MODIS para 23 fechas a lo largo de un año y de NDVI provistos por Landsat para 4 fechas. El eje X corresponde al número de imagen MODIS, cada una abarca un periodo de 16 días (la imagen 1 corresponde al 1 de enero). Los rombos celestes representan el valor EVI del pixel MODIS según la fecha y los círculos rojos el valor de NDVI calculado como el promedio ponderado de los pixeles LANDSAT.

De este modo, en ambos conjuntos de datos, para cada potrero se calculó el promedio ponderado del EVI durante el periodo de corte. Por ejemplo, para calcular el EVI coincidente con el período entre el 04/06/2004 y el 31/07/2004 (uno de los períodos para el que se estimó la productividad) se tomaron los 3 valores de EVI correspondientes a las 3 imágenes MODIS con una cobertura de 16 días cada una. Cada valor se ponderó por su coincidencia temporal con el período y luego se calculó el promedio. Por último, la fracción de la radiación fotosintéticamente activa fRFA que es absorbida por la vegetación fue estimada para cada período como una función lineal del EVI según Oyarzabal et al. (2011) (Figura 10).

La radiación fotosintéticamente activa incidente en un sitio depende principalmente del momento del año y, tomando períodos de por ejemplo un mes de duración, es muy poco variable entre años. Para los sitios analizados se utilizaron los valores promedio (1995-2004) de la radiación medida en la estación meteorológica de Colonia. La radiación absorbida (RFAA) para cada período de corte se obtuvo a partir del producto entre la radiación incidente diaria (RFA) por la fracción interceptada (fRFAA) estimada para cada período a partir del EVI tal como se detalló más arriba. Por último, la eficiencia en el uso de la radiación se estimó para cada período como el cociente entre la productividad (PPNA) y la radiación absorbida (RFAA; Figura 6).

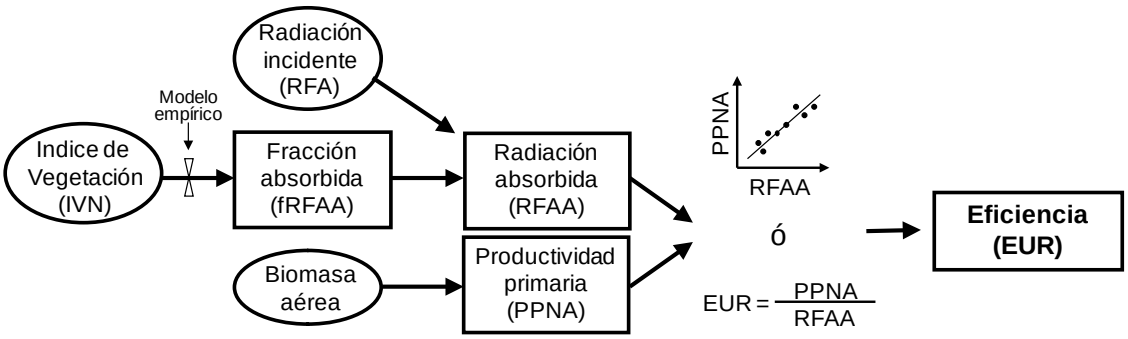


Figura 10: Esquema de la calibración entre datos de crecimiento y lecturas satelitales seguido en este informe para estimar la Eficiencia en el Uso de la Radiación de pasturas y verdeos. A partir de un Índice de Vegetación (EVI) y de un modelo empírico (ver texto) se calculó la Fracción de la radiación fotosinteticamente activa que es absorbida (fRFAA) en los sitios y períodos coincidentes con las cosechas de biomasa aérea. El producto entre la Fracción absorbida y la Radiación incidente (RFA) estimó la Radiación fotosinteticamente activa que es absorbida (RFAA). Por otro lado, a partir de cosechas de biomasa aérea se estimó la Productividad primaria neta aérea (PPNA). Finalmente, la estimación de la EUR se calculó mediante el cociente entre la Productividad primaria y la Radiación absorbida. En círculos se muestran las variables necesarias para la estimación de la EUR, y en rectángulos las variables estimadas (Oyarzabal et al. 2011).

Establecimientos en seguimiento

Una vez calibrado el sistema se procedió a seleccionar establecimiento lecheros remitentes a Conaprole que cumplieran con la condición de tener pixeles "puros" o 90% puros (Figura 11). En total se seleccionaron 212 potreros abarcando 42 establecimientos. Cada establecimiento fue digitalizado e incorporado a un Sistema de Información Geográfico que permitiera realizar procesos necesarios (Clip, merge, unión) para ingresar los datos al Sistema SEGF. Cada productor fue contactado por el equipo técnico con el fin de solicitar la información de los recursos forrajeros de cada potrero, así como también para explicar de manera sencilla el proyecto llevado a cabo, y así poner en conocimiento al público objetivo.

Figura 11: Establecimiento seleccionado para el seguimiento satelital. Se identifican los potreros (líneas negras) y los píxeles puros (rojos) y no puros (amarillos).

RESULTADOS OBTENIDOS

Calibración

Durante 2003-2005 se estimaron un total de 98 pares de datos productividad y radiación absorbida, y con ellos igual cantidad de estimaciones de eficiencia en el uso de la radiación (EUR). Las estimaciones de EUR corresponden a pasturas dominadas por alfalfa (n=33), pasturas con otras especies (n=60) y verdeos de avena (n=5). Durante 2012-13 se realizaron 66 estimaciones de eficiencia en el uso de la radiación, en pasturas dominadas por alfalfa (13), pasturas con otras especies (28), verdeos de invierno (11) y verdeos de verano (14). La EUR varió entre valores cercanos a 0 y 6 g/MJ (Figura 12). La EUR de los verdeos de invierno fue en promedio de aproximadamente 1 g/MJ y relativamente similar entre cultivos de avena y raigrás (datos de 2012-13) y otros de composición florística que ahora se desconoce pero que probablemente haya sido con las mismas especies (datos 2003-05; Figura 12). La EUR de las pasturas fue en promedio aproximadamente similar a la de los verdeos de invierno, de 1g/MJ (Figura 12), excepto por el caso de una pastura de primer año implantada con un cultivo de trigo, cuyos valores más altos (superiores a 2 g/MJ) corresponden a fechas durante el invierno y la primavera temprana (Figura 12). La EUR de las pasturas no fue afectada por la presencia de la alfalfa ni tampoco varío de acuerdo al conjunto de datos (2003-05 y 2012-13; Figura 12). La EUR de los verdeos de verano fue en promedio superior a 2 g/MJ y algo más variable entre fechas que la EUR del resto de los recursos forrajeros, especialmente en el caso del maíz (Figura 12). La EUR del maíz fue levemente mayor a la del sorgo (Figura 12).

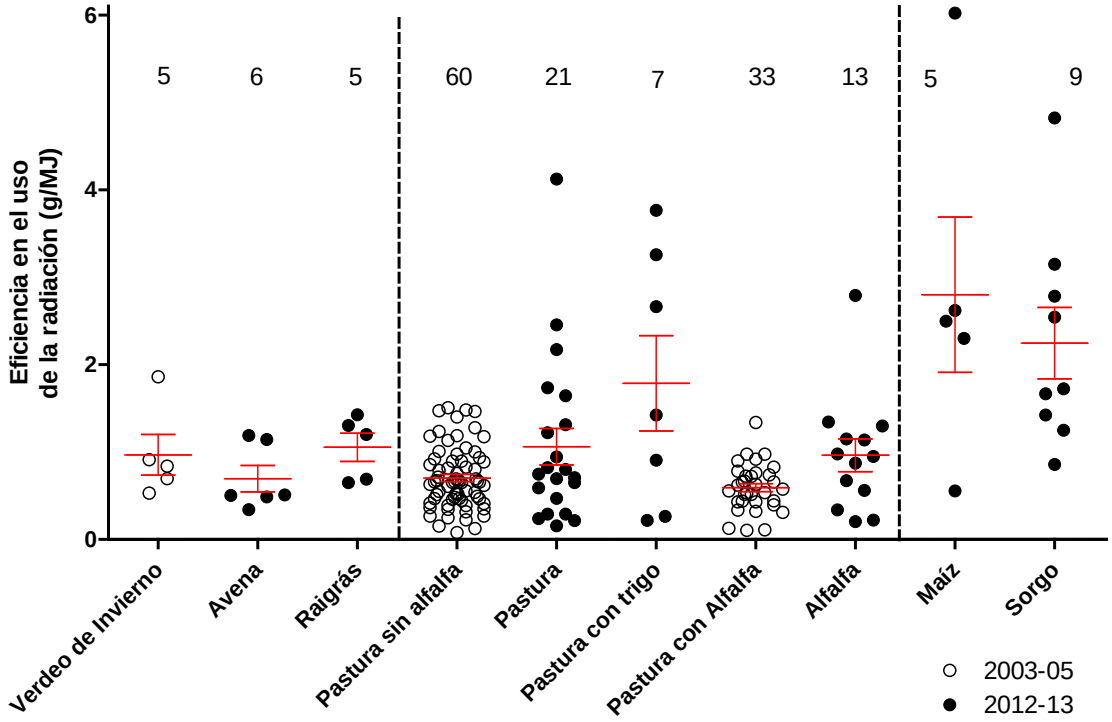


Figura 12: Eficiencia en el uso de la radiación de verdeos de invierno, pasturas y verdeos de verano estimadas a partir de datos generados durante 2003-05 y 2012-13. En cada conjunto de puntos existen estimaciones hechas en uno o varios potreros a través del tiempo. Las barras corresponden a la media más/menos un error estándar.

Tasas de Crecimiento

Por recurso

Los resultados de tasas de crecimiento obtenidos a través de sensores remotos están dentro de lo esperado por distintas evaluaciones hechas a campo durante años anteriores por el INIA y la Facultad de Agronomía (UDELAR). A continuación se muestra, para cada recurso forrajero, la evolución mensual promedio para el período 2007-2013 de la tasa de crecimiento (Figura 12 a, b, c y d):

Praderas de primer, segundo y tercer año:

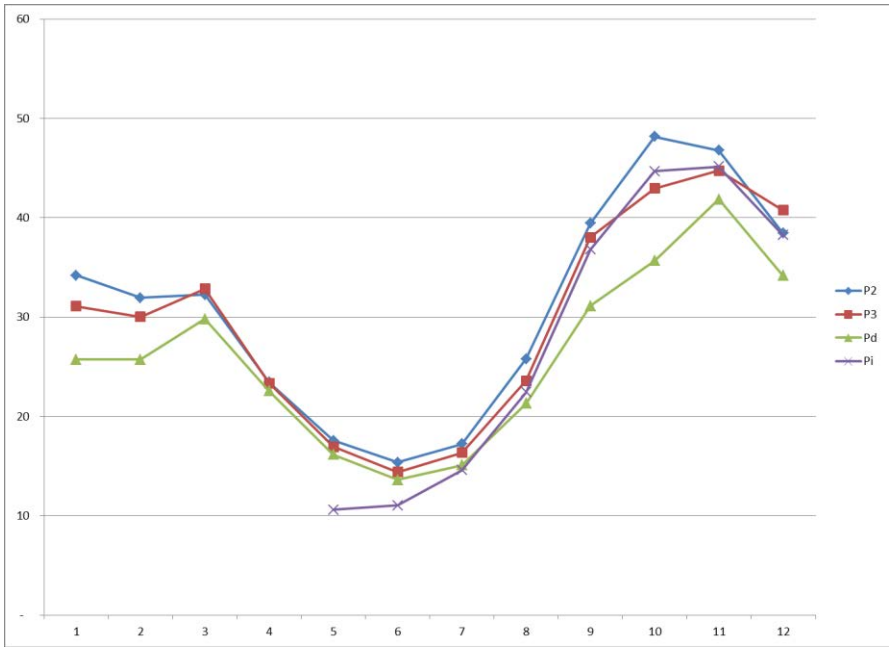


Figura 12a: Tasas de crecimiento otorgadas por el Seguimiento forrajero para Pradera con festuca de distintas edades. Serie 2007-2013

Alfalfas de primer, segundo y tercer año

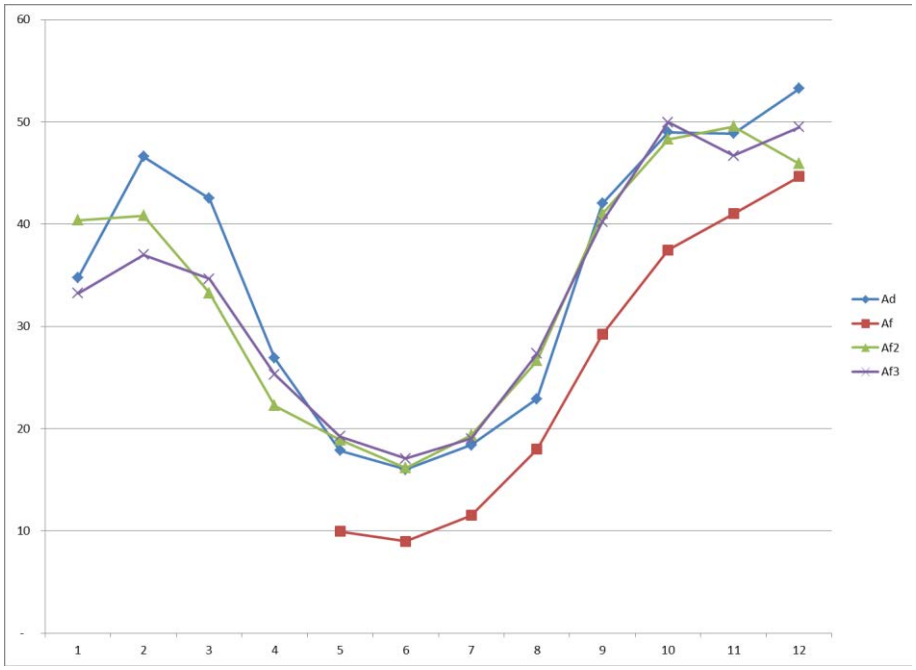


Figura 12b: Tasas de crecimiento otorgadas por el Seguimiento forrajero para Alfalfas de distintas edades. Serie 2007-2013

Verdeos de Invierno: Raigrass y Avena

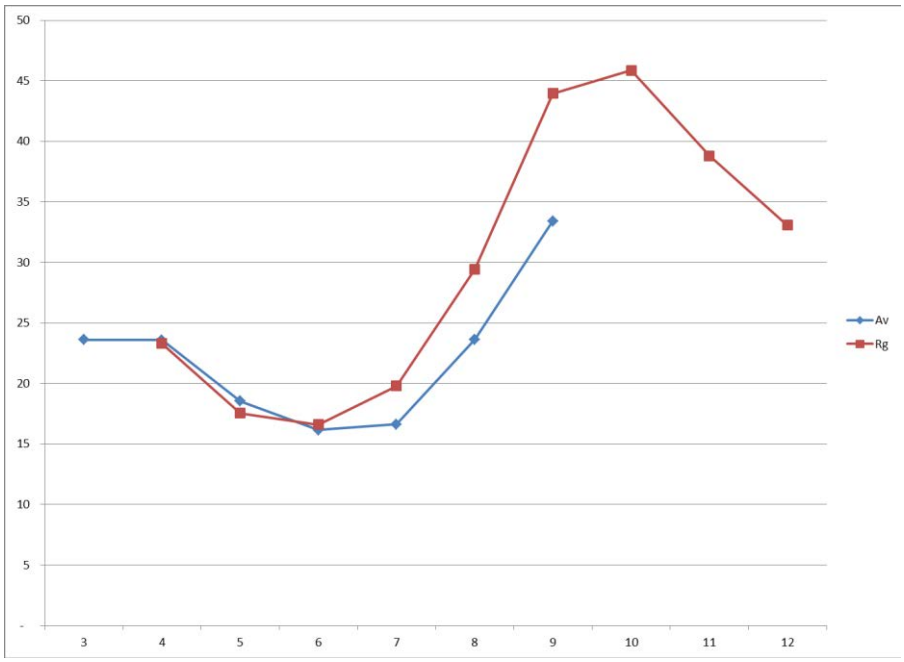


Figura 12c: Tasas de crecimiento otorgadas por el Seguimiento para Verdeos de Invierno (Avenas y Raigras)- Serie 2007-2013

Verdeos de Verano: Maíz, Sorgo Forrajero y Sorgo Granífero

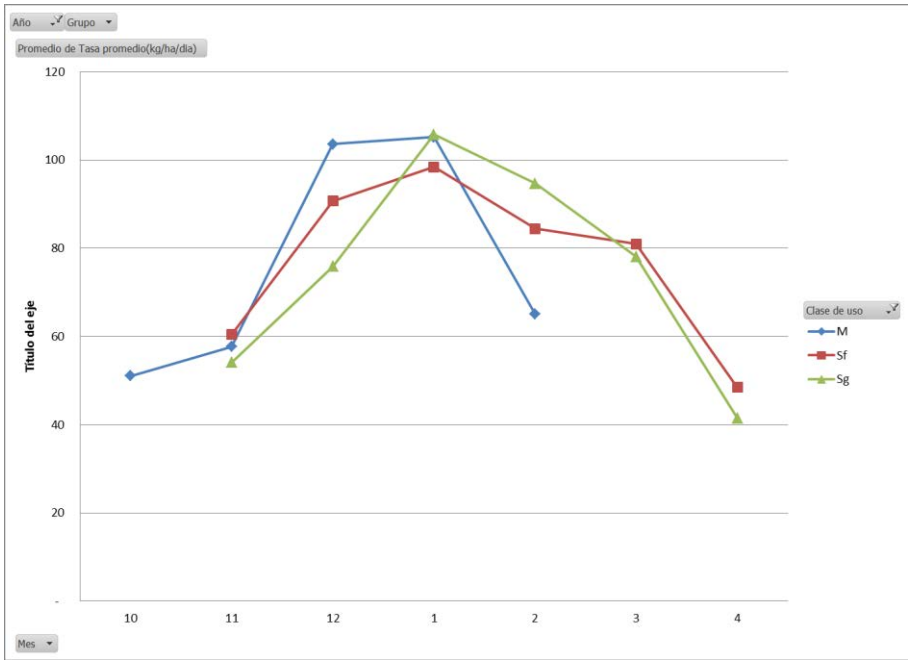


Figura 12d: Tasas de crecimiento otorgadas por el Seguimiento forrajero para Cultivos de Verano (Maíz – Sorgo Forrajero- Sorgo granifero) Serie 2007-2013

Por año

Otro de los análisis realizados fue la evaluación de las tasas de crecimiento de los recursos forrajeros para los distintos. Los resultados para praderas de segundo año en base a festuca se muestran en las Figuras 13a y para los maíces en la Figura 12b. Los resultados coinciden con los generados por INIA y Facultad de Agronomía. Las praderas de segundo año mostraron diferencias entre los años posiblemente explicado por los años más y menos lluviosos. La mayor variabilidad ocurrió durante los meses cálidos, mientras que en invierno y primavera no hubieron diferencias. EN lo que respecta a los maíces, también mostraron diferencias entre los años apareciendo el 2011 como el año con mayor tasa de crecimiento acumulada. Los máximos valores se dieron entre diciembre y enero dependiendo del año.

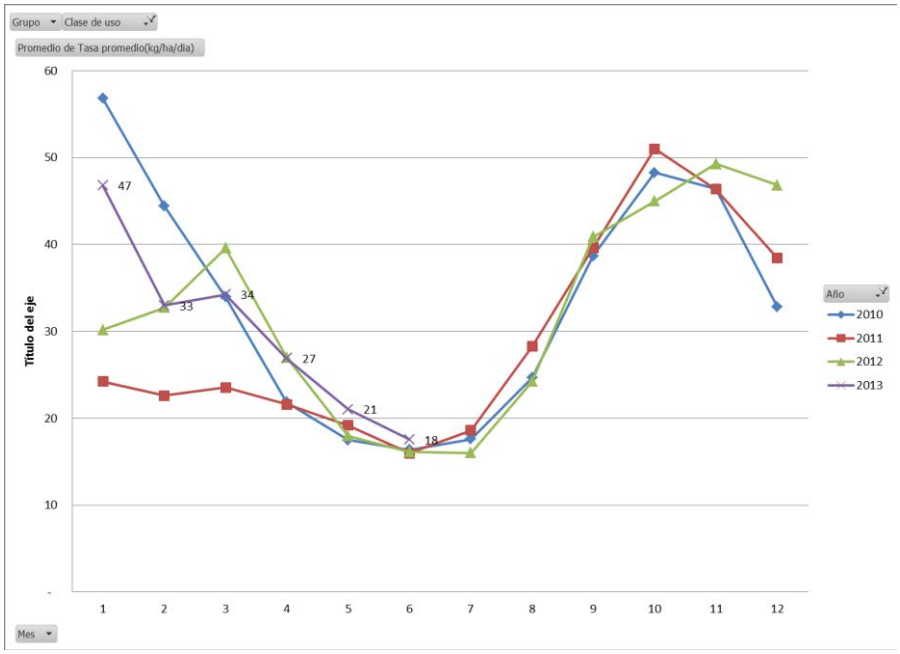


Figura 13a: Tasas de crecimiento otorgadas por el Seguimiento forrajero para Praderas de segundo año con Festuca.

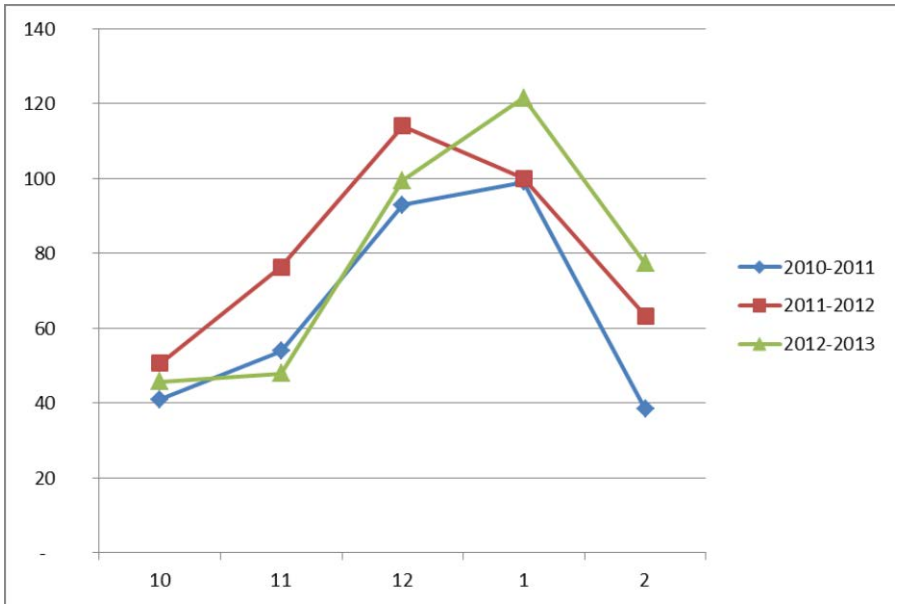


Figura 13b: Tasas de crecimiento otorgadas por el Seguimiento forrajero para el cultivo de maíz en las últimas 3 temporadas.

Cuando se realizo el analisis de la informacion diferenciando entre las zonas administrativas de CONAPROLE, no se encontró una relacion directa entre las diferentes regiones (Figura 14). Se puede apreciar una mayor variabilidad entre potreros de una misma zona que entre zonas (Figura 15). Seguramente esto tenga mucho más que ver con el manejo realizado que con el lugar fisico donde se encontra.

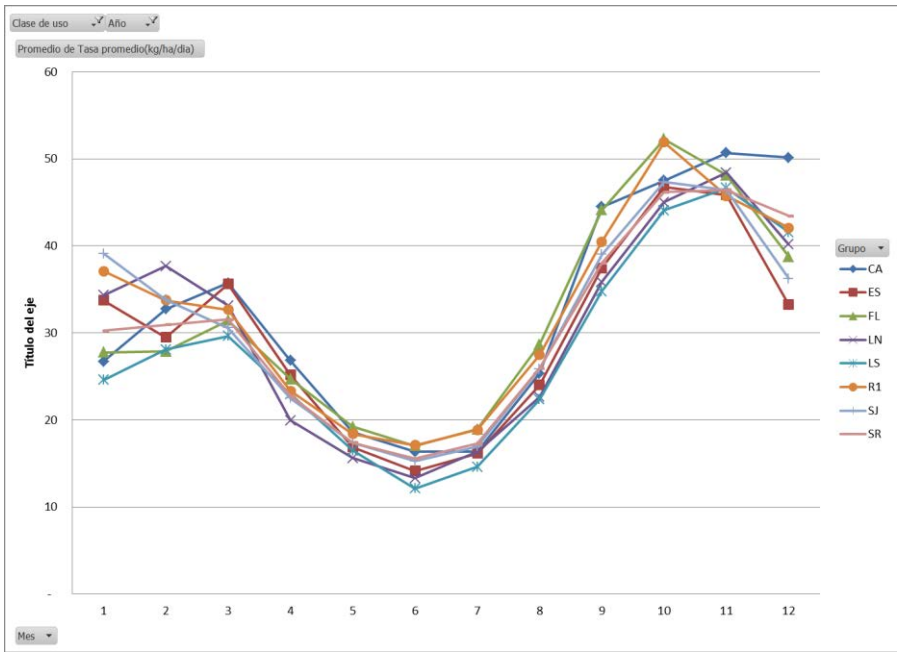


Figura 14: Tasas de crecimiento otorgadas por el Seguimiento forrajero para alfalfas de 2° año de distintas zonas de la cuenca de Conaprole.

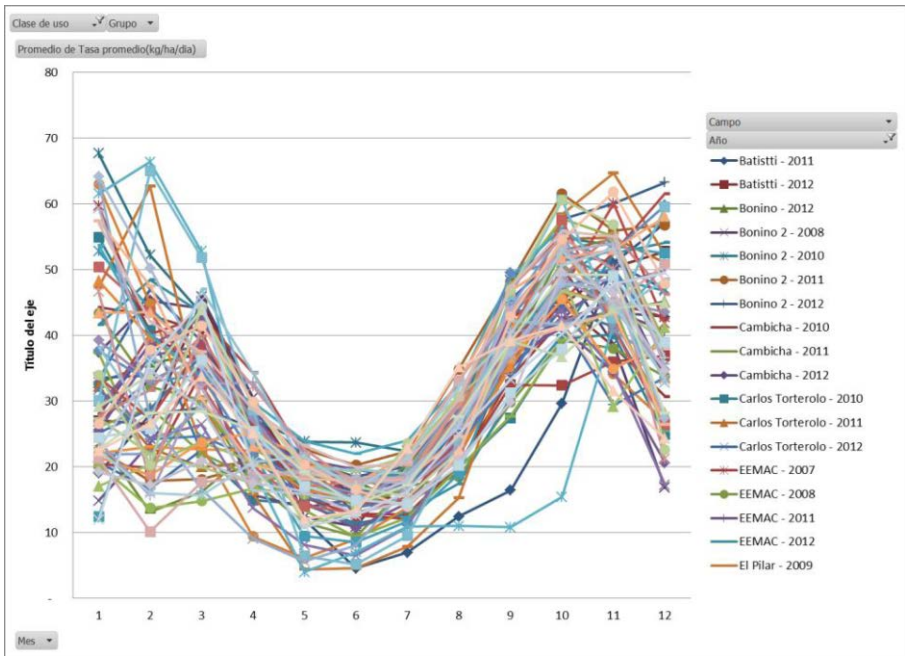


Figura 15: Tasas de crecimiento otorgadas por el Seguimiento forrajero para praderas de 2° año durante varios años y para distintos productores del proyecto.

DIFUSION Y DIVULGACION

Portal Lechero

La información generada de las tasas de crecimiento, medidas a partir de sensores remotos, está disponible en el portal lechero (www.eleche.com.uy o desde la página institucional de Conaprole/Portal Lechero). Cada productor o su técnico asesor que esté registrado como usuario podrá ingresar al portal y consultar la información para su zona o para la totalidad de la cuenca lechera. Una vez dentro del portal, vamos a la opción Proyectos, y dentro de éste a Seguimiento Forrajero Satelital (Figura 16.). Cabe destacar que el uso de esta herramienta no tiene ningún costo para el productor o técnico.

Figura 16: Ingreso al Portal Lechero de Conaprole para la visualización de las tasas de crecimiento.

Una vez dentro de Seguimiento Forrajero Satelital, se puede acceder a cinco diferentes reportes, como muestra la Figura 17. El reporte 1 muestra la tasa de crecimiento del último mes disponible en kg de materia seca por día, para mi zonal y el promedio general (todas las zonas). El reporte 2 presenta la tasa de crecimiento mensual y el acumulado desde el inicio del ciclo (enero en praderas, febrero en verdeos de invierno, octubre en verdeos de verano) para el recurso forrajero seleccionado. Por ello debo primero seleccionar el recurso forrajero apretar el botón consultar para que genere el reporte. Para salir de cualquier reporte y volver al menú principal, debo presionar el botón volver abajo en la pantalla.

Los reportes 3 y 4 muestran la evolución mensual de la tasa de crecimiento por zona (reporte 3) o para todas las zonas juntas (reporte 4), los kilos acumulados de cada uno de los últimos tres años, y el promedio de los últimos cinco años (Figura 18). Cada curva se genera para cada recurso forrajero, por eso primero se debe seleccionar éste y oprimir el botón de consultar.

El reporte 5 muestra para el recurso forrajero consultado, la tasa de crecimiento del último mes disponible en las distintas zonales cuando pasamos con el mouse sobre la zonal (Figura 19).

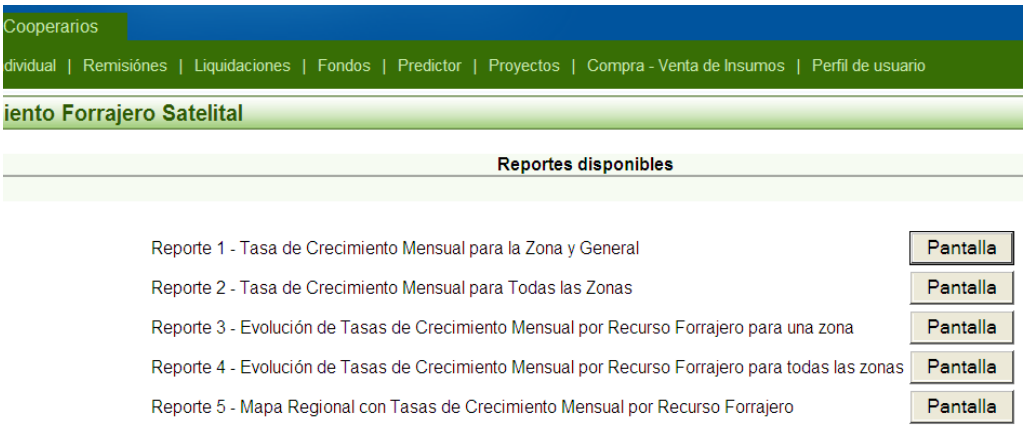


Figura 17: Reportes generados en función de las tasas de crecimiento.

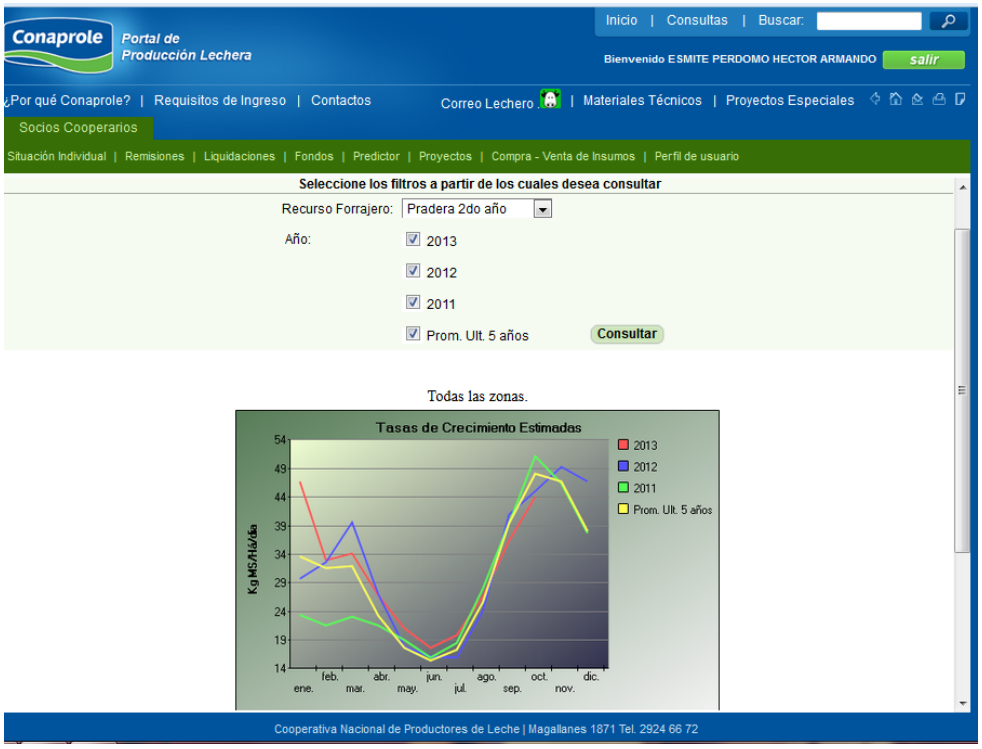


Figura 18: Reporte 4 conteniendo las tasas de crecimiento promedio para toda la cuenca lechera para el mes corriente.

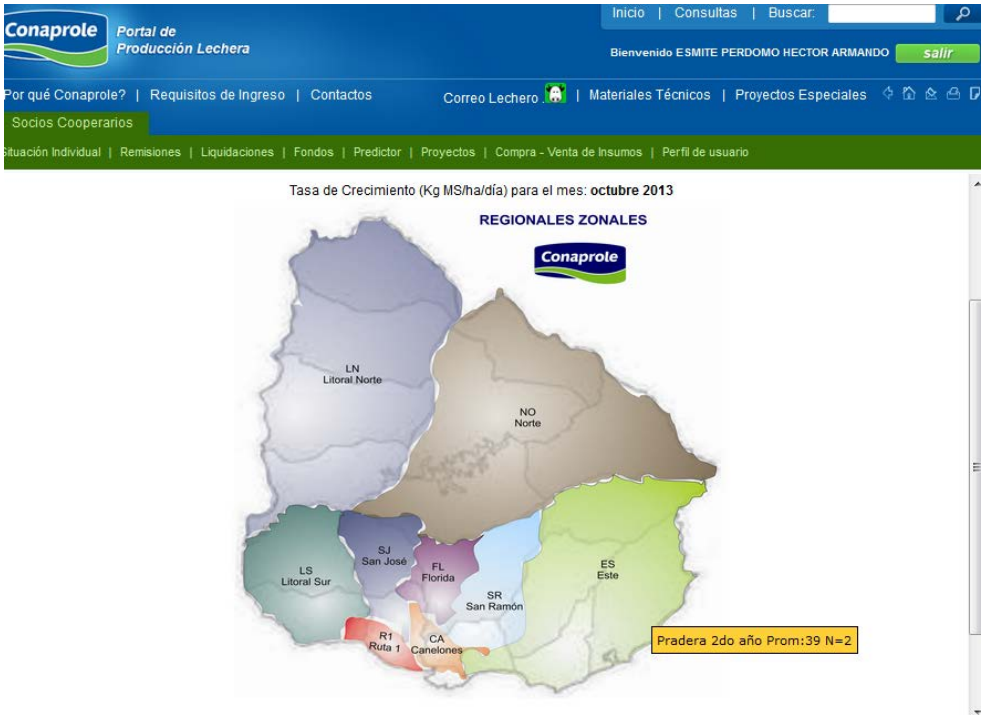


Figura 19: Reporte 5 con el mapa de zonales y datos de tasas de crecimiento para el mes corriente

<u>Otros medios</u>

Por otro lado, se realizaron tareas de difusión y divulgación de los resultados, metodología utilizada y aplicabilidad de los datos a través de diferentes medios. Uno de ellos fue a partir de la generación de un tríptico (Figura 20). El mismo contiene información básica de la metodología utilizada, los recursos en seguimiento y detalles para la incorporación de nuevos predios al seguimiento satelital. También se realizaron entrevistas a dos canales de televisión abierta; Agroinforme, correspondiente a Televisión Nacional Uruguaya y Cerro Rural, correspondiente al canal 10. Asimismo se realizaron al menos 3 entrevistas en radios, entre ellas… GABRIEL VOS LO TERMIOAS DE COMPLETAR?

Un indicador claro del impacto de esta información, sobre los productores y técnicos, es el número de visitas que recibe la página web. Desde agosto (mes que se inició la difusión vía web de la información) hasta octubre de 2013, se hicieron 643 visitas, de las cuales 549 correspondieron a productores y 94 a técnicos asesores. Las visitas pertenecieron a 383 Productores y 60 técnicos.

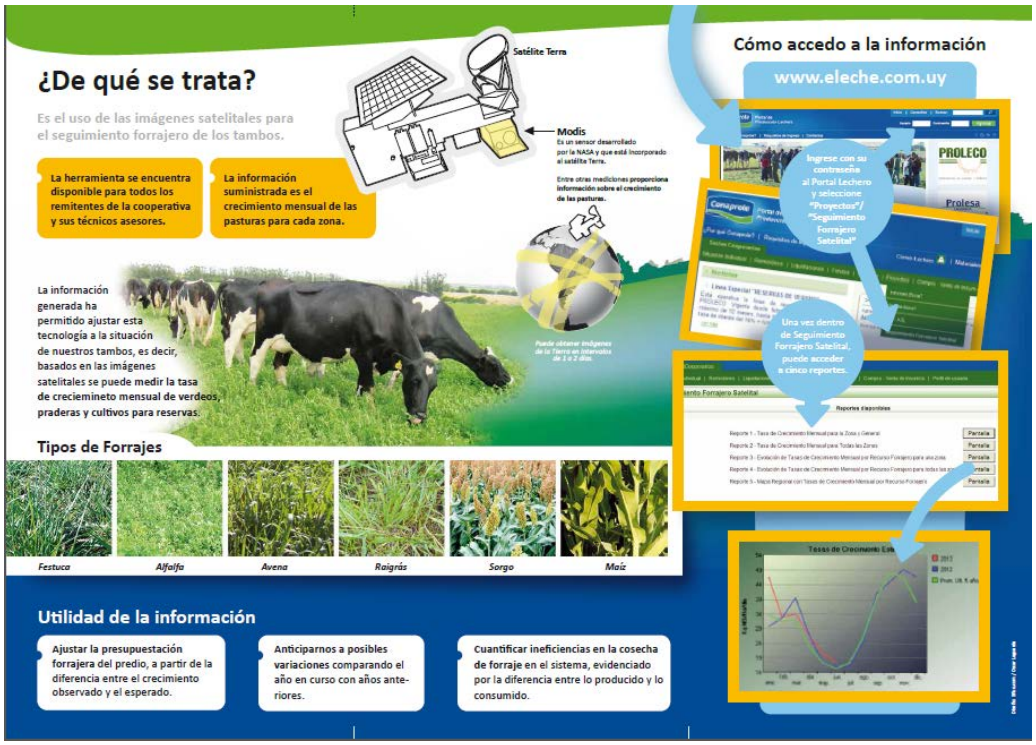


Figura 20: Tríptico generado para la difusión a productores y técnicos de la herramienta tecnología aplicada en el proyecto.

APLICACIONES

Disponer de información actualizada sobre el crecimiento de las pasturas nos permite:

- Ajustar la planificación forrajera del predio, los consumos de suplementos y concentrados, la carga.
- La comparación del año en curso con anteriores nos permite anticiparnos a posibles variaciones en cuanto a disponibilidad de forraje tanto para pastoreo directo o reservas evitando o minimizando "sorpresas". Ver y comparar las curvas nos permite cuantificar en términos de kilos como viene este año en producción de forraje respecto a los anteriores.
- Cuantificar ineficiencias en la cosecha del forraje en el sistema, evidenciado por la diferencia entre lo producido y lo consumido.
- Reestimar costos del alimento "pasto" producido, basados en el total de kilos acumulados durante el período productivo de los distintos recursos forrajeros.

CONCLUSIONES

El presente proyecto permitió implementar una herramienta tecnológica para el seguimiento de las pasturas y cultivos forrajeros, basado en imágenes satelitales, en sistemas lecheros de Uruguay. La información generada presenta una alta calidad debido al proceso de calibración realizado durante el proyecto. Adicionalmente se logró capacitar recursos humanos para la instalación de un laboratorio de seguimiento forrajero en la empresa CONAPROLE. Actualmente CONAPROLE se encuentra en proceso de incorporación de nuevos establecimientos lo que permitirá aumentar la disponibilidad de datos para las diferentes zonas, así como también hacer más robusta a información.

AGRADECIMIENTOS

Técnicos:
Sandra Zibil
Federico Michellini
César Lecuna
Inés Arrieta
Marcos Algorta
Elsa Leoni (FCIEN)
Luis López (FCIEN)
Priscila Pintos (LART)
Dolores arocena
Mariano Oyarzabal

Instituciones:
Facultad de Agronomía

Facultad de Ciencias

Productores
Gloria Noya
Pablo Pérez
Carlos Torterolo
Daniel Vago
Sociedad de Productores de Leche San Ramón
Sociedad de Fomento Colonia 33
Andrés Mercader
Ignacio Goycochea
La horqueta
La Rabida
Todos los productores de la primer vuelta

Asesores
Clever Machín
Carmen Fugazot
José Luis Salas
Diego Rodríguez
Carlos Grela
Omar Lista
Diego Ibarra

BIBLIOGRAFÍA