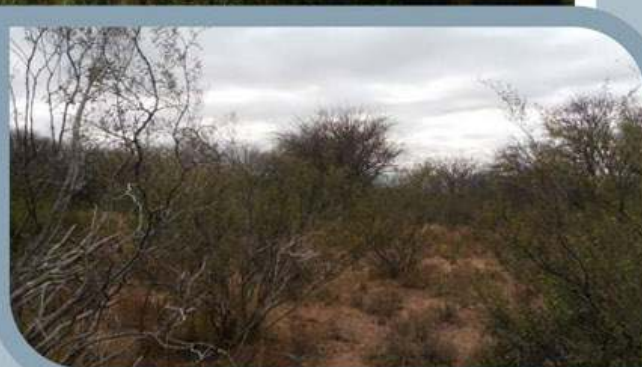


# Modelado y predicción de la productividad neta de forraje en el árido-semiárido de la provincia de La Pampa

Pablo Vázquez, Edgardo Adema, Enrique Llorens, Lucas Butti, Sol Poey, Ivana Stefanazzi, Francisco Babinec



# Modelado y predicción de la productividad neta de forraje en el árido-semiárido de la provincia de La Pampa

---

**Vázquez, P.<sup>1</sup>, Adema, E.<sup>1</sup>, Llorens, E.<sup>2</sup>,  
Butti, L.<sup>3</sup>, Poey, S.<sup>4</sup>, Stefanazzi, I.<sup>4</sup>  
& Babinec, F.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> EEA INTA Anguil “Ing. Agr. Guillermo Covas”  
RN 5 km 580, (6326) Anguil, La Pampa.  
[vazquez.pablo@inta.gob.ar](mailto:vazquez.pablo@inta.gob.ar)

<sup>2</sup> Dirección de Extensión Agropecuaria de la  
Subsecretaría de Asuntos Agrarios del Ministerio de la  
Producción de la provincia de La Pampa. Calle 15 N°  
1475. Victorica (6319). Loventué, La Pampa.

<sup>3</sup> AER INTA General Acha. Avellaneda 547, (8200)  
General Acha, La Pampa.

<sup>4</sup> AER INTA Victorica. Calle 15 N° 1475. Victorica (6319).  
Loventué, La Pampa.



Proyecto Regional INTA PAMSL 1282102: Caldenal-Monte Occidental  
EEA Anguil “Ing. Agr. Guillermo Covas”  
**Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria**

---

**Diseño Gráfico**

Dis. Gráf. Francisco Etchart

**Impresión**

Gustavo J. Moyano

Impreso en los talleres gráficos de la EEA INTA Anguil

“Ing. Agr. Guillermo Covas”

Tirada de 500 ejemplares

*Septiembre de 2016*

**EDICIONES INTA**

Centro Regional La Pampa-San Luis

EEA INTA Anguil “Ing. Agr. Guillermo Covas”

RN N°5 Km 580, CP 6326, Anguil, La Pampa, Argentina

# Resumen

## **TÍTULO CORTO: MODELADO DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA EN SEMIÁRIDOS**

Se desarrolló un modelo para estimar productividad primaria neta aérea de herbáceas forrajeras (PPNA) en el árido-semiárido de La Pampa, Argentina, considerando a la densidad de plantas y la precipitación antecedente como principales componentes de rendimiento. El modelo fue construido a partir de información proveniente de un ensayo llevado a cabo en la localidad de Chacharramendi entre los años 2001 y 2011. La densidad de herbáceas forrajeras al final de la estación de crecimiento fue modelada considerando el índice verde normalizado (IVN), la precipitación acumulada de una y dos estaciones de crecimiento antecedentes como predictores ( $R^2=0.98$ ,  $RMSE=1.43$ ). La PPNA fue modelada a partir de la precipitación acumulada durante las dos estaciones de crecimiento previas a la evaluada y la densidad de herbáceas modelada al final de ciclo ( $R^2=0.84$ ,  $RMSE=1048$ ).

Para corregir esta estimación de oferta forrajera y aproximarlos a valores más reales a las observadas a campo, se modeló la presencia de procesos de lignificación en la provincia de La Pampa a partir de series temporales de índice verde normalizado (IVN) provenientes del sensor MODIS Terra y el algoritmo Seasonal Trend Decomposition - LOESS (STL) durante el período 2000-2013. Se relacionó la ocurrencia

de estos procesos con la razón entre la estacionalidad ( $\sum IVNh$ ) y la tendencia ( $\sum IVNw$ ) acumuladas durante todo el período ( $\frac{\sum IVNh}{\sum IVNw}$ ), y la frecuencia de fuegos observadas durante el mismo período. Las áreas afectadas se caracterizaron por presentar una relación ( $\frac{\sum IVNh}{\sum IVNw}$ )  $\leq 0.8$ . El 38% de la superficie provincial (5400000 millones de hectáreas) fue clasificada en proceso de lignificación con un índice de certeza de 0.81. El 90% de las áreas afectadas por el fuego en estos sitios fueron quemadas entre 1 y 3 veces por fuegos muy fuertes durante el período estudiado. Las áreas no quemadas o con alta frecuencia de fuegos no presentaron procesos de lignificación, coincidiendo con lo observado por varios autores. La carga animal fue otro elemento significativo presente en sitios arbustizados, siendo un 40% más alta que en los sitios sin la presencia de este proceso ( $p=0.0001$ ).

La estructura del modelo permite generar predicciones de PPNA con un año de anticipación, constituyendo esto una herramienta fundamental al momento de la planificación ganadera y el aprovechamiento racional de los recursos naturales.

Para su mejor comprensión, el trabajo fue dividido en tres capítulos donde se explica en detalle los aspectos técnicos y alcance de cada componente del modelo aquí presentado.

**Palabras clave:** monte - arbustal, precipitación, fuego, carga animal, teledetección



# Prólogo

Más del 70 % de la superficie total de la Provincia de La Pampa está ocupada por regiones consideradas semiáridas y áridas, con un total de más de 10.000.000 de hectáreas. En estos ambientes, los pastizales naturales resultan ser la fuente casi exclusiva de alimentación para el ganado (principalmente bovino, aunque también de otras especies como el caprino).

Existen en la actualidad claras manifestaciones de un progresivo deterioro del potencial productivo de los agro-ecosistemas de la región semiárida y árida de la Provincia de La Pampa. Este deterioro es producto en parte, de un incremento en el tamaño de las especies leñosas, pero especialmente por el aumento de su densidad. La problemática se ve agravada, además, en una propensión a la pérdida de diversidad y densidad, específicamente en lo que refiere a la presencia de especies herbáceas útiles para la alimentación del ganado. Estas son expresiones de una realidad que tienen su origen en la historia productiva del área con factores que se combinan de una manera compleja.

Por las propias características del área se verifica una alta viabilidad interanual de las precipitaciones, con períodos de lluvias por debajo de la media, que al no contar con respuestas flexibles, su impacto suele ser muy sensible. Además, la propia fragilidad de los suelos produce efectos negativos en todo el sistema productivo.

Otro elemento de relevancia se relaciona con la receptividad animal de los sistemas, el cual, se puede considerar que sin mayores influencias externas, se mantuvo relativamente ajustado a la disponibilidad forrajera durante buena parte de la historia productiva del área. Más recientemente, desde la década de 1980, existe una tendencia al incremento de la dotación regional de bovinos. Esta situación que se ve profundizada en los últimos 15 años como efecto derivado de los procesos de intensificación de

la agricultura de cosecha en otras áreas más favorecidas, lo cual provocó la existencia de un stock de animales que en condiciones climáticas normales supera la capacidad del ecosistema para su sostenimiento. Por lo tanto, se han dado períodos alternados durante décadas durante los cuales el sobrepastoreo resultó ser una nota distintiva en el área.

El factor fuego es otro actor central de los procesos de transformación de agro-ecosistema. Si bien, en un ecosistema de las características de la región semiárida y árida de la provincia de La Pampa, puede considerarse a los incendios naturales como un factor más integrante del mismo, también es cierto que su utilización, en condiciones no prescriptas, como una herramienta para paliar épocas de escasez, o modificar el equilibrio alterado del estrato herbáceo o incluso para su empleo para reducir la densidad de leñosas, le ha conferido una gran importancia en la actual conformación de las comunidades vegetales del área.

En el marco de este escenario complejo, el trabajo del Ing. Pablo Vazquez y sus colaboradores, aborda la problemática tomando una gran diversidad de variables: densidad de especies herbáceas, precipitaciones acumuladas, procesos de incremento de la densidad de leñosas, ocurrencia de fuegos y su frecuencia, influencias climáticas estacionales, carga animal, entre otras, y a partir de su interrelación y modelización, logra alcanzar grados diagnósticos y predictivos, útiles para organismos públicos y privados, para profesionales que desarrollan sus actividades en el área y para apoyar las tomas de decisiones de los productores.

**Ing. P.A. Juan Torrado**

Coordinador Proyecto Regional con Enfoque Territorial  
Desarrollo Territorial Sustentable del Caldenal y Oeste Árido  
de la Provincia de La Pampa  
AER Victorica / EEA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas"  
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria  
*torrado.juan@inta.gob.ar*



# 1

## Modelado de productividad primaria de herbáceas forrajeras

*La Pampa no existiría si no fuera por sus pastizales: ni hubiera habido civilizaciones precolombinas, ni conquista del Desierto, ni asentamientos humanos.*

*En la actualidad no sólo aporta la mayor parte de la dieta de sus rodeos de cría, sino que por esa misma causa, resulta ser el factor que por su existencia amortigua la mala distribución poblacional de nuestra Provincia.*

*Una sociedad que no presta atención a los factores que forjaron su historia y mantienen su presente, difícilmente tenga futuro.*

*Cuanto más árido es el ambiente mayor es la variabilidad interanual de la producción de los pastizales. Esto hace inestable la producción y por ende la economía y el desarrollo social del territorio.*

*Es por ello que resulta sumamente valioso desarrollar métodos predictivos que permitan planificar la producción conforme a la oferta forrajera esperable. Este trabajo resulta en un avance significativo al aplicar tecnologías modernas que permiten cubrir amplias áreas con mucho menor esfuerzo.*

Ing. Agr. Enrique Llorens

### INTRODUCCIÓN

La producción ganadera bajo condiciones de seco requiere de una cuantificación estacional de la oferta forrajera para alcanzar las metas propuestas. La receptividad, derivada del modelo de crecimiento logístico (Begon *et al.* 2006) determina la cantidad máxima de individuos que pueden vivir en un hábitat bajo condiciones estables. Pero este concepto se enfrenta a una situación de disponibilidad de alimento variable tanto en el espacio como en el tiempo bajo condiciones reales (Golluscio 2009). Se definió como receptividad a “la densidad óptima de animales que pueden mantenerse en un área determinada para poder alcanzar objetivos de producción específicos, teniendo en cuenta las opciones de manejo disponibles” (Scarnecchia 1990). Pese a su importancia, no existen aún metodologías universalmente aceptadas y confiables para la determinación de receptividad forrajera (Paruelo *et al.* 2004).

Además, los métodos no siempre pueden adaptarse a comunidades distintas a las que fueron diseñados (Golluscio 2009). Aquellos basados en la teledetección son los que cuentan con la mayor capacidad para analizar la heterogeneidad espacial y temporal. Los más utilizados están basados en el modelo de Monteith (1972), donde:

$$PPNA = RFAi * fRFA * EUR$$

PPNA: producción primaria neta aérea

EUR: eficiencia del uso de la radiación

RFAi: radiación fotosintéticamente activa incidente

fRFA: fracción RFAi absorbida por el canopeo.

La fRFA es derivada a partir del Índice Verde Normalizado (IVN), producto obtenible a partir de los sensores remotos, lo cual permite estimar PPNA a escala global (Gallo *et al.* 1985, Potter *et al.* 1993, Paruelo *et al.* 2000, Piñeiro *et al.* 2006, Grigera *et al.*



2011). Esto es posible ya que el IVN está estrechamente relacionado a los componentes verdes del canopeo (Sellers 1985, Huete et al 2002).

Pickup (1995) modeló exitosamente la biomasa aérea forrajera (PPNA) en función de la cobertura porcentual de herbáceas ( $H$ ) a partir del modelo:

$$PPNA=74*e^{0.056*H}$$

Esto destaca la importancia del índice de área foliar (IAF) y de la densidad de plantas para la estimación de PPNA. Si consideramos la ley de  $-3/2$  (Yoda et al 1963, Hutchings 1983, Begon 2006), el peso medio de cada individuo ( $w$ ) se ve afectado por la densidad ( $N$ ) hasta un punto crítico según la función:

$$w=c N^{-1/2}$$

donde  $c$  es una constante. Queda en evidencia que el factor peso individual nunca equiparará el impacto alcanzable por un aumento en la densidad de plantas al momento de definir producción de biomasa. Tomando en consideración esta ley, el número de plantas por metro cuadrado sería el factor de primer orden al momento de definir PPNA.

En áreas extensas con escasa accesibilidad es difícil realizar estimaciones de densidad de herbáceas que representen adecuadamente la variabilidad del lugar. Esto conduce a buscar alternativas para modelar densidad en el espacio y en el tiempo.

Por lo tanto, los modelos que incluyan variables que expliquen cambios en la densidad de plantas deberían ser más estables para predecir disponibilidad forrajera.

La tasa de reclutamiento de nuevos individuos en ambientes semiáridos y áridos está fuertemente influenciada por la disponibilidad de agua y la presión de pastoreo (Kemp 1989, O'Connor 1996, Gutiérrez et al 2000, Marone et al. 2000). La sequía puede disminuir o inhibir la tasa de germinación según sea su severidad, eliminar las plántulas recientemente reclutadas, sobre todo si ocurre en primavera-verano y disminuir la producción de nueva simiente para el ciclo posterior. Existe una alta correlación entre los valores hallados de IVN y la precipitación previa en la Gran Llanura central de Estados Unidos (Wang et al. 2003). Los valores quincenales de IVN están asociados a precipitaciones ocurridas durante los dos meses previos. El valor medio de IVN de una estación de crecimiento se

correlacionó positivamente con la lluvia acumulada durante la estación de crecimiento más la acumulada durante los 7 meses previos al inicio de la misma (15 meses). Cuando hay lluvias abundantes, una fuerte presión de pastoreo evita que plántulas recientemente implantadas culminen su ciclo reproductivo, ya sea por herbivoría como por pisoteo (James et al. 2011).

Estos antecedentes permiten plantear como objetivo la elaboración de un modelo predictivo de PPNA de herbáceas en ambientes semiáridos con presencia de leñosas basándose en el modelado de su densidad, la precipitación antecedente y el IVN.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El área de dónde provino la información pertenece al ecotono entre el Espinal (dominado por la especie *Prosopis caldenia*) y el Monte Occidental (dominado por *Larrea spp.*). Esta región se caracteriza por presentar un régimen hídrico semiárido, con un índice hídrico entre 0.2 y 0.5 (UNEP 1997) y una precipitación media anual de 510 mm (350 – 670 mm), período 1901-2014, con una distribución estivo-otoñal. Ésta fue calculada a partir de datos seriales mensuales del Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) (Rudolf & Schneider 2005) validados para la región (Vázquez et al. 2013). Se utilizaron datos de las parcelas testigo (monte sin rolado) de un ensayo de control de leñosas implementado en la localidad de Chacharramendi (37°22' S, 65°46' W) entre los años 2001 y 2011.

La vegetación del tratamiento testigo representa el estado general de la región Central, caracterizado por un estrato arbustivo (50-60% cobertura) dominado por *Larrea divaricata*, acompañado por *Prosopis alpataco*, *Condalia microphylla* y *Lycium spp.* En el estrato gramíneo aparecen *Stipa tenuis* y *Poa lanuginosa* entre las invernales (70-80% de la población de gramíneas), y *Aristida subulata*, *Aristida mendocina*, *Setaria leucopila* y *Sporobolus cryptandrus* entre las estivales (20-30% de la población de gramíneas).

### Modelado de la densidad de herbáceas forrajeras y PPNA anual

Si bien el ensayo se desarrolló entre los años 2001-2011, la densidad de herbáceas forrajeras solo fue medida desde el año 2007 hasta el 2011 inclusi-

ve (Ádema 2006, Ádema *et al.* 2011).

Los datos corresponden a lecturas trimestrales en un diseño en bloques al azar (2 bloques) con 10 submuestras por bloque. Los modelos de evolución de densidad de herbáceas forrajeras y PPNA por ciclo de crecimiento ( $\text{julio}_t - \text{junio}_{t+1}$ ) fueron construidos considerando la información de las campañas 2007-2011 (entre 5 y 6 cortes por año, 4 años de cortes,  $n=21$ ), donde se contó con información completa. Los modelos de evolución de densidad de herbáceas y PPNA durante el año contemplaron la participación de información pluviométrica anual de campañas anteriores y la evolución del IVN acumulado. Este último parámetro fue extraído de una serie temporal de 115 imágenes del sensor MODIS TERRA, producto MOD13Q1 vo5 (Oak Ridge National Laboratory 2011), para el período enero 2007-diciembre 2011. Este producto genera una imagen de valores máximos de IVN cada 16 días (23 imágenes en el año) por el procedimiento *Maximun Value Compositing*, similar al descrito por Holben (1986) para productos generados a partir del sensor AVHRR, con una resolución espacial de 250 m (píxel de 6.25 ha). Esto disminuye notablemente las áreas con falta de información por presencia de nubes.

Las variables derivadas de precipitación e IVN fueron contrastadas con la densidad de herbáceas y la PPNA mediante el procedimiento GLM (SYSTAT 11, © SYSTAT Software 2008). Para validar el modelo de manera local, se reconstruyó la evolución de la densidad de herbáceas forrajeras para el período 2001-2006, ya que no fue medida en el ensayo original. Luego de obtener la densidad de herbáceas forrajeras al final de cada ciclo de crecimiento, se modeló la PPNA anual para el período 2001-2006. Estos resultados fueron contrastados con las PPNAs medidas durante ese mismo período, donde no se contó con la información completa.

## RESULTADOS

El período julio 2007-mayo 2011 presentó una importante sequía desde septiembre 2008 hasta marzo 2010, estableciendo una secuencia hidrológica *húmedo-seco-húmedo* (figura 1).

La curva evolutiva de densidad de herbáceas forrajeras indicó que el momento de máximo número de individuos en el año fue noviembre; a partir de ese momento, se experimentó una pérdida paulatina de plantas hasta el final de cada ciclo. La sequía

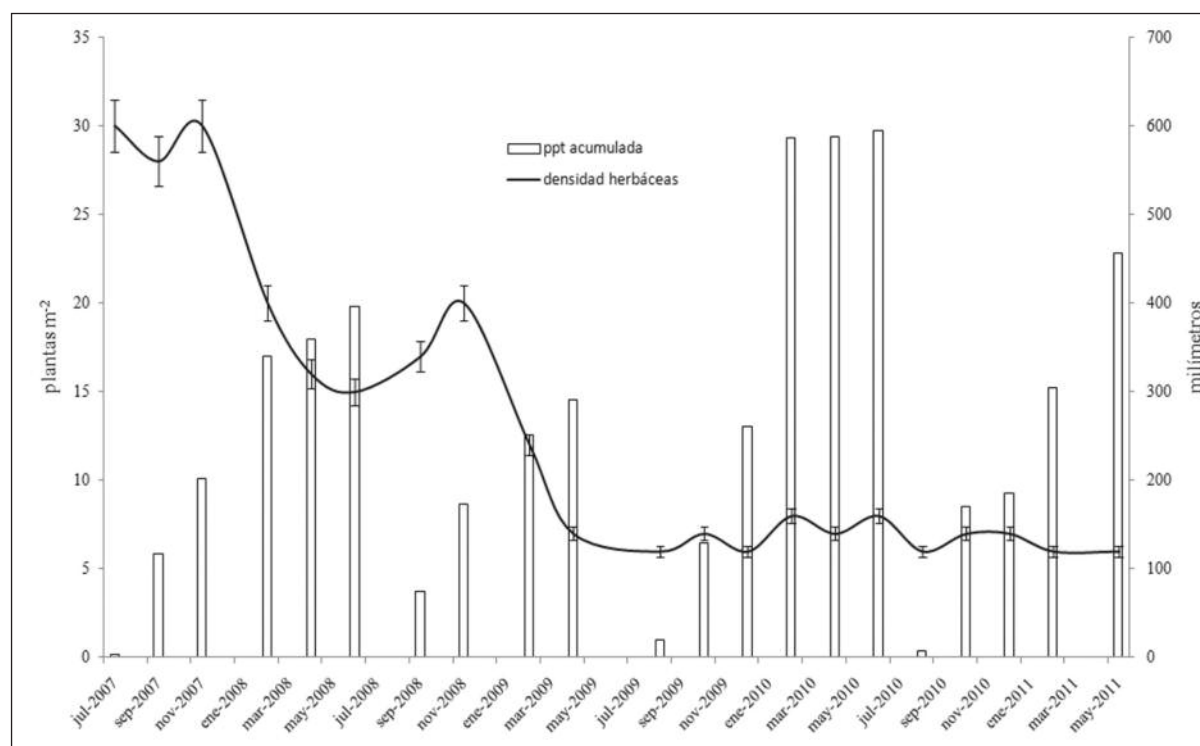


Figura 1: Evolución de la precipitación acumulada por ciclo de crecimiento y la densidad de herbáceas forrajeras en el tratamiento testigo de un ensayo de control de leñosas en la localidad de Chacharramendi (provincia de La Pampa).

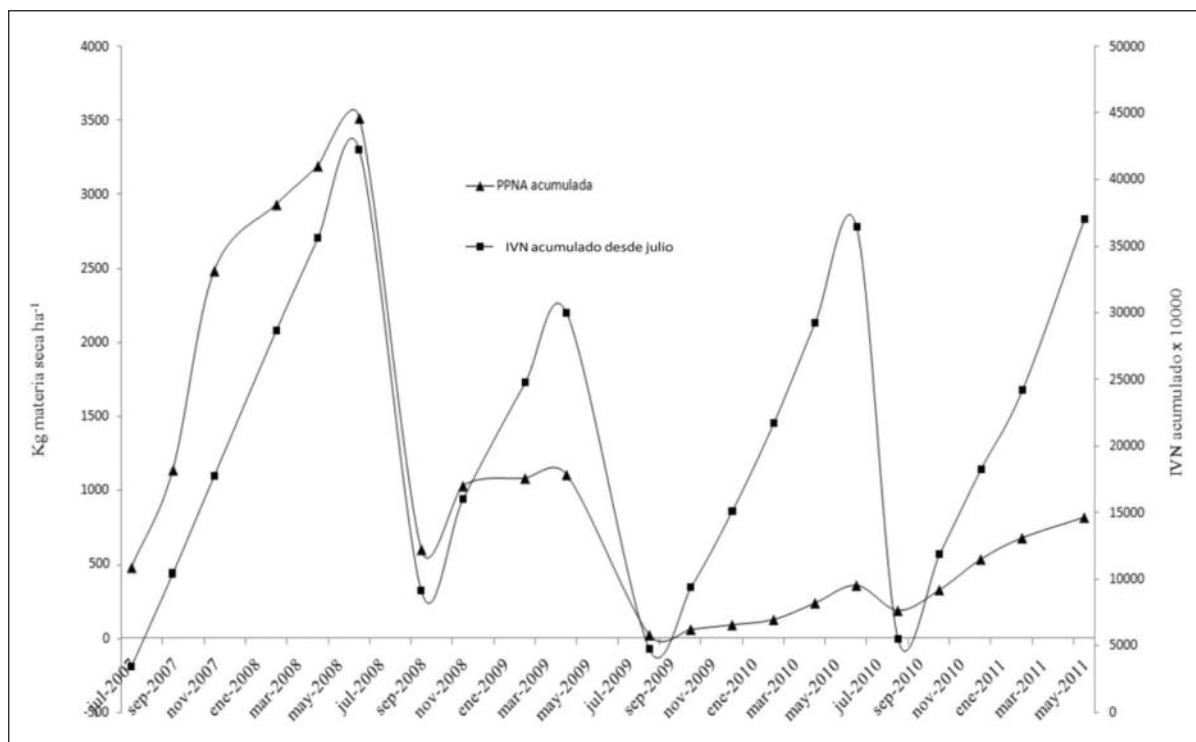


Figura 2: Evolución de la PPNA y el IVN acumulados durante el ciclo de crecimiento en el tratamiento testigo de un ensayo de control de leñosas en la localidad de Chacharramendi (provincia de La Pampa).

presente entre los años 2008 y 2009 favoreció una baja tasa de reclutamiento y muerte de muchas plántulas, de tal modo que no se pudo recomponer la población original, incluso después de dos años posteriores con buena disponibilidad hídrica (figura 1). La evolución de la PPNA acumulada medida por ciclo de cortes presentó un comportamiento similar a la evolución del número de plantas metro cuadrado (figuras 1 y 2).

El IVN acumulado presentó una evolución similar a la PPNA solo durante el período julio 2007-noviembre 2008, caracterizado por condiciones constantes (en este caso, una paulatina disminución de la disponibilidad de agua). Cuando esta condición se perdió por un aumento significativo de la precipitación en febrero 2010 (figura 1), el IVN acumulado se incrementó de manera proporcional a la lluvia caída, mientras que la PPNA acumulada presentó un comportamiento similar al de la densidad de plantas forrajeras (figuras 1 y 2).

La densidad de herbáceas forrajeras estuvo asociada a diferentes períodos de lluvias acumuladas antecedentes y al IVN acumulado desde el inicio de la estación de crecimiento (julio) hasta el momento

de cada observación, no hallándose relación con lluvias ocurridas durante el ciclo de crecimiento.

La evolución de la densidad de herbáceas forrajeras durante cada estación de crecimiento fue reconstruida considerando la precipitación acumulada durante la estación de crecimiento anterior, la precipitación acumulada durante las dos estaciones de crecimiento anteriores y el IVN acumulado desde el inicio de cada estación de crecimiento (julio) hasta el momento de cada observación, con un ajuste significativo ( $R^2=0.98$ ,  $R^2_{adj.}=0.92$ ,  $RMSE=1.43$  pl  $m^{-2}$ ). Si bien existe colinealidad entre las variables de precipitación debido a su construcción, los coeficientes de ambas presentaron significancias muy altas ( $p<0.01$ ). Esto, sumado a un valor de  $R^2$  ajustado elevado son los criterios considerados por los autores para aceptar este resultado.

La evolución de la PPNA acumulada durante cada ciclo de crecimiento fue modelada a partir de la densidad de herbáceas al inicio de la estación de crecimiento actual (es igual a la densidad final observada en el período anterior de crecimiento) y la precipitación acumulada durante la estación de crecimiento anterior ( $R^2=0.84$ ,  $RMSE=1048$ ) (tabla 1).

Tabla 1: Modelo para estimar densidad de herbáceas forrajeras al final del ciclo de crecimiento ( $\delta$ ) y productividad primaria neta aérea anual de herbáceas forrajeras (PPNA) en función del índice verde normalizado (IVN) acumulado durante toda la estación de crecimiento ( $\beta_1$ ), precipitación acumulada durante el ciclo de crecimiento anterior ( $\beta_2$ ), precipitación acumulada durante los dos ciclos de crecimiento anteriores ( $\beta_3$ ) y la densidad modelada de herbáceas forrajeras al inicio del ciclo de crecimiento ( $\beta_4$ ).

Modelo	N	R <sup>2</sup>	Error standard	intercepto	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	p
$\delta$ fin de ciclo f(IVN y lluvia)	21	0.98	1.43	-112.1(**)	0.003(**)	-0.046(**)	0.033(**)	-	0.0001
PPNA anual f( $\delta$ inicio ciclo y lluvia)	11	0.84	1048	-2420(*)	-	6.9(*)	-	42.5(*)	0.004

\* indica (P < 0.05)    \*\* indica (P < 0.01)

Cuando el modelo fue desafiado contra la serie completa de datos (período de cortes 2001–2011), presentó un ajuste muy satisfactorio. El desvío estándar observado durante todo el ciclo promedió 294 kg MS anuales, copiando perfectamente los cambios de pendiente, producto de la alternancia de períodos secos y húmedos (figura 3).

## DISCUSIÓN

El número de plantas por metro cuadrado y las condiciones pluviométricas del ciclo de crecimiento anterior fueron seleccionados como los componentes de rendimiento de los pastizales semiáridos más

importantes, relegando a un segundo lugar las condiciones para maximizar la productividad primaria de cada individuo (Pickup 1995, Begon 2006). El efecto del aumento de las precipitaciones hacia el final del período evaluado se vio reflejado claramente en un mayor IVN acumulado. Sin embargo, esto no fue suficiente para incrementar sensiblemente la PPNA, pues el aumento del área foliar o el mayor verdor de las plantas individuales sobrevivientes por mayor disponibilidad de agua y nutrientes no fue suficiente para compensar la baja densidad de plantas. También se debe considerar que gran parte de ese IVN corresponde a la respuesta de las leñosas al mejor estado hídrico. Es por este motivo que

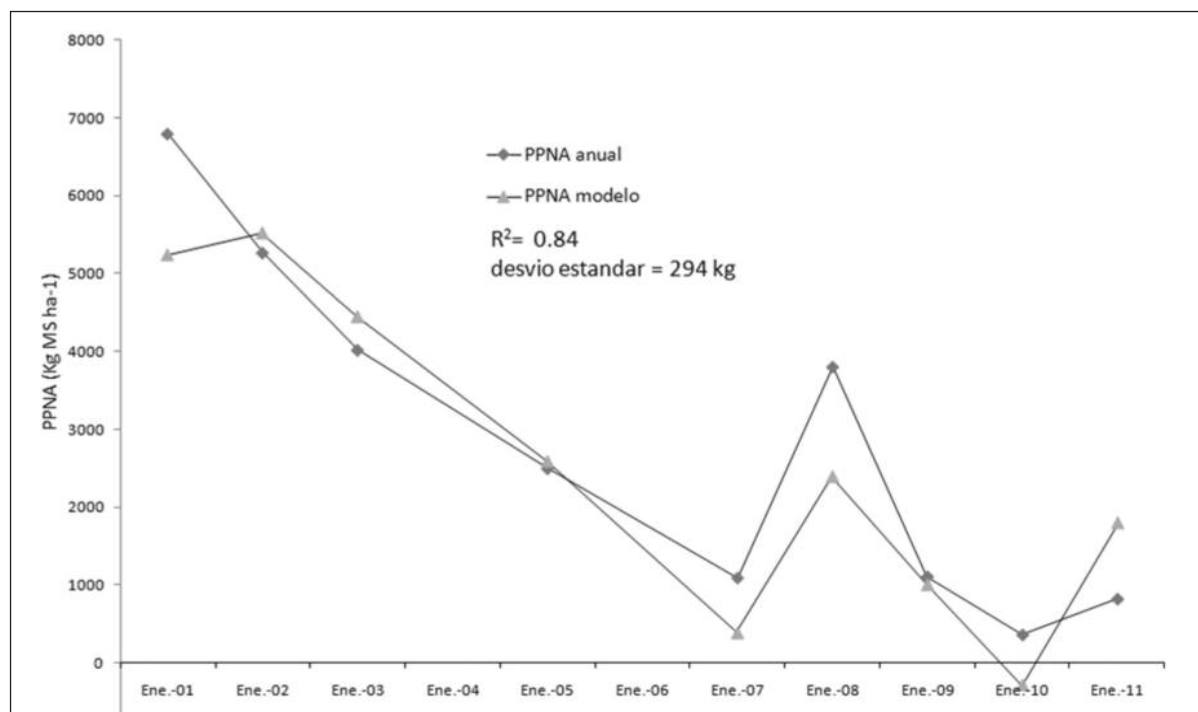


Figura 3: comparación entre datos de PPNA medidos a campo y modelados para el período 2001–2011 en la localidad de Chacharramendi.

los modelos predictivos de productividad primaria basados exclusivamente en IVN presentan una baja performance predictiva, sobre todo cuando hay cambio bruscos entre estaciones de crecimiento. Los métodos basados en el concepto propuesto por Monteith (1972) están enfocados en las condiciones de crecimiento de la planta individual, sin tener en cuenta la dinámica poblacional.

La relación existente entre la densidad de herbáceas forrajeras y la precipitación ocurrida durante estaciones de crecimiento previas (hasta 24 meses) es consistente con lo observado por Wang et al (2003) en los grandes llanos centrales de Estados Unidos para la evolución quincenal del IVN. Esta relación también fue descrita para savanas africanas, pero solo en áreas semiáridas-áridas (Chamaille-Jammes & Fritz 2009). La falta de asociación entre PPNA y precipitación acumulada dentro de la estación de crecimiento coincide con bajos coeficientes de correlación ( $R \leq 0.3$ ) hallados en otro estudio realizado en la zona (Frank *et al.* 1994). Según lo previamente mencionado, la evolución del IVN estaría reflejando en este caso las condiciones ambientales actuales para el reclutamiento y supervivencia de propágulos. Los períodos de precipitación acumuladas en los ciclos de crecimiento previos estarían resumiendo las interacciones existentes entre lluvias mensuales antecedentes, simplificando el modelo.

En ambientes semiáridos es muy difícil separar el comportamiento del IVN entre herbáceas y arbustales; más aún, la precipitación y temperatura afectan de manera diferencial a ambos componentes, por lo cual deben ser modelados de manera independiente (Jobbagy & Sala 2000).

## BIBLIOGRAFÍA

- ADEMA, E. 2006. Recuperación de pastizales mediante rolado en el Caldenal y en el Monte Occidental. Publicación Técnica N° 65. INTA (Ed) ISSN 03252132. 52 p.
- ADEMA, E; L BUTTI & F BABINEC. 2011. Efecto de diferentes aplicaciones de rolado sobre la composición botánica del pastizal en el semiárido-árido de La Pampa. En: Memorias de la 2ª Jornada de actualización técnica en manejo y control del renoval. Serie Informes técnicos EEA Santiago del Estero. N° 82. INTA (Ed.).Pp. 73-84.
- BEGON, M; C TOWNSEND & J HARPER. 2006. Ecology. From individuals to ecosystems. Blackwell Publishing (Ed). Oxford, U.K. Fourth edition. 714 p.

- CHAMAILLÉ-JAMMES, S & H FRITZ. 2009. Precipitation-NDVI relationships in eastern and southern African savannas vary along a precipitation gradient. *International Journal of Remote Sensing*. 30: 3409-3422.
- FRANK, E; E LLORENS & D CABRAL. 1994. Productividad de los pastizales de la provincia de La Pampa. INTA, EEA Guillermo Covas (Ed). Anguil. 167 p.
- GALLO, K; C DAUGHTRY & M BAUER. 1985. Spectral estimation of absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Remote Sensing of Environment*. 17: 221-232.
- GOLLUSCIO, R. 2009. Receptividad ganadera: marco teórico y aplicaciones prácticas. *Ecología Austral*. 19: 215-253.
- GRIGERA G. 2011. Seguimiento de la productividad forrajera mediante teledetección: desarrollo de una herramienta de manejo para sistemas de producción ganaderos. Tesis Doctoral en Ciencias Agropecuarias. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires. 109 p.
- GUTIÉRREZ, J; G ARANCIO & F JAKSIC. 2000. Variation in vegetation and seed bank in a Chilean semi-arid community affected by ENSO. *Journal of Vegetation Science*. 11: 641-648.
- HOLBEN, B. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*. 7: 1417-1434.
- HUETE, A; K DIDAN; T MIURA, E RODRIGUEZ; X GAO & L FERREIRA. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 83: 195-213.
- HUTCHINGS, M. (1983) Ecology's law in search of a theory. *New Scientist*. 98: 765-767.
- INTA. 1980. Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de La Pampa: clima, geomorfología, suelo y vegetación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Provincia de La Pampa, Universidad Nacional de La Pampa (Eds). Buenos Aires. Acceso online <http://www.lapampa.edu.ar/recursosnaturales>. 490 p.
- JAMES, J; T SVEJCAR & M RINELLA. 2011. Demographic processes limiting seedling recruitment in arid grassland restoration. *Journal of Applied Ecology*. 48: 961-969.
- JOBBAGY E & O SALA. 2000. Controls of grass and shrubs aboveground production in the Patagonian steppe. *Ecological applications*. 10 (2): 541-549.
- KEMP, P. 1989. Seed banks and vegetation processes in deserts. En: Leck, M; V Parker & R Simpson (Eds). *Ecology of seed banks*. San Diego. Harcourt Brace Jovanovich. 257-281.
- MARONE, L; J LÓPEZ DE CASENAVE & V CUETO. 2000. Granivory in southern South American deserts: conceptual

issues and current evidence. *BioScience*. 50: 123-132.

- MONTEITH, J. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Applied Ecology*. 9: 747-766.
- O'CONNOR, T. 1996. Hierarchical control over seedling recruitment of the bunch-grass *Themeda triandra* in semi-arid savanna. *Journal of Applied Ecology*. 33: 1094-1106
- OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER (ORNL DAAC). 2011. MODIS subsetted land products, Collection 5. Available on-line [daac.ornl.gov/MODIS/modis.html](http://daac.ornl.gov/MODIS/modis.html) from ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. Accesado 03-03-2013.
- PARUELO, J; M OESTERHELD; C DI BELLA; M ARZADUM; J LAFONTAINE; *et al.* 2000. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. *Applied Vegetation Science*. 3: 189-195.
- PARUELO, J; R GOLLUSCIO; J GUERSCHMAN; A CESA; V JOUVE; *et al.* 2004. Regional scale relationship between ecosystem structure and functioning: the case of Patagonian steppes. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 13: 385-395.
- PICKUP, G. 1995. A simple model for predicting herbage production from rainfall in rangelands and its calibration using remotely-sensed data. *Journal of Arid Environments*. 30: 227-245.
- PIÑEIRO, G; M OESTERHELD & J PARUELO. 2006. Seasonal variation of aboveground production and radiation use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems*. 9: 1-9.
- POTTER, C; J RANDERSON; C FIELD; P MATSON; P VITOUSEK; *et al.* 1993. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Geochemistry Cycles*. 7: 811-841.
- RUDOLF, B & U SCHNEIDER. 2005. Calculation of Gridded Precipitation Data for the Global Land-Surface using in-situ Gauge Observations, Proceedings of the 2nd Workshop of the International Precipitation Working Group IPWG, Monterey October 2004, EUMETSAT, ISBN 92-9110-070-6, ISSN 1727-432X, 231-247.
- SCARNECCHIA, D. 1990. Concepts of carrying capacity and substitution ratios: a system viewpoint. *J. Range Management*. 43: 553-555.
- SELLERS, P. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*. 6: 1335-1372.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). 1997. *World Atlas of Desertification*. Nick Middleton, David Thomas (eds) UK. ISBN: 0470244194, 9780470244197. Second edition. 182 p.
- VÁZQUEZ, P; E ÁDEMA & B FERNÁNDEZ. 2013. Dinámica de la fenología de la vegetación a partir de series temporales de NDVI de largo plazo en la provincia de La Pampa.

*Ecología Austral*. 23:77-86.

- WANG, J; P RICH & K PRICE. 2003. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*. 24 (11): 2345-2364.
  - YODA, K; T KIRA; H OGAWA & K HOZUMI. (1963) Self thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *Journal of Biology*, Osaka City University, 14: 107-129.
-



# 2.

## Modelado del proceso de lignificación en la provincia de La Pampa

*El 75% del territorio de la provincia de La Pampa presenta campos con vegetación natural dentro de los ecosistemas del Caldenal y el Monte Occidental. Estos ecosistemas han sufrido cambios estructurales, funcionales y modificación de la composición relativa de las especies que compusieron la comunidad original de los diferentes sitios. Estos cambios han sido producto de disturbios provocados por la naturaleza como por el hombre y en general puede afirmarse que han sido negativos desde el punto de vista ecológico y productivo. Existen indicadores que evidencian una tendencia hacia el deterioro de los pastizales, como la presencia de plantas muertas por excesiva utilización, escaso vigor de las especies forrajeras, escasa producción de semilla, erosión y compactación del suelo, pobre infiltración y alto escurrimiento del agua de lluvia, escasa cobertura de broza y procesos de empajamiento y arbustización.*

*La degradación de un sitio por encima de un determinado umbral de tolerancia frente a la presión de uso en los campos naturales implica cambios estructurales, pérdida de especies deseables y de funciones, lo que lleva a los sitios a apartarse de los estados de referencia y ubicarse en diferentes estados o condiciones de provisión de servicios, hasta estados de desertificación de dificultosa reversibilidad. En la actualidad, el Caldenal se presenta como una región sumamente modificada, donde parte de la superficie ha sido reemplazada por cultivos y en la superficie restante se reconocen nueve tipos fisonómicos de vegetación natural, donde la mayor representatividad está dada por el arbustal denso. Frente a estas situaciones de degradación debe recurrirse a acciones de alto impacto para salir de esos estados estancos de improductividad. Al respecto, la aplicación de tecnologías adecuadas ha logrado revertir estados degradados de la vegetación y recuperado la receptividad ganadera óptima en diferentes sitios de vegetación natural.*

*El control selectivo de especies arbustivas, aumenta las áreas de pastoreo, preserva especies forestales deseables, aumenta la cobertura de broza sobre la superficie del suelo, optimiza el uso del agua por las especies forrajeras y en última instancia mejora la condición de los pastizales degradados. Es necesario consolidar un foro donde interactúen productores y profesionales que trabajan y producen en ecosistemas naturales de La Pampa, para difundir conocimientos y generar tecnologías de manejo sustentable. Finalmente, se debe efectivizar la transferencia de conocimiento y tecnologías entre diferentes actores vinculados al manejo de pastizales, donde la integración del conocimiento debe necesariamente involucrar a la política en la toma de decisiones adecuadas a las necesidades de una nueva ruralidad, en beneficio de toda la sociedad.*

Edgardo Osvaldo Adema



## INTRODUCCIÓN

Por definición, un proceso de lignificación se caracteriza por la invasión progresiva de especies leñosas presentes en un ambiente en bajas densidades, siendo muchas veces versiones arbustivas de especies forestales, producto de incendios fuertes o la intervención del hombre (Van Auken 2000). El proceso de lignificación de sitios dominados por pastizales está ocurriendo globalmente debido a procesos naturales y a una variedad de procesos antropogénicos (Knapp *et al.* 2008). Las estructuras de las praderas áridas y semiáridas de Nuevo México cambiaron mucho en los últimos 150 años, sobre todo tras el ingreso de la ganadería (Van Auken 2000).

En la provincia de La Pampa, estudios dendroecológicos demostraron la presencia de dos grandes procesos de lignificación en los últimos 250 años, asociados principalmente a la presencia de ganado bovino (Gaignard 1989; Dussart *et al.* 2011). Un estudio dendroecológico más detallado fue desarrollado sobre dos sitios ocupados por *Prosopis caldenia* (Caldén) (pastizal y savana) en función de la historia de uso durante los últimos 55 años (Dussart *et al.* 1998; Lerner 2004). Se demostró que haber pasado de cría de ganado ovino a bovino a principios de la década de 1940, incrementó la implantación de nuevos individuos de 5 a 31 plantas hectárea<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Dussart *et al.* 1998). Este hecho es en particular importante, pues los grandes rumiantes, al morder las vainas, escarifican la semilla y promueven la implantación de nuevos individuos (Peinetti *et al.* 1993).

La historia pluviométrica y los eventos de fuego, si bien estos últimos se duplicaron en el siglo XX respecto del siglo anterior (Medina *et al.* 2000), no tuvieron impacto en la implantación de nuevos individuos. El fuego no siempre elimina individuos, pero altera la estructura del bosque. Al eliminarse el brote apical de crecimiento, los renuevos crecen de manera arrosada desde la base, generando áreas de difícil accesibilidad (Llorens 1995).

Si bien se menciona el proceso de lignificación y se estudiaron las posibles causas en la provincia de La Pampa, éste no ha sido estrictamente cuantificado aún. El análisis de evolución de la cobertura leñosa en la última década, basado en el uso del producto MOD44 (Hansen *et al.* 2010), no validado para esta región, detectó 4000000 de hectáreas con un aumento en su proporción (Vázquez *et al.* 2013).

Esto sería compatible con el proceso de lignificación descrito para la provincia de La Pampa.

A partir de la descomposición de series de tiempo de índice verde normalizado (IVN) en los componentes estacionalidad, tendencia y error mediante el algoritmo LOESS (STL) (Cleveland *et al.* 1990), la CSIRO logró diferenciar la cobertura de bosques y herbáceas para toda Australia (Lu *et al.* 2001; Lu 2003). Esto pudo realizarse por un fuerte componente tendencia, muy estable en el año, atribuible a la condición de perennidad de los bosques de *Eucaliptus sp.* En la provincia de La Pampa, la vegetación presenta un fuerte componente de estacionalidad, debido a las bajas temperaturas y escasas precipitaciones invernales (Vázquez *et al.* 2013). Sin embargo, sería esperable encontrar un componente de tendencia mayor al de estacionalidad en presencia de procesos de lignificación. Esto sería más evidente durante períodos prolongados de déficit hídrico (segunda mitad de la década del 2000), donde las únicas especies esperables de prosperar bajo estas condiciones serían las leñosas.

El objetivo de este trabajo será identificar y cuantificar procesos de lignificación en la provincia de La Pampa a partir del análisis de series temporales de IVN mediante el algoritmo STL, y relacionar estos resultados con el tipo de comunidad y la frecuencia de fuegos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El trabajo fue desarrollado sobre toda la extensión de la provincia de La Pampa (35° 1' 13" lat S, 63° 21' 16" long O – 39° 23' 28" lat S, 68° 2' 42" long O).

### Información satelital utilizada

Para el análisis se utilizó la serie temporal de 322 imágenes del sensor MODIS, producto MOD13Q1 v05, para el período enero 2000-diciembre 2013. Este producto genera una imagen de valores máximos de IVN cada 16 días por el procedimiento *Maximun Value Compositing* (Holben 1986), con una resolución espacial de 250 m (píxel de 6.25 ha). Esto disminuye notablemente las áreas con falta de información por presencia de nubes.

### Modelo STL

Para poder detectar áreas en proceso de lignificación, bajo la hipótesis de que éste debería presen-

tar un componente de tendencia positivo, se aplicó el algoritmo STL a la serie temporal de imágenes de IVN MOD13Q1 (período enero 2000-diciembre 2013) para descomponer esta señal en sus componentes tendencia (T), estacionalidad (E) y error (Err) (Lu 2003):

$$IVNi = Ti + Ei + Erri \quad (1)$$

donde  $i = 1$  a  $N$  denota la línea temporal, siendo  $N$  el número total de imágenes utilizado en la serie de tiempo. La tendencia  $Ti$  incluye la media, de tal modo que  $\langle Ti \rangle = \langle IVNi \rangle$ ,  $\langle Ei \rangle = \langle Erri \rangle = 0$ , donde el símbolo  $\langle \rangle$  representa la inclusión del valor medio.

Este procedimiento es computacionalmente eficiente y simple, y permite descomponer las 76000 series de tiempo requeridas para cubrir toda la superficie de la provincia de La Pampa. Además, este método es adecuado para trabajar con información que presente *outliers* o datos perdidos. En términos generales, la tendencia  $Ti$  estaría asociada proporcionalmente al componente leñoso, mientras que la estacionalidad  $Ei$  lo estaría al componente herbáceo. Está demostrado que el valor mínimo de

IVN no es un buen estimador de la proporción de leñosas debido a la contaminación por nubes (Roderick *et al.* 1999; Lu 2003), por lo cual proponen utilizar la línea base de valores de IVN ( $B_i$ ) (figura 1).

Ésta se calcula desplazando  $Ti$  por una constante  $K$  igual al mínimo valor de  $|Ei|$  observado durante dos años consecutivos donde el tiempo  $i$  está justo en medio de ellos, siendo

$$B_i = T_i - K \quad (2)$$

Si se asume que la razón entre la tendencia del IVN de leñosas ( $Tw_i$ ) y herbáceas ( $Th_i$ ) es igual a la razón entre la línea de base del IVN ( $B_i$ ) y la amplitud del componente estacionalidad ( $A$ ), podemos asumir

$$\frac{Tw_i}{Th_i} = \frac{B_i}{A - 0.08B_i} \quad (3)$$

El valor 0.08 es utilizado pues se ha observado que la amplitud estacional de un bosque denso es aproximadamente ese valor. Combinando las ecuaciones (1), (2) y (3), se podría estimar el IVN correspondiente a la tendencia ( $IVN_w$ ) como

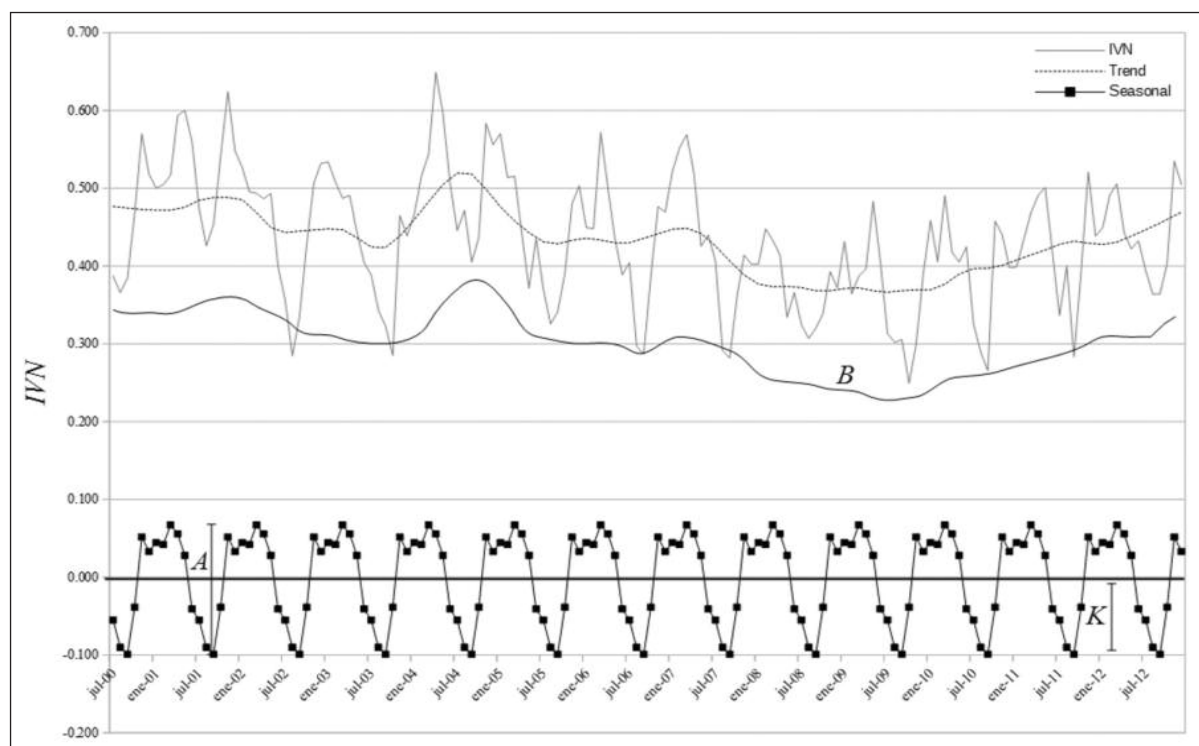


Figura 1: Descomposición de la serie de tiempo IVN en sus componentes estacionalidad (seasonal) y tendencia (trend) mediante el algoritmo STL. Se indican los componentes amplitud (A), línea de base (B) y el factor de corrección  $K$  (adaptado de Lu 2003).

$$IVNwi = Twi = \frac{Ti(Ti-K)}{0.92(Ti-K)+A} \quad (4)$$

y el IVN correspondiente a la estacionalidad ( $IVNh$ ) se estimaría como

$$IVNhi = Thi + Si + \omega i li = \frac{ATi-0.08(Ti-K)}{0.92(Ti-K)+A} + Si + \omega i li \quad (5)$$

donde  $\omega i$  es un factor de ponderación del efecto  $l$  al momento  $i$ , minimizando su impacto para valores extremos (Lu et al. 2001).

La resolución espacial original de las imágenes (pixel de 250m) fue re escalada (pixel de 1.6 km) para adecuarla al elevado consumo de memoria del proceso de cálculo.

El algoritmo completo escrito en lenguaje R se incluye en el Apéndice.

### Caracterización de áreas con y sin procesos de lignificación

Se identificaron a campo doce usos del suelo con presencia o ausencia de procesos de lignificación. Cada uno de ellos fue caracterizado a partir de tres muestras independientes de aproximadamente 5 hectáreas cada una. Para definir un área en proceso de lignificación, se consideraron los siguientes aspectos:

1. Definiremos como lignificación a la proliferación de especies leñosas de porte arbustivo (plantas sin un eje principal definido, con ramificaciones desde la base) en ambientes dominados por herbáceas o árboles.
2. La bibliografía no especifica un número de individuos leñosos implantados por año para definir un proceso de lignificación. Se tomará como referencia una densidad  $\geq 150$  individuos jóvenes  $ha^{-1}$  reclutados durante el período 2000-2013. Este valor consideró los valores de implantación entre 12 y 48 plantas  $ha^{-1}$  año $^{-1}$  hallados en el Caldenal en períodos post fuego y actualmente arbustizadas (Dussart et al. 1998).
3. Para cuantificar la densidad de especies arbustivas, se realizaron en cada sitio 10 transectas distribuidas al azar de 50 m de largo por 2 m de ancho donde se contabilizaron los individuos jóvenes de porte arbustivo.

### Identificación del proceso de lignificación

Se calcularon los valores mensuales de  $IVNw$  e  $IVNh$  a partir de la serie temporal de IVN MODIS por

el procedimiento STL modificado por la CSIRO ( $STL_{mod}$ ) (Lu et al. 2001) para los doce usos del suelo planteados durante el período 2000-2013. Para determinar la importancia relativa de la tendencia sobre la estacionalidad, se calcularon las sumatorias totales del período estudiado de  $IVNw$  e  $IVNh$ , (expresados como  $\sum IVNw$  e  $\sum IVNh$  respectivamente) y la razón  $(\frac{\sum IVNh}{\sum IVNw})$ . Según la hipótesis planteada, se esperarían valores entre 0 y 1 en áreas con un proceso de lignificación evidente.

Las medias de los doce usos del suelo fueron contrastadas mediante un análisis de la varianza (ANVA) ( $\alpha=0.05$ ). Una vez confirmada esta hipótesis, se calculó  $(\frac{\sum IVNh}{\sum IVNw})$  para la provincia de La Pampa y se clasificó como area en proceso de lignificación a aquellos pixeles que obtuvieron valores compatibles con dicho proceso.

El producto resultante fue sometido a un filtro de mediana con una grilla de 3x3 pixeles para eliminar ruido y se eliminó del análisis la superficie utilizada para agricultura (Vázquez et al. 2013). Las predicciones fueron contrastadas contra 250 verdades de campo evaluadas visualmente (no fueron realizadas mediciones de densidad de individuos). El ajuste del modelo fue verificado mediante una matriz de confusión, aceptando como satisfactorio un  $\kappa \geq 0.7$ .

Se relacionó espacialmente el proceso de lignificación con diferentes comunidades vegetales y la presencia de fuegos. Para ello, se tomó una muestra al azar de 329209 puntos sobre la provincia de La Pampa donde se identificó la ausencia o presencia de procesos de lignificación modeladas en este trabajo (0=ausencia, 1=presencia), la comunidad vegetal predominante (Vázquez et al. 2013) y la frecuencia de grandes fuegos. Para controlar esta variable en el análisis, se identificaron áreas incendiadas durante el período 2000-2013 a partir del producto mensual de detección de fuegos activos MOD14, suministrado por el proyecto NASA Earth Observation con resolución espacial de 10x10 km (Justice et al. 2006). La detección de grandes fuegos fue verificada contrastando 35 sitios seleccionados al azar con la casuística de incendios de Defensa Civil, seccional La Pampa (Vázquez et al. 2013). La frecuencia de grandes fuegos dentro de cada pixel se calculó a partir de considerar como fuego aquellos pixeles con 30 por ciento o más de afectación (30000 hectáreas). Cabe aclarar que este producto detecta superficie afectada por fuego, no su intensidad ni velocidad. Los datos fueron analizados a partir del test  $\chi^2$  de Pearson, una prueba no paramétrica

ca que mide la discrepancia entre una distribución observada y otra teórica (bondad de ajuste), para probar la independencia de dos variables entre sí, mediante la presentación de los datos en tablas de contingencia (Cáceres 2007).

## RESULTADOS

El cálculo de la razón  $\left(\frac{\sum IVNh}{\sum IVNw}\right)$  para los doce usos

del suelo durante el período 2000-2013, hallando un valor promedio de 1.46 en sitios sin procesos de lignificación evidentes y de 0.56 en áreas con proceso de lignificación (tabla 1). El ANVA determinó que existen diferencias significativas entre los sitios con y sin proceso de lignificación, confirmándose la hipótesis que el proceso de lignificación se caracteriza por una participación relativa mayor  $IVNw$  respecto de  $IVNh$  (tabla 2 y figura 2).

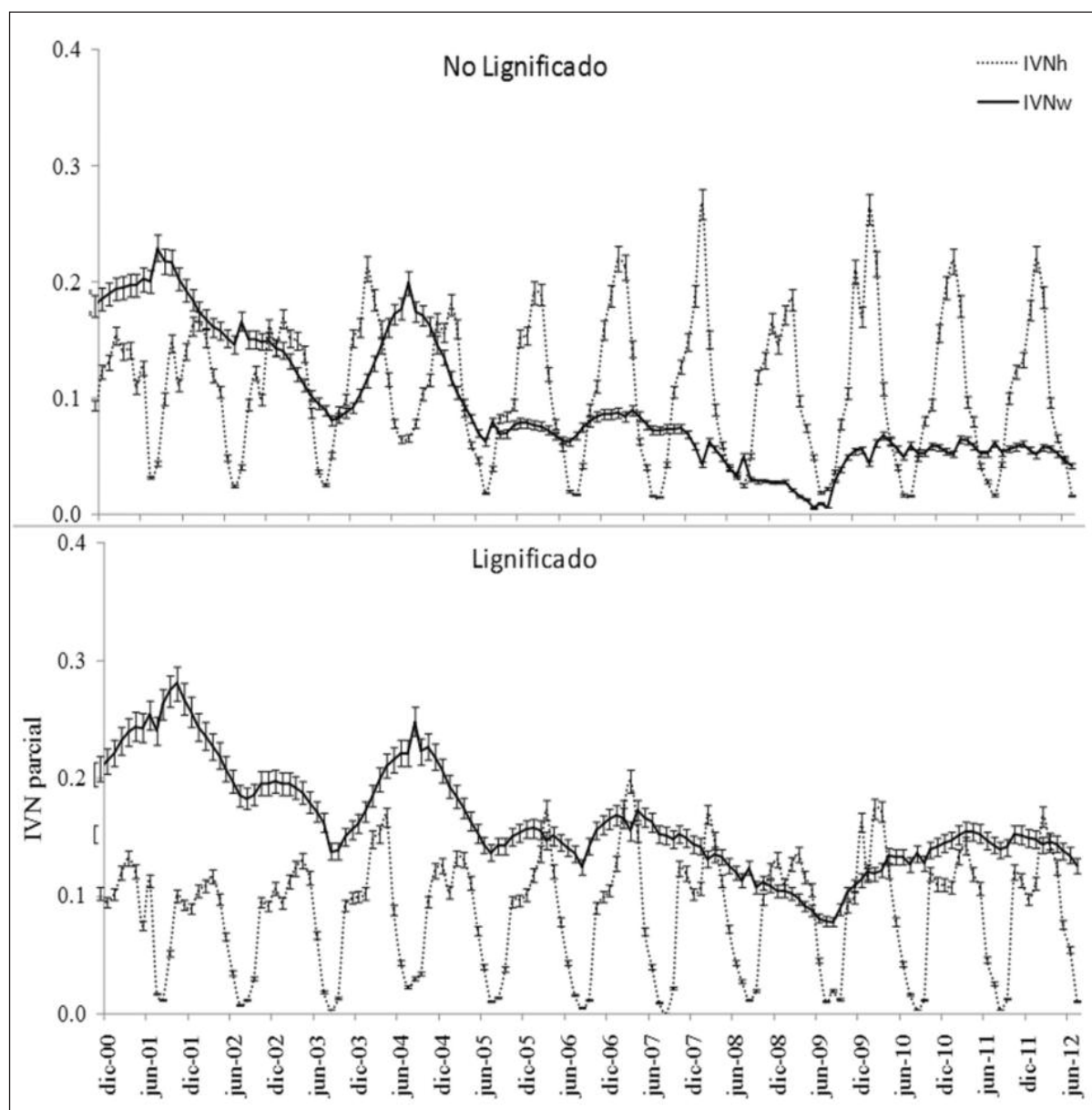


Figura 2: Evolución media mensual de la estacionalidad (IVNh) y tendencia (IVNw) en áreas con y sin proceso de lignificación durante el período 2000-2013.

	Uso del suelo	lat	long	fuegos Frec.	$\Sigma IVNh$ (1)	$\Sigma IVNw$ (2)	(1)/(2)
	SIN PROCESO DE LIGNIFICACIÓN	cultivo	-35.682	-63.657	0	18.23	17.63
-35.475			-63.822	0	18.27	24.54	0.74
-35.988			-64.057	0	19.56	13.22	1.48
quemadas de pasto llorón		-35.647	-63.668	7	20.52	16.19	1.27
		-35.627	-63.793	12	22.32	18.54	1.20
		-35.749	-63.764	6	21.43	24.48	0.88
pastizal		-36.552	-65.628	2	15.20	6.07	2.50
		-37.056	-65.826	2	15.10	6.58	2.29
		-37.450	-65.637	0	13.65	11.79	1.16
bosque abierto		-38.026	-64.086	1	18.50	15.04	1.23
		-36.219	-64.682	1	16.19	13.75	1.18
		-36.221	-64.691	1	16.57	15.16	1.09
piquillín + caldén		-37.488	-64.402	2	14.04	22.62	0.62
		-37.562	-64.380	1	14.03	29.44	0.48
		-37.684	-64.885	3	13.52	26.53	0.51
ecotono	-37.178	-65.967	1	7.68	3.30	2.33	
	-37.523	-65.780	1	7.85	2.21	3.55	
	-37.643	-65.922	1	7.30	3.79	1.93	
jarillal	-37.768	-66.352	1	6.38	2.98	2.14	
	-38.081	-66.134	1	7.38	3.95	1.87	
	-37.757	-65.867	2	5.69	5.06	1.12	
CON PROCESO DE LIGNIFICACIÓN	bosque abierto	-37.191	-65.087	2	13.30	16.27	0.82
		-36.904	-64.257	1	13.17	30.81	0.43
		-36.905	-64.260	0	13.34	25.36	0.53
	bosque cerrado	-36.426	-65.618	1	15.92	20.86	0.76
		-36.313	-65.217	3	16.01	24.50	0.65
		-36.137	-65.252	2	16.11	33.54	0.48
	piquillín + caldén	-37.703	-64.877	3	11.03	31.57	0.35
		-37.698	-64.815	3	11.61	24.80	0.47
		-37.569	-64.861	2	11.06	30.04	0.37
	ecotono	-37.350	-65.810	0	8.51	19.48	0.44
		-37.295	-65.901	1	8.46	17.16	0.49
		-37.649	-65.624	1	9.27	8.37	1.11
	jarillal	-37.350	-65.810	1	7.40	30.14	0.25
		-37.295	-65.901	1	7.51	25.8	0.29
		-37.649	-65.624	1	8.97	9.46	0.95

Tabla 1: Ubicación, frecuencia de fuegos y estimación de  $\Sigma IVNh$ ,  $\Sigma IVNw$  y  $(\frac{\Sigma IVNh}{\Sigma IVNw})$  para los doce usos de suelo con presencia o ausencia de procesos de lignificación.

Tabla 2: Comparación de medias de  $(\frac{\Sigma IVNh}{\Sigma IVNw})$  entre usos del suelo con y sin proceso de lignificación mediante ANVA.

Lignificación	$\frac{\Sigma IVNh}{\Sigma IVNw}$		ANOVA					
	Media (n)	Desv.Est.	S. cuadrados	gl	C. medios	F	Sig.	
SI	0.56 (15)	0.24	E. grupos	7.07	1	7.07	18.76	0.0001
			D. grupo	12.82	34	0.37		
NO	1.46 (21)	0.77	Total	19.89	35			

	OBSERVADOS		Error Comisión	
	0	1		
MODELADOS	0	50	38	0.43
	1	9	152	0.06
Error omisión	0.15	0.20	$\kappa=0.81$	

Tabla 3: Matriz de confusión obtenida a partir del contraste entre áreas observadas y modeladas con (1) y sin (0) proceso de lignificación (n=249).

Tabla 4: Tabla de contingencia para relacionar la presencia (1) y ausencia (0) de procesos de lignificación con las comunidades vegetales, representadas por sus componentes botánicos más representativos (n=329209).

	PROCESO LIGNIFICACIÓN		TOTAL	N
	0	1		
AGRICOLA CON TOSCA	12.6	1.6	14.2	47588
AGRICOLA SIN TOSCA	5.3	0.1	5.3	17858
CONDALIA MICROPHYLLA	4.2	8	12.2	40724
ELYONURUS SP.	6.7	2	8.7	29131
LARREA + ATRIPLEX	7.9	6.8	14.7	49094
LARREA SP.	17.4	8.1	25.5	85294
PIPTOCHAETUM SP.	1.7	3.7	5.4	18059
PROSOPIS CALDENIA	6.3	6.1	12.4	41461
TOTAL	62.1	36.9	100	
N	204439	124770		329209

$\chi^2$  Pearson=123627, df=23, P<0.0001

Tabla 5: Tabla de contingencia para relacionar la frecuencia de fuegos identificados a partir del producto MOD14 con comunidades vegetales afectadas por procesos de lignificación. (n=149338).

	FRECUENCIA DE FUEGO 2000-2013			Total (%)	N
	0	1 a 3	4 a 12		
LARREA + ATRIPLEX	1.1	31.3	0.5	32.9	49094
PROSOPIS CALDENIA	1.6	23.1	3.1	27.8	41461
CONDALIA MICROPHYLLA	1.5	25.6	0.1	27.3	40724
PIPTOCHAETUM SP.	0.3	10.9	0.9	12.1	18059
Total (%)	4.5	90.9	4.6	100	
N	6764	135729	6845		149338

$\chi^2$  Pearson=26983, df=72, P<0.0001

Los píxeles identificados con un proceso de lignificación conspicuo totalizaron una superficie de 5400000 de hectáreas, un 38% de la superficie de La Pampa (figura 3), con un coeficiente de certeza global de 0.81 (tabla 3). Se hace esta aclaración pues un píxel calificado con presencia de un proceso de lignificación no implica que esté afectado en su totalidad.

El análisis de correspondencia indicó que las comunidades afectadas por este proceso fueron las

de *Condalia microphylla*, *Prosopis caldenia*, *Larrea sp + Atriplex lampa*, *Larrea sp.* y *Piptochaetium sp.* (tabla 4). Las áreas con proceso de lignificación en estas cinco comunidades fueron afectadas por 1 a 3 incendios importantes (mayores a 30.000 hectáreas) durante el período estudiado (2000-2013) (tabla 5), siendo en estas áreas quemadas donde se observó el 90% de los procesos de lignificación (tabla 6).

Las áreas quemadas con baja frecuencia presen-

Tabla 6: Tabla de contingencia para relacionar la presencia (1) o ausencia (0) de procesos de lignificación con la frecuencia de fuegos detectados por el producto MOD14, sobre el área ocupada por las comunidades vegetales afectadas.

		PROCESO DE LIGNIFICACIÓN			total	N
		0	1			
FRECUENCIA DE FUEGO 2000-2013	0	4.191	1.567	5.758	8599	
	1 a 3	35.543	52.948	88.491	132151	
	4 a 12	2.721	3.029	5.75	8587	
	Total	42.455	57.544	100		
N		63401	85937		149338	

$\chi^2$  Pearson=4247, df=8, P<0.0001

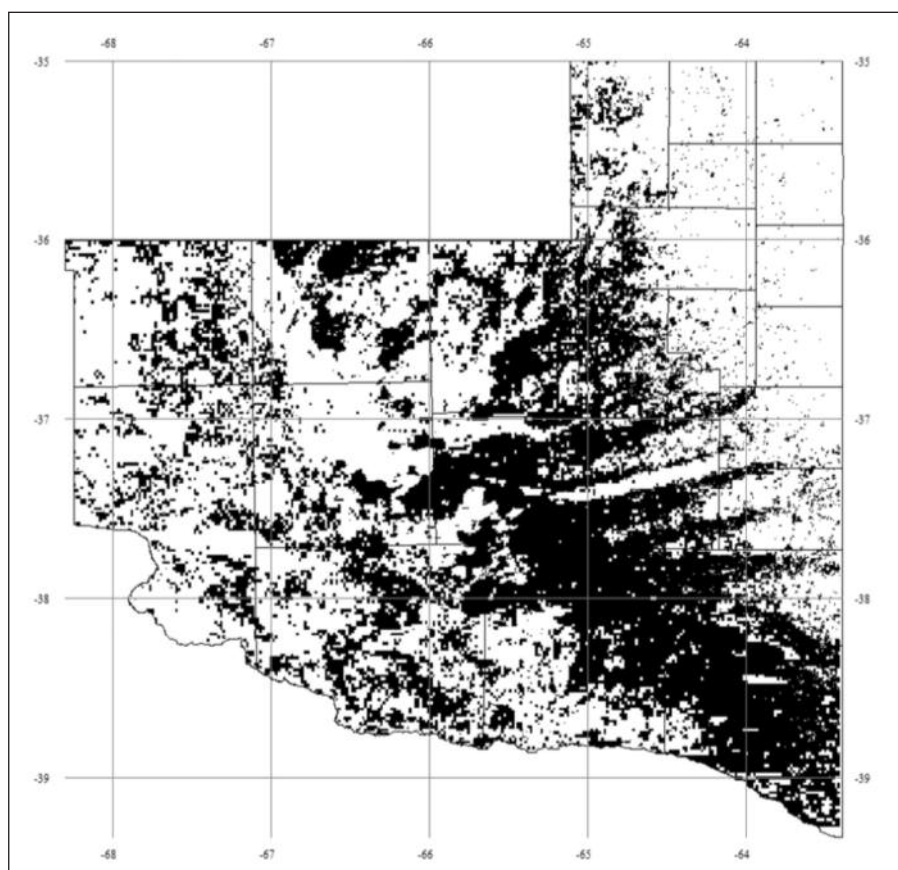


Figura 3: Procesos de lignificación identificados a partir de aplicar el algoritmo  $STL_{mod}$ .

taron una participación relativa alta de  $IVN_w$  respecto del  $IVN$  (60%). En la medida que los fuegos se hicieron más frecuentes, comenzó a predominar el componente  $IVN_h$ , observándose claramente en áreas del Espinal con más de cinco eventos de fuego durante el período estudiado. Este comportamiento fue extremo en áreas quemadas de pasto llorón,

donde luego de doce eventos de fuego (antrópico) el  $IVN_w$  solo representó el 15% del  $IVN$  (figura 4).

Las áreas arbustizadas presentaron una carga animal 40% superior al resto, con valores de  $0.15 \text{ EV ha}^{-1}$  vs  $0.11 \text{ EV ha}^{-1}$ , respectivamente ( $p=0.0001$ ). Esto refuerza el efecto del mal manejo ganadero sobre el proceso arbustivo.

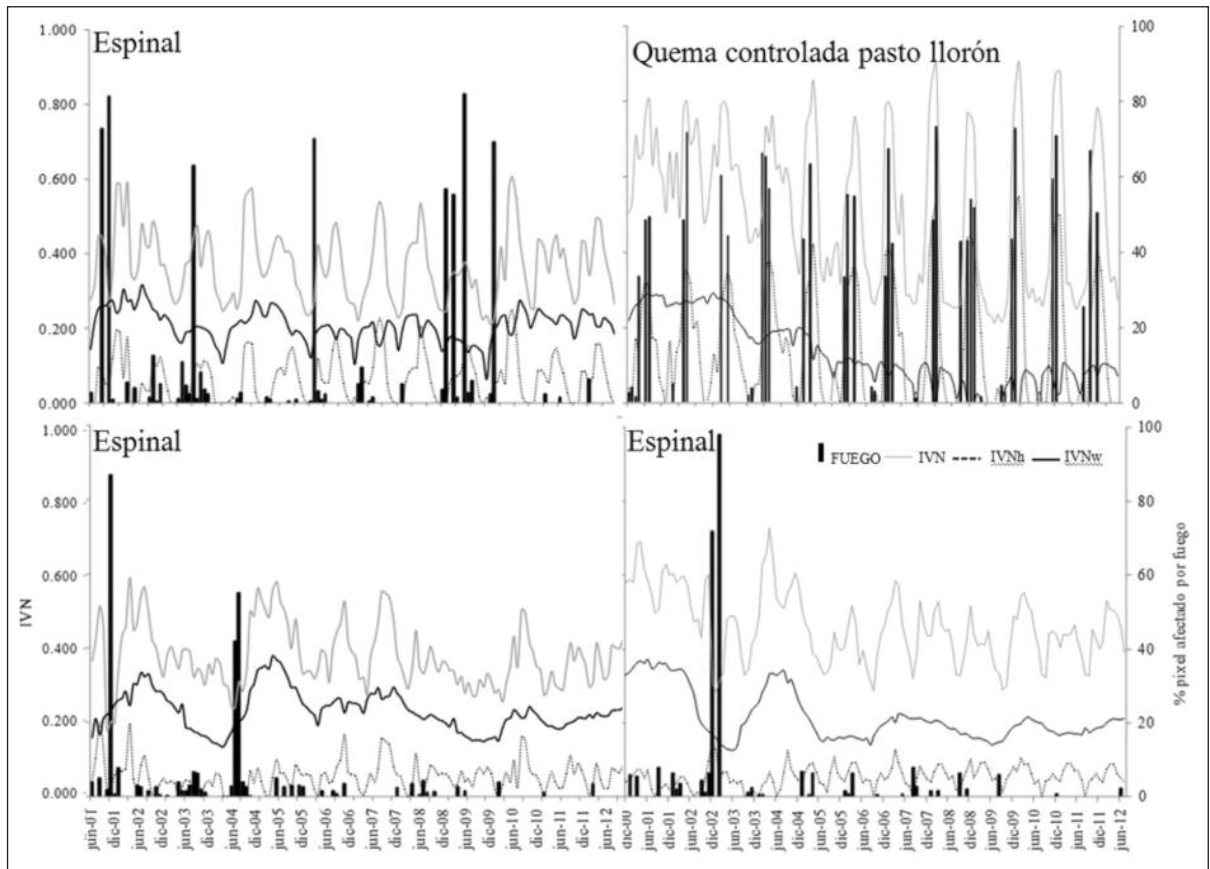


Figura 4: Evolución mensual del IVN, la estacionalidad (IVNh) y la tendencia (IVNw) en función de la frecuencia de fuegos, período 2000-2013.

## DISCUSIÓN

Se observó un proceso de lignificación activo en toda el área ocupada por leñosas. Las especies asociadas a este evento respondió a la región donde fue observado, siendo renuevos de *Prosopis caldenia* con crecimiento arrosado, reclutamiento de nuevos individuos e invasiones de *Geoffroea decorticans* (chañar) en el Caldenal, reclutamiento de nuevos individuos de *Prosopis alpataco* (alpataco), *Condalia microphylla* (piquillín) y *Prosopidastrum globosum* (manca caballo) en el sector sudeste de la provincia, y *Prosopis alpataco*, *Condalia microphylla* y *Schinus fasciculatus* (molle) en el ecotono.

El comportamiento de la cubierta vegetal del sector sudeste no permitió diferenciar sitios en proceso de lignificación y estabilizados. Posiblemente, el componente tendencia esté siempre presente como algo propio de esta comunidad vegetal, por lo cual uno esperaría que, salvo intervención antrópica, esta comunidad esté en activo crecimiento cuando

las condiciones ambientales lo permiten. Si bien ambas situaciones presentaban valores inferiores de  $\left(\frac{\sum IVNh}{\sum IVNw}\right)$  a 1, aquellos sitios calificados como no lignificados presentaron un valor promedio más alto respecto a los lignificados (0.54 y 0.4, respectivamente) (tabla 1).

En las áreas con cultivo y quema de pasto llorón también se observaron algunos casos donde  $\left(\frac{\sum IVNh}{\sum IVNw}\right)$  fue inferior a 1 (0.74 y 0.88, respectivamente) (tabla 1). En el caso de los cultivos, esto se debió a cambios en la estrategia productiva. Las áreas con valores superiores a 1 corresponden a sectores donde no hubo cambios en las rotaciones agrícolas durante el período estudiado, observándose una leve caída del IVN acumulado anual de 7.1 (2000) a 5.8 (2013), producto de la sequía ocurrida en la región durante los años 2008 y 2009. Las áreas con valores inferiores a 1 coinciden con sitios donde los cultivos de invierno fueron eliminados de la rotación durante los primeros cuatro años del período estudiado, dejando simplemente agricultura de verano. Esto representó



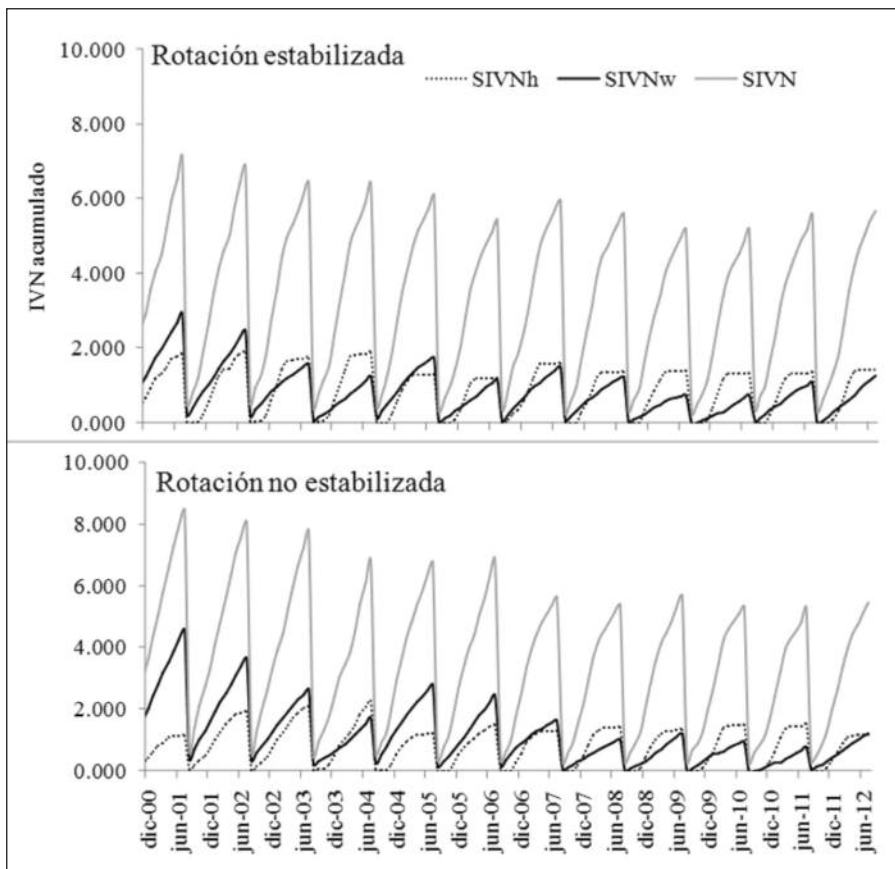


Figura 5: Evolución de valores acumulados anuales del IVN (SIVN), estacionalidad (SIVNh) y tendencia (SIVNw) para cultivos con rotación estabilizada desde el año 2000 y con rotación discontinuada desde el año 2003.

una caída en el IVN acumulado anual con valores que fueron desde 8.5 en el año 2000 hasta 5.4 en 2013. En consecuencia, el aporte de *IVNw* al IVN acumulado anual durante los primeros 3-4 años del período estudiado fue un 50% superior a los hallados en sitios con rotaciones estabilizadas (figura 5).

En el caso de la quema de pasto llorón sucedió algo similar, ya que el fuego reduce el período de actividad fotosintética anual, concentrándola en uno solo más corto. Esto fue evidente cuando las quemadas comenzaron a realizarse con regularidad ya iniciado el período de estudio.

El proceso de lignificación estuvo asociado a zonas de baja frecuencia de fuego (1 a 3 fuegos durante el período de estudio). Si bien no se controló la temperatura del fuego, la frecuencia del mismo en áreas ocupadas por leñosas estaría asociada inversamente a su intensidad. Fuegos suaves y rápidos permiten una elevada supervivencia de herbáceas, las cuales rebrotarán y almacenarán material fino seco, elemento fundamental para el comienzo de un nuevo fuego. Un fuego fuerte, sin embargo, no dejará prácticamente nada, requiriéndose un largo tiempo para recomponer una cubierta vegetal y acu-

mular material combustible. Esto favorece la implantación de nuevas leñosas y las sobrevivientes rebrotan de forma arrosada, lo cual es coincidente con lo mencionado por varios autores (Llorens 1995; Medina et al. 2000; Dussart et al. 2011; Dudinszky and Ghermandi 2013, Matula et al. 2014, Bogino et al. 2015).

Al comparar las 540000 hectáreas afectadas por lignificación en este trabajo con las 400000 hectáreas estimadas no verificadas a campo (Vázquez et al 2013) utilizando el producto MOD44 para cuantificación de superficie cubierta por leñosas (Hansen et al. 2010), encontramos una diferencia del 25%. Si se tiene en cuenta que el tamaño de pixel original del producto MOD44 cubre 6.25 hectáreas (2.5% de la superficie cubierta por el pixel utilizado en este trabajo), podemos inferir de manera preliminar que esta diferencia correspondería a la escala de trabajo utilizada en cada caso. La superficie promedio y máxima cubierta por leñosas estimada a nivel de sub pixel en este producto para la provincia de La Pampa no superan las 0.4 y 3.6 hectáreas, respectivamente (entre el 6 y el 50% de la superficie del pixel). Esto permite inferir que el área neta

afectada por procesos de lignificación podría estimarse entre 324000 y 2700000 hectáreas. El valor de 540000 hallado en este trabajo incluiría, por lo tanto, superficies afectadas por la inaccesibilidad.

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Louis Reymondin y al Ing. Alejandro Coca Castro (Decision and Policy Analysis Research Area - DAPA-, International Center of Tropical Agriculture) por la traducción del modelo STL a lenguaje R, y por su adaptación a los datos disponibles en este trabajo.

El algoritmo se publica completo en el anexo.

## BIBLIOGRAFÍA

- BOGINO, S., S. ROA-GIMÉNEZ, A. VELASCO-SASTRE, M. CANGIANO, L. RISIO-ALLIONE AND V. ROZAS. 2015. Synergetic effects of fire, climate, and management history on *Prosopis caldenia* recruitment in the Argentinean pampas. *Journal of Arid Environments* 117: 59–66.
- CÁCERES, R.Á. 2007. Estadística aplicada a las ciencias de la salud. Ediciones Díaz de Santos, España. ISBN 978-84-7978-823-0. 996 p.
- CLEVELAND, R.B., W.S. CLEVELAND, J.E. MCRAE AND I. TERPENNING. 1990. STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics* 6: 3–73.
- DUSSART, E.G., C.C. CHIRINO, E.A. MORICI AND R.H. PEINETTI. 2011. Reconstrucción del paisaje del caldenal pampeano en los últimos 250 años. *Quebracho (Santiago del Estero)* 19: 54–65.
- DUSSART, E.G., P. LERNER AND R. PEINETTI. 1998. Long term dynamics of 2 populations of *Prosopis caldenia* Burkart. *Journal of Range Management Archives*. 51: 685–691.
- GAIGNARD, R. 1989. La Pampa. Ocupación - explotación. De la conquista a la crisis mundial, 1550-1930. Primera edición. Ediciones Solar S.A., Buenos Aires. 512 p.
- HANSEN, M.C., S.V. STEHMAN AND P.V. POTAPOV. 2010. Quantification of global gross forest cover loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 107: 8650–8655.
- HOLBEN, B. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*. 7: 1417–1434.
- JUSTICE, C., L. GIGLIO, L. BOSCHETTI, D. ROY, I. CSISZAR, J. MORISSETTE AND Y. KAUFMAN. 2006. Algorithm Technical background Document: MODIS fire products (version 2.3). NASA: MODIS SCIENCE TEAM. 34 p.
- KNAPP, A.K., J.M. BRIGGS, S.L. COLLINS, S.R. ARCHER, M.S. BRET-HARTE, B.E. EWERS, ET AL. 2008. Shrub encroachment in North American grasslands: shifts in growth form dominance rapidly alters control of ecosystem carbon inputs. *Global Change Biology*. 14: 615–623.
- LERNER, P. 2004. Ecología y manejo de los bosques de Argentina. Capítulo: El Caldenar: dinámica de poblaciones de caldén y procesos de expansión de leñosas en pastizales. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UNLPAM. 15 p.
- LLORENS, E. 1995. Viewpoint: the state and transition model applied to the herbaceous layer of Argentina's calden forest. *Journal of Range Management Archives*. 48: 442–447.
- LU, H., M. RAUPACH AND T. VICAR [online]. 2001. Decomposition of vegetation cover into woody and herbaceous components using AVHRR NDVI time series. Technical Report 35/01. CSIRO Land and Water.
- <http://clw.csiro.au/publications/technical2001/tr35-01>.
- LU, H. 2003. Decomposition of vegetation cover into woody and herbaceous components using AVHRR NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*. 86: 1–18.
- MATULA, R., M. SVÁTEC AND R. ČEPKA. 2014. The effect of fire exclusion on the structure and tree mortality patterns of a caldén (*Prosopis caldenia* Burkart) woodland in semi-arid Central Argentina. *Journal of Arid Environments*. 100-101: 72–77.
- MEDINA, A., E.G. DUSSART, H.D. ESTELRICH AND E.A. MORICI. 2000. Reconstrucción de la historia del fuego en un bosque de *Prosopis caldenia* (Burk.) de Arizona, sur de la provincia de San Luis. *Multequina* 9: 91–98.
- PEINETTI, R., M. PEREYRA, A. KIN AND A. SOSA. 1993. Effects of cattle ingestion on viability and germination rate of calden (*Prosopis caldenia*) seeds. *Journal of Range Management Archives*. 46: 483–486.
- RODERICK, M.L., I.R. NOBLE AND S.W. CRIDLAND. 1999. Estimating Woody and Herbaceous Vegetation Cover from Time Series Satellite Observations. *Global Ecology and Biogeography*. 8: 501–508.
- VAN AUKEN, O.W. 2000. Shrub invasions of North American semiarid grasslands. *Annual Review of Ecology and Systematics* 31: 197–215.
- VÁZQUEZ, P., E. ADEMA AND B. FERNÁNDEZ. 2013. Dinámica de la fenología de la vegetación a partir de series temporales de NDVI de largo plazo en la provincia de La Pampa. *Ecología Austral* 23: 77–86.



# 3.

## Modelo de productividad primaria neta y pronóstico anual de herbáceas forrajeras en el árido y semiárido de la provincia de La Pampa

El objetivo final de los capítulos anteriores fue crear un marco donde elaborar un modelo capaz de estimar la PPNA de herbáceas forrajeras de toda la zona árida-semiárida de la provincia de La Pampa, con la premisa fundamental que su estructura permita realizar pronósticos de disponibilidad para la siguiente campaña.

### MATERIALES Y MÉTODOS

La implementación de este modelo a escala regional requiere de una serie de ajustes finales

para lograr el valor de productividad neta forrajera aérea anual (PPNA). El primer paso fue reconocer la existencia de una relación en toda la provincia entre densidad de herbáceas forrajeras, la PPNA y la precipitación, según lo propuesto por Pickup (1995). Para su verificación, se compararon los valores promedio de plantas herbáceas forrajeras, su PPNA y la precipitación anual cuantificadas durante el período 1982-1989 por Frank *et al.* (1994) en 26 sitios de la provincia (figura 1). Esto permitiría suponer que el modelo desarrollado en Chacharramendi podría expandirse al resto de la provincia con ciertos cuidados.

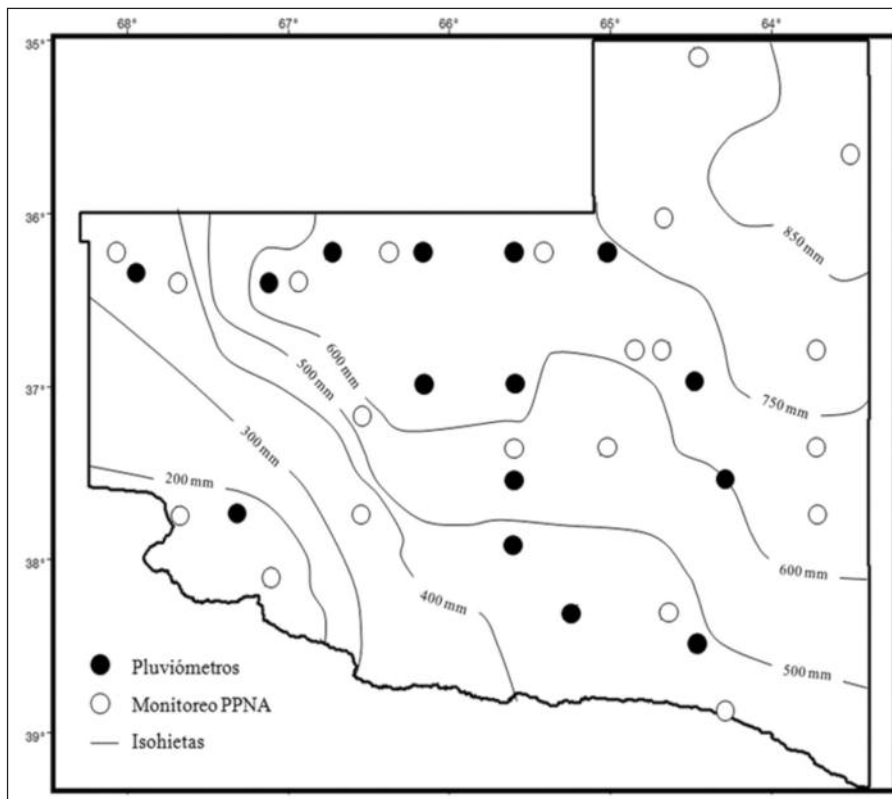


Figura 1: Ubicación de pluviómetros y sitios de monitoreo de PPNA llevados adelante por Frank *et al.* (1994) en la provincia de La Pampa.

El modelo, en principio, no consideró ningún aspecto concerniente a la presencia o disponibilidad de ese forraje para el ganado; el IVN no puede discriminar de manera directa la competencia de las leñosas por el espacio o la inaccesibilidad del ganado al forraje. El valor de PPNA final será calculado como:

$$PPNAn_{final} = PPNAn * [I.C.] * [D] * [A^{0.7}] * [L^{0.3}]$$

donde:

[I.C.] (Índice de cosecha) = 0.7

[D] (Desperdicio: caminos laterales, aguadas, etc.) = 0.8 (equivalente a 20% desperdicio)

[A] (% de árboles y arbustos por pixel): obtenido del producto MOD44 del sensor MODIS TERRA <http://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/MOD44B.051>. El coeficiente 0.7 refleja el efecto de sombreado de las leñosas sobre la productividad de pastizales (East and Felker 1993).

[L] (lignificación): dato obtenido en el capítulo anterior. El coeficiente de aprovechamiento 0.3 responde a estudios realizados en savanas (Scholes and Archer 1997) y a experiencias locales no documentadas.

El pronóstico de PPNA para el ciclo productivo siguiente puede realizarse debido a la estructura del modelo. Este toma como variables más importantes las precipitaciones ocurridas durante las campañas productivas previas. Esto significa que la precipitación del ciclo actual es un insumo para la estimación de PPNA de la campaña siguiente. La densidad de plantas por metro cuadrado es el resultado del cálculo de PPNA ex post. Solo quedaría como incógnita

el valor de IVN acumulado, el cual estaría reflejando presencia de cobertura vegetal y condición del suelo para crecimiento. Se propone utilizar en el cálculo un IVN acumulado anual promedio (2000-2015) para una primera aproximación. Para un segundo pronóstico ajustado, se reemplazarían del IVN acumulado anual promedio los valores de IVN de julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre por los de la campaña actual.

## RESULTADOS

Se halló una buena relación entre la densidad de herbáceas forrajeras, la precipitación la PPNA en la provincia de La Pampa entre los 400 y los 800 mm de precipitación anual (figuras 2 y 3). Valores por encima o por debajo de este rango de lluvias distorsionan exponencialmente la respuesta del modelo.

Para corregir este efecto en la zona árida de la provincia de La Pampa, se calibró un modelo más sencillo utilizando datos obtenidos por Frank et al. (1994), donde:

$$\text{Plantas m}^{-2} \text{ fin de ciclo} = -3.9 + ppt_{t-1} * 0.035$$

$$(R^2 = 0.58)$$

y

$$PPNA = 25 * \text{plantas m}^{-2} - 1.7 * \frac{IVN \text{ acumulado medio anual}}{IVN \text{ acumulado anual}}$$

$$(R^2 = 0.69)$$

Donde

$Ppt_{t-1}$ : precipitación acumulada estación de crecimiento ciclo anterior.

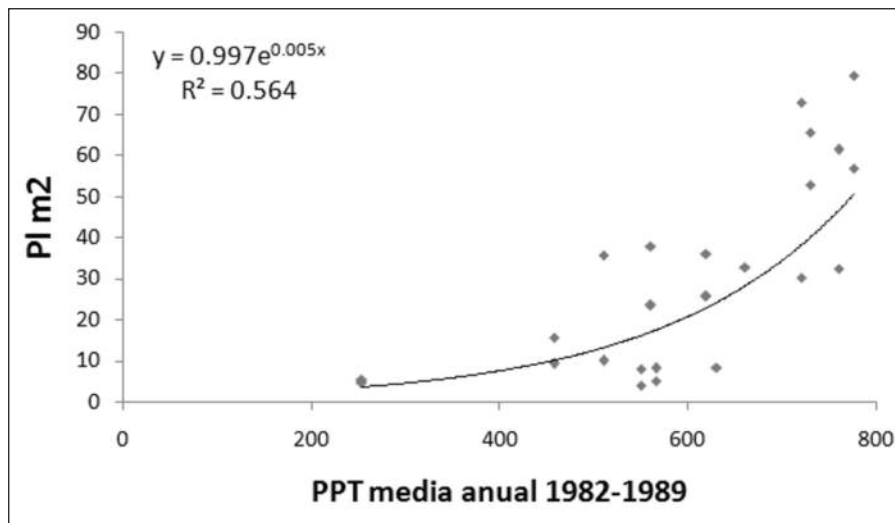


Figura 2: relación existente entre densidad de plantas herbáceas forrajeras y precipitación anual, ambas promedios del período 1982-1989, en la provincia de La Pampa (datos extraídos de Frank et al. 1994).

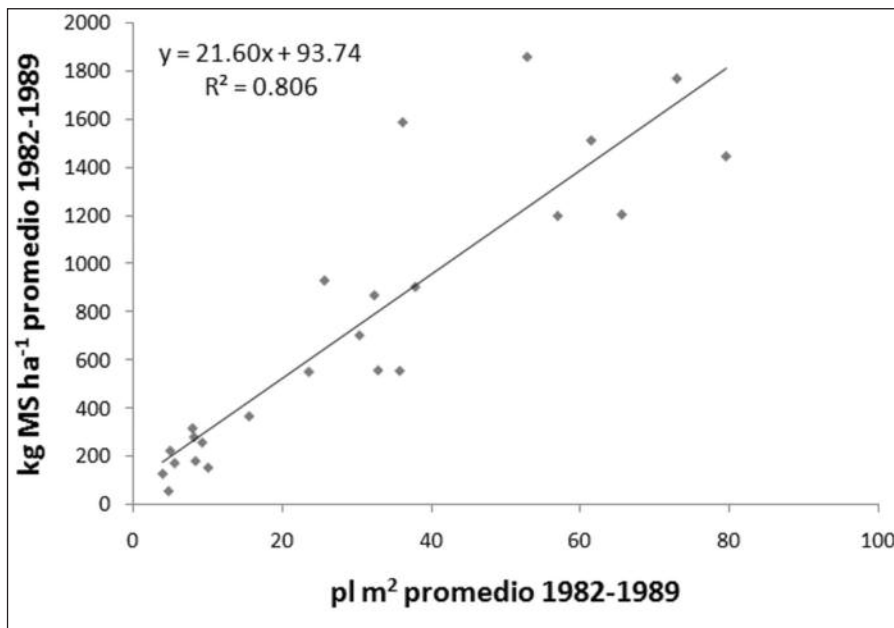


Figura 3: relación existente entre la producción de materia seca anual por hectárea y densidad de plantas herbáceas forrajeras, ambos promedios del período 1982-1989, en la provincia de La Pampa (datos extraídos de Frank et al. 1994).

IVN acumulado: índice verde acumulado anual (de la estación de crecimiento evaluada o promedio histórico).

Los resultados de ambos modelos son afectados por los parámetros de corrección para llevarlo a PPNA final (figura 4 **PAGINA A COLOR**).

Estos resultados fueron contrastados contra la experiencia de profesionales provenientes de zonas diferentes a las utilizadas para generar el modelo

(Luan Toro, Carro Quemado, Victorica, Pichi Mahuida y Toay). Se realizó una comparación entre la oferta de forraje modelada de toda la región árida-semiárida de La Pampa y la carga animal (calculada a partir de datos del SENASA), ambas expresadas como EV ha<sup>-1</sup> al final de la campaña 2007 para ver en qué estado de sobrecarga estaba el sistema antes de la sequía del 2008-2009. Estos resultados sirvieron para evaluar de manera provisoria el funcionamiento global de la herramienta, ya que fueron con-

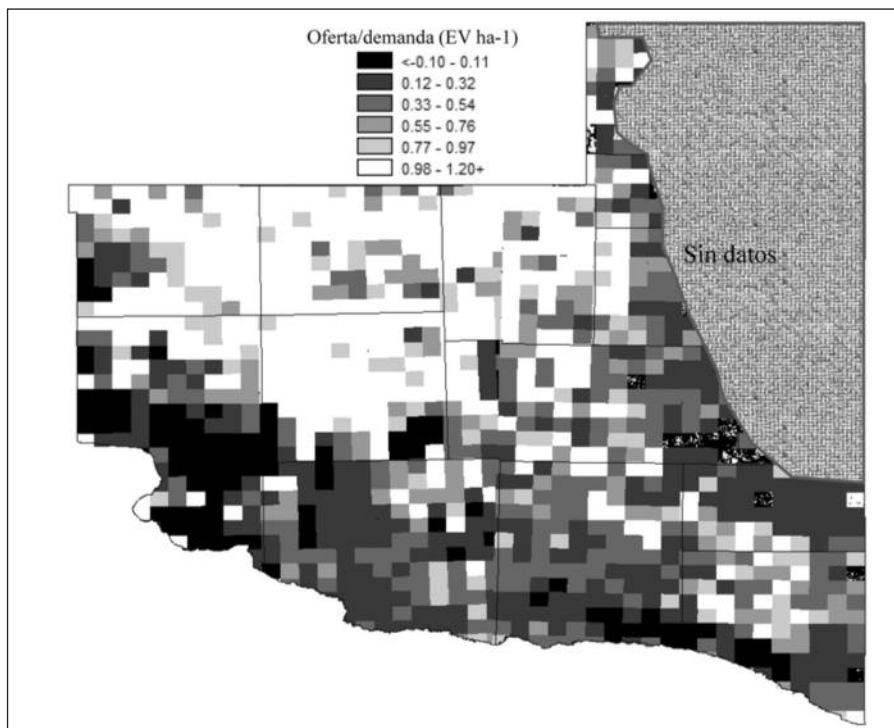


Figura 5: relación oferta-demanda energética, expresada como EV ha<sup>-1</sup> promedio a escala de lote catastral, para la provincia de La Pampa durante el ciclo productivo julio 2007-junio 2008, previo a la sequía.

trastados con los observados por otras instituciones de la provincia. La comparación detectó una sobrecarga en el rango de 30-60%, consistente con lo observado regionalmente (figura 5).

Esto indicaría dos cosas:

1. Hay un aprovechamiento forrajero importante del estrato arbustivo-arbóreo, sin el cual no podría justificarse el exceso de carga. Si bien es deseable que se aproveche este recurso alternativo, no debería ser parte de la alimentación de base del sistema productivo, sino parte de un seguro contra contingencias.
2. Una de las principales causas de los bajos índices de destete de la provincia es la falta de ajuste entre la oferta de forraje (cantidad y calidad) y la carga animal.

La falta de implementación de tecnologías para administrar el forraje, la elección de un sistema productivo exclusivamente criador y la capitalización de vientres como estrategia de *ahorro* agravan la situación; todo esto sin poner en consideración la accesibilidad dentro de cada establecimiento al agua.

Actualmente se están llevando a cabo ensayos de corte en el departamento de Loventué para la validación final del trabajo.

A partir del año 2016, se pondrá a disposición una predicción de la oferta forrajera total para el ciclo productivo subsiguiente (un año de anticipación) a escala de lote catastral en <http://inta.gob.ar/anguil>. El objetivo de esta herramienta es la planificación de carga, ya que, al menos, indicaría el piso de la oferta forrajera factible de disponer en función de la historia climática antecedente. En el caso de planificaciones más detalladas, se facilitará información a escala predial, como elemento de diagnóstico complementario para aquellos usuarios que deseen analizar sus cadenas forrajeras con mayor detalle.

## BIBLIOGRAFÍA

- EAST, R.M. and P. FELKER. 1993. Forage production and quality of 4 perennial grasses grown under and outside canopies of mature *Prosopis glandulosa* Torr. var. *glandulosa* (mesquite). *Agroforestry Systems* 22: 91-110.
  - FRANK, E; E LLORENS& D CABRAL. 1994. Productividad de los pastizales de la provincia de La Pampa. INTA, EEA Guillermo Covas (Ed). Anguil. 167 p.
  - PICKUP, G. 1995. A simple model for predicting herbage production from rainfall in rangelands and its calibration using remotely-sensed data. *Journal of Arid Environments*. 30: 227-245.
-

## Módulo carga de datos a R

```
#####
#####
#Objetivo: Cargar series temporales de NDVI de imagenes satelitales para calcular
Xh y Xw
#####
#####

###librerias###
library(foreign)

###Configurar archivos de entrada###
#Configurar el espacio de trabajo donde esta los archivos CSV
setwd("D:/NOAA_IDRISI/data/raw/")

#Lista los archivos que son de formato DBF (*.dbf)
lista=list.files(pattern="*.dbf")

#Cargar cada archivo y correr calculos#
for (file in lista){
data <- read.dbf(file)
transformacion=10000 #Especificar un escalar según el tipo de imagen
data=data/transformacion #_Generar los datos transformados_#

#Direccionar donde se encuentra el archivo de la función de STD
source("D:/R MODELS/STL/calc_desc_ts.R")

###Proceso para correr en paralelo###
#Especificar el numero de procesadores para realizar en paralelo
rm(res)
procesadores=4

#_Proceso para correr en paralelo_#
paral_desc_ts=function(i){
  divs=floor(dim(data)[1]/procesadores)
  ini=(i-1)*divs+1

  if(i == rangos){
    fin=dim(data)[1]
  }else{
    fin = ini + (divs-1)
  }

  return(calc_desc_ts(data[ini:fin,]))}

if(procesadores>dim(data)[1]){
  rangos = 0
} else {
  rangos=floor(dim(data)[1]/floor(dim(data)[1]/procesadores))
}
if (dim(data)[1]%procesadores > 0){
  rangos=rangos+1
}
}
```



```

require(snowfall)
sfInit(parallel=T, cpus=procesadores)
sfExport("data")
sfExport("calc_desc_ts")
sfExport("paral_desc_ts")
sfExport("procesadores")
sfExport("rangos")
res=sfLapply(1:rangos,paral_desc_ts)

sfStop()

res_xh=data.frame()
res_xw=data.frame()
for (i in seq(rangos)){
  res_xh=rbind(res_xh,c(res[[i]][,1:dim(data)[2]]))
  ini=dim(data)[2]+1
  res_xw=rbind(res_xw,c(res[[i]][,ini:dim(res[[1])][2]]))
}

#Modificar los nombres de las columnas de los archivos de salida
colnames(res_xh)=paste("xh_",c(seq(dim(data)[2])),sep="")
colnames(res_xw)=paste("xw_",c(seq(dim(data)[2])),sep="")

#Guardar las tablas finales como archivos CSV
#Directorio de salida - Importante que los slash se inclinen a la derecha y estar
entre comillas
dir_tablas_output="D:/NOAA_IDRISI/data/proccessed/tablas/"

write.csv(res_xh,paste(dir_tablas_output,strsplit(basename(file),split=".dbf")[1],"
_xh.csv",sep=""),row.names=F)
write.csv(res_xw,paste(dir_tablas_output,strsplit(basename(file),split=".dbf")[1],"
_xw.csv",sep=""),row.names=F)

# Opcional: Gráficas Evolución Xh,Xw y NDVI
# dir_img_output="D:/NOAA_IDRISI/data/proccessed/graficos"
#
# for (i in seq(dim(data)[1]))
# png(paste(dir_img_output,"grafico",file,"_",i,".png",sep=""), 2000, 2000)
# plot(t(data[i,]), main="Comportamiento NDVI, Xh y Xw", xlab="Dates",
ylab="Components", ylim=c(-0.2, 1), type="l", col="blue")
# lines(1:dim(data)[2], t(res_xh[i,]), col="red")
# lines(1:dim(data)[2], t(res_xw[i,]), col="green")
# dev.off()
}

```

## Módulo cálculo STL

```

#####
#####
#Objetivo: Aplicar algoritmo STD y calcular Xh y Xw de los datos cargados en el codi-
go load_data.R
#####
#####

calc_desc_ts=function(data){
  #Generar las matrices de salida de acuerdo al tamaño de la matriz original
  final_xh=data
  final_xw=data

  for (f in 1:dim(data)[1]){ #Extraer cada pixel de total de elementos detectados
en la matriz de entreda

    cell_data <- t(data[f,]) #Hacer una transposición de la matrix para que los
valores NDVI del pixel sea analizados por el algoritmo

```

```

##Configuración del algoritmo STD
#Parametros dinámicos - Modificar según análisis o imagen
par1 <- 12 #Numero de periodos por año

#Parametros fijos
par2 <- "periodic"
par3 <- 0 #s.degree
par4 <- NULL
par5 <- 1 #t.degree
par6 <- ""
par7 <- 1 #l.degree
par8 <- FALSE

#Datos
nx <- dim(data)[2] #Numero de fechas a analizar
print(nx)
#Crear serie temporal de acuerdo a los parametros
x <- ts(array(cell_data),frequency=par1)
print(x)
#Funcion
if (par6 != "") {
  m <- stl(x,s.window=par2, s.degree=par3, t.window=par4, t.degre=par5, l.win-
dow=par6, l.degree=par7, robust=par8)
} else {
  m <- stl(x,s.window=par2, s.degree=par3, t.window=par4, t.degre=par5,
l.degree=par7, robust=par8)
}

#Extracción de los componentes seasonal, trend, remainder
seasonal=data.frame(m$time.series[,"seasonal"])
trend=data.frame(m$time.series[,"trend"])
remainder=data.frame(m$time.series[,"remainder"])

#Calculos de variables intermedias para obtener Xh y Xw
#Dinamicas (Opcional modificar)
ndvi_soil=0.2 #Especificar el valor según corresponda

#Fijas (No modificar)
xc_xt=data.frame(cell_data-trend)

xcadj=1:nx
for (i in 1:nx){
  xcadj[i]=max(xc_xt[i,],seasonal[i,])
}

max_anual_xcadj=1:nx
min_anual_xcadj=1:nx
for (i in 1:nx){
  e=floor((i-1)/par1)*par1+1
  max_anual_xcadj[i]=max(xcadj[e:(e+(par1-1))])
  min_anual_xcadj[i]=min(xcadj[e:(e+(par1-1))])
}

max_delta=1:nx
max_delta[1]=seasonal[1,]+xcadj[1]
for (i in 2:nx){
  max_delta[i]=max(seasonal[i,]+xcadj[i],seasonal[i-1,]+xcadj[i-1])
}

factor_max=1:nx
for (i in 1:nx){
  factor_max[i]=(((0.99/(2-0.99))*max_anual_xcadj[i])+((1-0.99)/(2-
0.99))*xcadj[i]))
}

xc_max_t=1:nx

```

```

for (i in 1:nx){
  xc_max_t[i]=max(factor_max[i],xcadj[i])
}

factor_min=1:nx
for (i in 1:nx){
  factor_min[i]=(((0.99/(2-0.99))*min_anual_xcadj[i])+((1-0.99)/(2-
0.99)*xcadj[i]))
}

xc_min_t=1:nx
for (i in 1:nx){
  xc_min_t[i]=min(factor_min[i],xcadj[i])
}

xa_t=1:nx
for (i in 1:nx){
  xa_t[i]=xc_max_t[i]-xc_min_t[i]
}

s_t=1:nx
for (i in 1:nx){
  s_t[i]=(xcadj[i]-xc_min_t[i])/(xa_t[i]))
}

xw_s=1:nx
for (i in 1:nx){
  xw_s[i]=(1+(0.1*s_t[i]))*(trend[i,]-(0.5*xa_t[i]))-(0.1*s_t[i]*ndvi_soil))
}

xh=1:nx
for (i in 1:nx){
  xh[i]=s_t[i]*(((1+0.05)*xa_t[i])-(0.1*trend[i,]))+(0.015*s_t[i])
}

xw=1:nx
for (i in 1:nx){
  xw[i]=(1+(0.1*s_t[i]))*(trend[i,]-(0.5*xa_t[i])-(ndvi_soil))
}

Xw_s_Xh=1:nx
for (i in 1:nx){
  Xw_s_Xh[i]=xw_s[i]+xh[i]
}

#Generar el valor de cada pixel dentro de una tabla final por componente
final_xh[f,]=t(array(xh))
final_xw[f,]=t(array(xw))

#Modificar el nombre de las columnas para facilitar lectura en IDRISI

return(cbind(final_xh,final_xw))

```

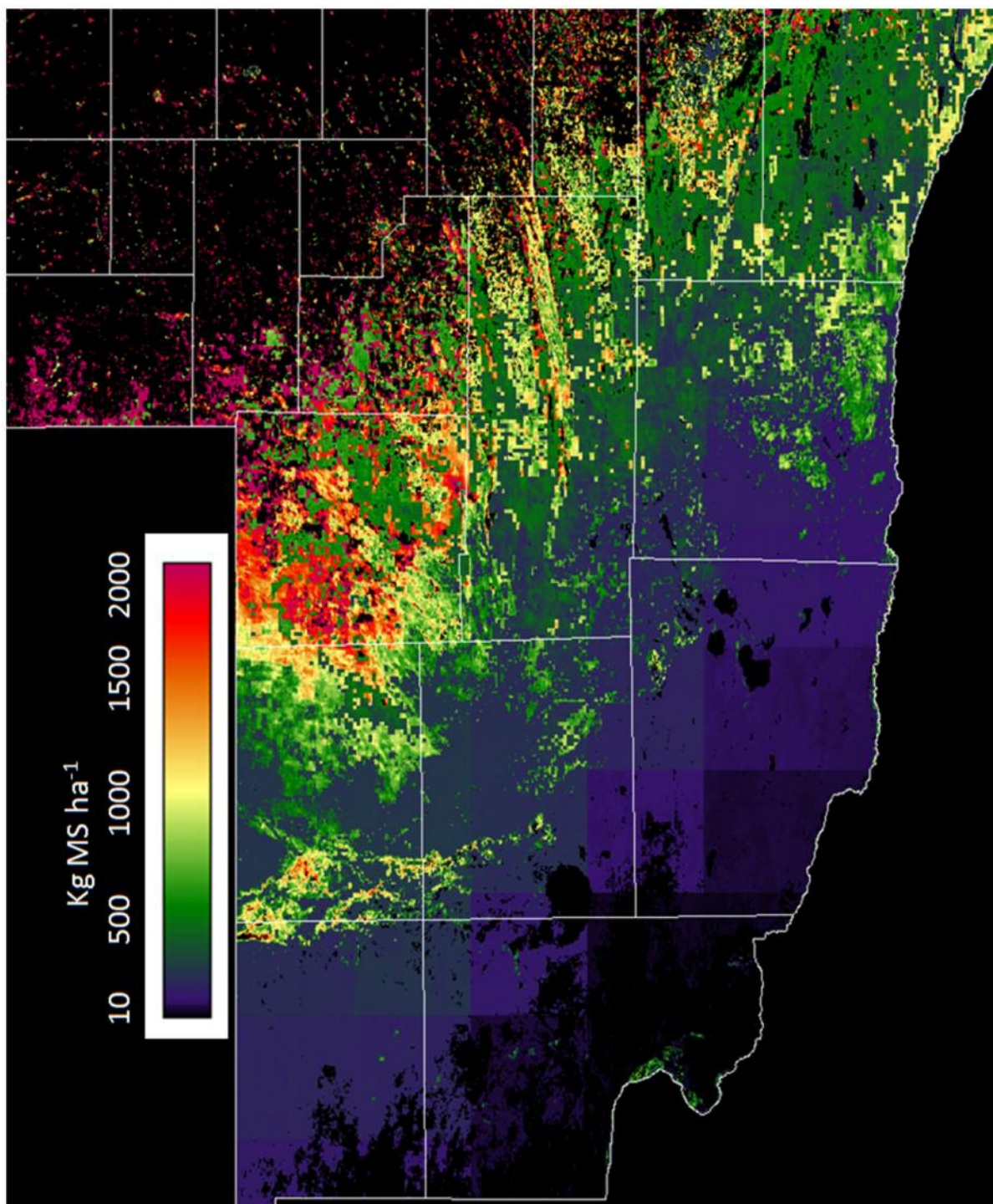


Figura 4: mapa de productividad promedio anual final, período 2000–2015, obtenido a partir de los modelos de PPNA desarrollados para la zona árida y semiárida y la respectiva corrección por disponibilidad.

Se desarrolló un modelo para estimar productividad primaria neta aérea de herbáceas forrajeras (PPNA) en el árido-semiárido de La Pampa, Argentina, considerando a la densidad de plantas y la precipitación antecedente como principales componentes de rendimiento. El modelo fue construido a partir de información proveniente de un ensayo llevado a cabo en la localidad de Chacharramendi entre los años 2001 y 2011. La densidad de herbáceas al final de la estación de crecimiento fue modelada considerando el índice verde normalizado (IVN), la precipitación acumulada de una y dos estaciones de crecimiento antecedentes como predictores. La PPNA fue modelada a partir de la precipitación acumulada durante las dos estaciones de crecimiento previas a la evaluada y la densidad de herbáceas modelada al final de ciclo.

Para corregir esta estimación de oferta forrajera y aproximarlos a valores más reales a las observadas a campo, se modeló la presencia de procesos de lignificación en la provincia de La Pampa a partir de series temporales de índice verde normalizado (IVN) provenientes del sensor MODIS Terra durante el período 2000-2013. El 38% de la superficie provincial (5400000 millones de hectáreas) fue clasificada en proceso de lignificación con un índice de certeza de 81%. El 90% de las áreas afectadas por procesos de lignificación estuvieron afectadas por fuegos fuertes y/o sometidas a cargas animales elevadas (40% más alta que en los sitios sin la presencia de este proceso).

La estructura del modelo permite generar predicciones de PPNA con un año de anticipación, constituyendo esto una herramienta fundamental al momento de la planificación ganadera y el aprovechamiento racional de los recursos naturales.

