

ENSAYOS

ESSAYS

ENSAIOS

EL FUTURO DE LOS PASTIZALES SUDAMERICANOS

Laura Yahdjian y Osvaldo E. Sala

RESUMEN

Los pastizales de Sudamérica mantienen actividades de pastoreo de subsistencia y comerciales, y son un factor clave en la economía de muchos países. Esta actividad depende en forma directa del clima, principalmente las lluvias. La cantidad y distribución anual de precipitaciones determina la productividad primaria, es decir la energía fijada por las plantas, la que a su vez determina la cantidad de animales que se pueden producir. La actual tendencia de cambio climático producirá un aumento en la temperatura, cambios en las precipitaciones y mayor frecuencia de eventos extremos (sequías, inundaciones) que pueden afectar negativamente la productividad de estos pastizales. En la medida en que se puedan conocer las relaciones entre la producción y el clima, y que los pronósticos

climáticos se hagan más precisos y confiables, se pueden implementar sistemas de alarma temprana que permitan mitigar las consecuencias negativas del cambio climático. Por ejemplo, a través de Sistemas de Alarma Ganadero se puede alertar a los productores sobre las sequías inminentes y sus consecuencias sobre la disponibilidad de forraje, a fin de mitigar las pérdidas económicas a corto plazo y el deterioro de los ecosistemas en el largo plazo. El cambio climático es inminente y ya se está experimentando. La alternativa ante este cambio inevitable es la adaptación al mismo, usando el conocimiento del funcionamiento de los sistemas biológicos e implementando herramientas que deben estar al servicio de los productores.

Introducción

Los pastizales ocupan una superficie muy importante del territorio Sudamericano y concentran la mayor parte de la población. Incluyen ecosistemas de pastizales puros dominados por plantas herbáceas y sabanas, o mezclas de herbáceas con especies leñosas como arbustos y pequeños árboles aislados. Por sus características climáticas, los

pastizales han recibido históricamente una importante presión de uso por parte de los seres humanos, que ha llevado a grandes transformaciones del área para actividades agropecuarias, incluyendo el pastoreo por ganado doméstico, que se realiza desde hace más de 300 años. Sumado a las actividades ganaderas, los pastizales más húmedos han sido reemplazados en gran parte por cultivos anuales,

pasturas implantadas y, más recientemente, por plantaciones forestales comerciales.

Los pastizales de Sudamérica cubrían un 33% del territorio, incluyendo pasturas implantadas, pastizales naturales, arbustales, sabanas y desiertos fríos y cálidos (Figura 1). Estas regiones están ubicadas en climas áridos hasta subhúmedos, en los que las precipitaciones muestran un valor aproximado entre 150 y

1500mm anuales. En cuanto a la vegetación, los pastizales están dominados por plantas herbáceas, pero pueden tener un componente leñoso que va desde arbustos o árboles aislados hasta montes con una distribución más o menos continua de pequeños árboles. Los pastizales de Sudamérica incluyen tipos de vegetación como los Llanos en el norte de Sudamérica y el Cerrado en Brasil, compuestos por

PALABRAS CLAVE / Cambio Climático / Ganadería / Pastizales / Productividad Primaria / Sudamérica /

Recibido: 3795. Aceptado: 21/12/2010.

Laura Yahdjian. Licenciada en Ciencias Biológicas y Doctora en Ciencias Agrarias, Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina. Profesora, Facultad de Agronomía, UBA, Argentina

e Investigadora, CONICET, Argentina. Dirección: Instituto de Investigaciones Fisiológicas y Ecológicas Vinculadas a la Agricultura (IFEVA), UBA, Av. San Martín 4453 Buenos

Aires, Argentina. e-mail: yahdjian@ifeva.edu.ar

Osvaldo E. Sala. Ingeniero Agrónomo, UBA, Argentina. M.Sc. y Ph.D. en Range Ecology, Colorado State University,

EEUU. Julie A. Wrigley Profesor, School of Life Sciences and School of Sustainability, Arizona State University, EEUU. e-mail: Osvaldo.Sala@asu.edu

THE FUTURE OF SOUTH AMERICAN GRASSLANDS

Laura Yahdjian and Osvaldo E. Sala

SUMMARY

South American grasslands sustain subsistence and commercial cattle raising, and are a key factor in the economy of many countries. This activity is directly dependent upon the climate, mainly rain. The amount and annual distribution of precipitation determines primary productivity, the energy fixed by plants, which in turn determines the amount of animals that can be produced. The current tendency of climate change will lead to an increase in temperature, changes in rain patterns and higher frequency of extreme events (drought, flooding) that can affect negatively the productivity of these grasslands. In the measure that the relations between production and climate can be known, and that weather forecasting becomes more precise and

trustworthy, early alarm systems can be implemented, allowing for the mitigation of the negative consequences of climate change. For instance, through Livestock Alarm Systems it is possible to alert producers about imminent droughts and their consequences for forage availability, so as to reduce financial losses in the short term and ecosystem deterioration in the long term. Climate change is imminent and it is already experimented. The alternatives vis a vis this unavoidable change are adaptations to it in the best possible way, using the knowledge about the function of biological systems and implementing tools that must be available to producers.

O FUTURO DOS PASTIÇAIS SUL AMERICANOS

Laura Yahdjian e Osvaldo E. Sala

RESUMO

Os pastiçais da América do Sul mantêm atividades de pastoreio de subsistência e comerciais, e são um fator chave na economia de muitos países. Esta atividade depende em forma direta do clima, principalmente as chuvas. A quantidade e distribuição anual de precipitações determina a produtividade primária, quer dizer a energia fixada pelas plantas, a que por sua vez determina a quantidade de animais que se podem produzir. A atual tendência de mudança climática produzirá um aumento na temperatura, mudanças nas precipitações e maior frequência de eventos extremos (secas, inundações) que podem afetar negativamente a produtividade destes pastiçais. Na medida em que se possam conhecer as relações entre a produção e o clima, e que os prognósticos

climáticos sejam mais precisos e confiáveis, se podem implementar sistemas de alarme prematuro que permitam mitigar as consequências negativas da mudança climática. Por exemplo, através de Sistemas de Alarme para Criação de Gado pode alertar-se aos produtores sobre as secas iminentes e suas consequências sobre a disponibilidade de forragem, a fim de mitigar as perdas econômicas a curto prazo e o deterioro dos ecossistemas a longo prazo. A mudança climática é iminente e já se está experimentando. As alternativas diante desta mudança inevitável são a adaptação ao mesmo o melhor possível, usando o conhecimento do funcionamento dos sistemas biológicos e implementando ferramentas que devem estar ao serviço dos produtores.

pastizales y sabanas; matorrales secos espinosos al norte de Brasil (Caatinga); bosques secos abiertos en el Chaco; arbustales en el Monte; pastizales en la Pampa; y la estepa arbustiva árida Patagónica al Sur de Argentina (Figura 1). La mayoría de estas áreas están asociadas a climas que tienen una estación seca marcada, experimentan incendios frecuentes y/o tienen condiciones de suelos que limitan el crecimiento de las plantas.

La productividad y la composición de especies vegetales de los pastizales están directamente relacionadas con la distribución estacional y las cantidades anuales de las precipitaciones, que son variables entre años. Indirectamente, la productividad de los pastizales está controlada por otras

variables climáticas, como la temperatura, o por el tipo de suelo. La producción primaria neta, la tasa anual a la cual las plantas acumulan masa vegetal, aumenta linealmente a lo largo del gradiente árido-subhúmedo (150-1500mm de precipitación media anual; Sala *et al.*, 1988). Esta relación entre producción primaria neta y precipitación es muy similar en distintas regiones geográficas, con un incremento de producción anual entre 0,5 y 0,75g·m⁻²·por cada milímetro de lluvia (Mcnaughton *et al.*, 1993). A su vez, la productividad primaria neta determina la cantidad de herbívoros, tanto domésticos como silvestres, puesto que constituye la fuente de alimento de estos animales (Mcnaughton *et al.*, 1989). Cuan-

do los herbívoros son domésticos, la biomasa del ganado que se produce por unidad de producción primaria neta es un orden de magnitud mayor que la de herbívoros nativos, lo que demuestra que las prácticas de manejo agronómicas, tales como suplemento dietario, prácticas veterinarias o eliminación de predadores aumenta significativamente la cantidad de animales que puede haber en los pastizales (Oesterheld *et al.*, 1992).

Si se combinan estas dos relaciones, precipitaciones con productividad primaria neta y productividad primaria neta con biomasa de herbívoros domésticos, se obtiene por resultado una relación directa entre la precipitación anual y la biomasa de herbívoros domésticos (Figura 2). Esta rela-

ción resulta muy útil para poder predecir la producción ganadera en función de las lluvias del año a escalas regionales. La biomasa de herbívoros domésticos graficada está representada por vacas en el extremo húmedo y por ovejas en el extremo más seco, ya que las regiones húmedas tienen sobre todo ganado vacuno y las regiones secas ganado ovino (Oesterheld *et al.*, 1992). Hay así un patrón de cambio en el tamaño corporal promedio de los grandes herbívoros domésticos a lo largo del gradiente de precipitación. Mientras que la proporción de ovejas en la producción ganadera es casi 100% en la estepa Patagónica, donde llueve menos de 200mm anuales, baja a casi 0% en las regiones subtropicales que tienen la



Figura 1: Distribución de las regiones de pastizales, montes y sabanas que se usan para pastoreo extensivo, es decir la forma tradicional de producción animal, en Sudamérica. Se muestran las distintas regiones de Sudamérica ocupadas por ecosistemas de climas áridos hasta subhúmedos en las que el pastoreo es una de las principales actividades productivas. Reproducido con permiso de Yahdjian y Sala (2008).

mayor productividad, con precipitaciones anuales cercanas a 1500mm.

Los modelos de circulación general de la atmósfera (MCG) son una representación espacial y temporal aproximada de los principales procesos físicos que ocurren en la atmósfera y de sus interacciones con otros componentes del medio ambiente. En la actualidad, son las herramientas más confiables para la investigación del futuro del clima, sus fluctuaciones y variaciones. Un MCG es esencialmente un sistema de algoritmos matemáticos que intenta simular el sistema climático de la Tierra. Las ecuaciones expresan las le-

yes físicas que gobiernan el sistema y pueden incluir modelos de funcionamiento de los océanos (MCG acoplados), la criósfera, y representaciones simplificadas de la biosfera. Estos modelos acoplados (atmósfera, océano y vegetación) son los modelos del cli-

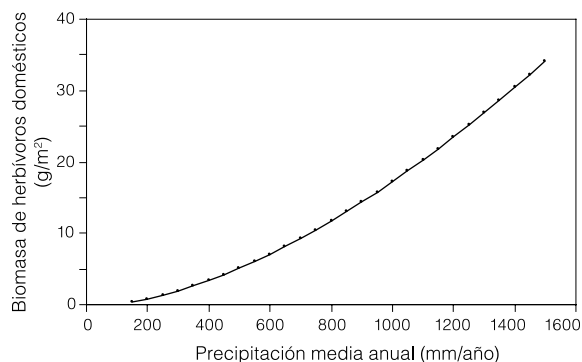


Figura 2. Relación entre la biomasa de herbívoros domésticos y la precipitación media anual en ecosistemas de Sudamérica de climas áridos hasta subhúmedos. La ecuación del modelo es Biomasa de herbívoros domésticos = $((0,48 \times \text{mm de precipitación anual}^{-30}) \exp(1,602) / 9590$.

ma más complejos, y predicen cambios de las variables en tiempos más largos que los modelos climáticos no acoplados. En la comunidad científica internacional existen varios grupos que han desarrollado MCG para sus investigaciones climáticas. Cada uno de ellos perfecciona los métodos de modelado de los procesos físicos y las técnicas de resolución numérica de las ecuaciones, conforme avanzan el conocimiento científico y la capacidad de las computadoras. Los resultados de diferentes modelos no son entonces necesariamente idénticos, y la disparidad refleja el grado actual de incertidumbre en el conocimiento de la respuesta del clima al efecto del aumento de los gases con efecto invernadero y en la marcha de sus emisiones. Los resultados de simulaciones del clima actual son cotejados con datos observados (validación), lo que permite ponderar la eficiencia de cada modelo y orientar el desarrollo de mejoras futuras.

El Cambio Climático en Sudamérica

Según predicen los modelos de cambio climático actuales, muy probablemente todo Sudamérica se calentará durante este siglo y la temperatura promedio puede llegar a subir 2°C para el 2020 y 4°C para el 2080 (Christensen *et al.*, 2007). Las predicciones señalan mayor calentamiento en la región tropical de Sudamérica y en general en las regiones más continentales como la Amazonia (Figura 3). Sin embargo, toda la región sudamericana sufrirá un calentamiento durante esta centuria, aunque las

magnitudes varían de acuerdo a los escenarios que emplean los diversos modelos. Las variaciones de este calentamiento a lo largo del año serán pequeñas. Las proyecciones indican mayor tendencia al calentamiento durante el verano que durante el invierno, excepto para el centro de la Amazonia que experimentará mayor calentamiento durante el invierno (Figura 3). En otras regiones como la costa del Pacífico, la costa norte de Sudamérica, el centro de Uruguay y la Patagonia se espera un aumento de las temperaturas durante todo el año.

Los pronósticos de cambios en las precipitaciones generados por los modelos de circulación general de la atmósfera muestran que los patrones de lluvias son bastante complejos. Los modelos predicen que la precipitación anual disminuirá en el sur de los Andes, sobre todo durante el verano, aumentará en Tierra del Fuego durante el invierno, y aumentará en la región pampeana durante el verano (Figura 3). En la región tropical de Sudamérica las proyecciones son variables, oscilando entre una reducción de 20-40% de las lluvias hasta un aumento de 5-10% para el 2080. Los ciclos estacionales se acentuarán en la cuenca amazónica, en la que las lluvias aumentarán en verano y disminuirán en invierno (Figura 3). Hay mucha incertidumbre en los cambios en las lluvias en la región sur de Sudamérica durante ambas estaciones, invierno y verano, aunque el porcentaje esperado de cambio es menor que en la región tropical. En el norte de Sudamérica, directamente no se sabe cómo van a cambiar las lluvias anuales y estacionales (Figura 3). En algunas regiones hay acuerdo entre las simulaciones; por ejemplo, se predicen aumentos de la lluvia en Ecuador y norte de Perú, y disminuciones en el extremo norte del continente y en la porción sur del nordeste de Brasil (Figura 3).

La frecuencia e intensidad de eventos climáticos extre-

mos como sequías e inundaciones en Sudamérica probablemente aumentará en el futuro, lo que afectará la precipitación efectiva, es decir la parte de las lluvias que las plantas pueden usar, y la producción primaria neta futura. Los años secos pueden volverse más comunes y más pronunciados, lo que seguramente causará mayor variabilidad de la producción entre años, con consecuencias negativas para la producción de forraje y la estabilidad de la producción ganadera (Knapp *et al.*, 2008). Algunos modelos anticipan la ocurrencia de períodos extremadamente húmedos, mientras que otros muestran la tendencia opuesta. Sin embargo, los modelos acuerdan con la proyección de un aumento en la frecuencia de eventos de lluvias intensas a lo largo de extensas áreas en el sudeste de Sudamérica y menos intensas en las costas del nordeste de Brasil (Christensen *et al.*, 2007).

Efectos del Cambio Climático

La producción ganadera podría aumentar en algunas regiones como consecuencia del aumento en las precipitaciones, como por ejemplo en la región pampeana. Pero también podría verse afectada negativamente por el aumento en la temperatura y las tasas de evapotranspiración, es decir pérdidas de vapor de agua desde el suelo y las plantas. Algunos de estos efectos ya están teniendo lugar y han sido observados. Por ejemplo, durante el siglo XX se observaron aumentos significativos de las lluvias anuales en el sur de Brasil, Paraguay, Uruguay, y noroeste de Argentina y noroeste de Perú y

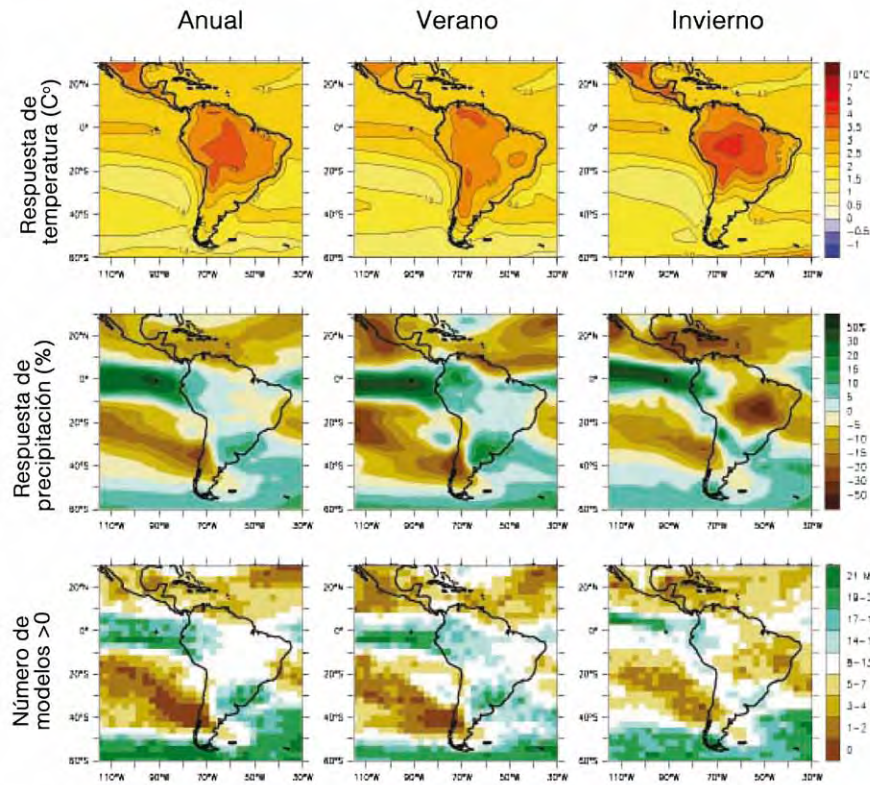


Figura 3. Cambios en la temperatura y la precipitación en Centro y Sudamérica a partir de las simulaciones MMD-A1B. Fila de arriba: cambios en la temperatura media anual, de verano y de invierno entre 1980 y 1999 y 2080 y 2099, promediada para 21 modelos. Fila del medio: igual que arriba, pero para cambios en la precipitación. Fila de abajo: número de modelos entre los 21 evaluados que predicen aumentos en la precipitación. Reproducido con permiso de Christensen *et al.*, (2007).

Ecuador. Los aumentos de la lluvia durante la década del 90 en la región pampeana de Argentina y en los pastizales de Uruguay provocaron un aumento en la productividad de las pasturas de alrededor de 7%, junto con aumentos de la producción de soja, maíz, trigo y girasol (Gimenez, 2006). Por el contrario, se observaron disminuciones de las lluvias en el extremo sur de Chile, sudoeste de Argentina y sur de Perú. Además, durante las últimas tres décadas, Sudamérica estuvo sujeta a impactos climáticos relacionados con aumentos en la intensidad del fenómeno de El Niño. Se registraron dos episodios extremos de este fenómeno en los veranos 1982/83 y 1997/98, que junto con otros eventos climáticos extremos ocurridos durante este período, contribuyeron a una mayor vulnerabilidad de los sistemas humanos frente a desastres

naturales (inundaciones, sequías, desmoronamiento de laderas, etc.).

Junto con los cambios climáticos, en el futuro habrá un aumento en la demanda humana de los servicios de los ecosistemas como provisión de agua potable, suelo fértil para cultivos y alimento para el ganado, etc. Esto se evidenciará con cambios o intensificación en el uso de la tierra, lo que tendrá implicancias ambientales significativas. De hecho, ya estamos evidenciando un aumento de la superficie cultivada con soja en detrimento del bosque nativo en diversas regiones de Sudamérica (Grau *et al.*, 2005) y esta tendencia será uno de los principales cambios en el uso de la tierra futuros, posiblemente duplicándose hacia el 2020 (Zak *et al.*, 2008). Este cambio masivo en el uso de la tierra impactará en la diversidad biológica y la composición de los

ecosistemas de Sudamérica y seguramente tendrá implicancias importantes en el clima local y regional. La intensificación del uso agrícola es otro de los cambios en el uso de la tierra futuros. En la región Patagónica extra-andina por ejemplo, la introducción de un número de ovejas insostenible en los campos, junto con un manejo inapropiado, provocó cambios importantes en la composición del forraje, la producción primaria y la extensión de la desertificación. La respuesta de los sistemas biológicos puede intensificar el proceso iniciado por cambios en el clima si no se introducen herramientas de manejo que mitiguen o compensen sus efectos (Schlesinger *et al.*, 1990).

Estudios de Producción

Para conocer mejor los posibles impactos del cambio climático, es importante conocer la respuesta de los ecosistemas ante cambios en la temperatura o las lluvias. Una de las aproximaciones para el estudio del efecto del cambio climático en la producción de los ecosistemas es la realización de experimentos manipulativos que permiten medir los cambios ecológicos como consecuencia de cambios en factores climáticos, como las precipitaciones. Estos estudios experimentales se complementan con estudios de series temporales o seguimientos con información satelital, que permiten entender las consecuencias del cambio climático en escalas de tiempo más largas y escalas espaciales más extensas que las empleadas en los experimentos. Las lluvias, por ser uno de los principales facto-

res que controlan el funcionamiento de los ecosistemas en el rango de climas árido-subhúmedo, es una de las variables modificadas. Los cambios en la cantidad de lluvias anuales y su distribución a lo largo del año tienen un impacto importante en la producción de las plantas y en la del resto de los niveles tróficos del ecosistema (animales y descomponedores). Estas manipulaciones de las lluvias pueden involucrar cambios en la cantidad total, en la distribución estacional o en la frecuencia y el tamaño de los pulsos en los que la lluvia ingresa al ecosistema (Fay *et al.*, 2000; Yahdjian y Sala, 2002). Las manipulaciones pueden realizarse para simular años secos, a través de la exclusión parcial o total de la lluvia, años húmedos, a través de sistemas de riego, o bien pueden darse combinaciones de exclusión de lluvia y riego que permiten modificar la distribución natural anual o interanual de las precipitaciones. Estos experimentos se pueden realizar en invernáculos, en pequeñas áreas experimentales o directamente a campo.

En experimentos a campo, la simulación de sequía puede involucrar la exclusión de lluvia a través de interceptores móviles que sólo funcionan en los períodos de lluvias o techos fijos que reducen la cantidad de agua que llega al suelo (Figura 4). La combinación de interceptores fijos con sistemas de riego que controlan el agua caída permite la simulación de cambios de clima. Estos experimentos manipulativos ayudan a comprender las consecuencias ecológicas del cambio climático. Por ejemplo,



Figura 4: Interceptores de lluvia diseñados para simular sequía de intensidad variable en un experimento a campo en la estepa Patagónica, Sudoeste de Chubut, Argentina. Los modelos contenían 6, 10 o 14 bandas de acrílico y fueron diseñados para interceptar el 30, 55 u 80% de la precipitación, que era colectada en un tanque flexible ubicado al lado de la parcela experimental. Se muestra un modelo con 10 bandas de acrílico, diseñado para interceptar el 55% de la precipitación y simular una sequía de mediana intensidad.

en la estepa Patagónica, experimentos manipulativos mostraron que una sequía de gran intensidad (80% de reducción de la lluvia) causó un 40% de disminución de la productividad primaria respecto de sitios que no sufrieron sequía (Yahdjian y Sala, 2006). La combinación de simulaciones de sequía con diversa intensidad primero y simulación de años húmedos posteriores permitió entender la variabilidad de la producción primaria y las posibles causas de estos cambios.

Las Simulaciones y su Utilización

Los modelos matemáticos y las simulaciones numéricas son herramientas valiosas en los estudios, al complementar los experimentos de campo y laboratorio desarrollados para predecir los cambios en la producción vegetal en respuesta a cambios climáticos. Por ejemplo, los modelos de Circulación General de la atmósfera mencionados anteriormente también se usan para experimentación, pero aplicados a grandes escalas. Mediante la aplicación de diversos métodos de cálculo numérico pueden obtenerse soluciones aproximadas del si-

stema de ecuaciones de un MCG. De la integración en el tiempo de este sistema se obtiene como solución la evolución temporal y espacial (tridimensional) del sistema climático, en función de las condiciones iniciales y de contorno elegidas y de los valores de ciertos parámetros climáticos (p.ej. concentración de CO₂ atmosférico). A esto se denomina experimento numérico, simulación climática ó experimento climático. Los experimentos climáticos pueden orientarse tanto a la descripción del clima contemporáneo (experimentos de control), como a la investigación del clima resultante de uno o más cambios en los parámetros climáticos (p.ej. simulación del efecto de una duplicación de la actual concentración de CO₂). La comparación de los resultados de estas simulaciones permite estimar los cambios climáticos que la variación de estos factores ambientales produciría. Los MCG por ser globales tienen una resolución relativamente baja, por lo que no son muy indicados para estudios a pequeña escala. En esos casos hay que usar modelos regionales que pueden tomar resoluciones mayores y ser más hábiles en la determinación del clima de una región.

Hay sistemas de evaluación y seguimiento de la productividad forrajera mediante sensores remotos que permiten estimar mensualmente la productividad forrajera a escala de lote. El sistema está basado en información satelital que es transformada en productividad mediante modelos empíricos (Grigera *et al.*, 2007). Los sensores actuales combinan alta resolución espacial y temporal con georeferenciación, correcciones atmosféricas y detección de nubosidad, características básicas para poder realizar

un seguimiento de los recursos forrajeros a la escala de unidad de manejo. Han sido aplicados tanto en regiones áridas como húmedas (Fabricante *et al.*, 2009, Grigera *et al.*, 2007).

En la medida en que se puedan conocer las relaciones entre la producción y el clima y que los pronósticos climáticos se hagan más precisos y confiables, se pueden implementar sistemas de alarma temprana que permitan mitigar las consecuencias negativas del cambio climático (Rimoldi y Buono, 2001; Jobbágy *et al.*, 2002; Grigera *et al.*, 2007). En este sentido, una herramienta extremadamente útil para minimizar el riesgo del cambio climático es el desarrollo de un sistema de alarma ganadero (SAG) a nivel regional, para alertar a los productores sobre las sequías inminentes y sus consecuencias sobre la disponibilidad de forraje, a fin de mitigar las pérdidas económicas a corto plazo y el deterioro de los ecosistemas en el largo plazo.

Arriba se describió cómo el cambio climático global afectará a los pastizales Sudamericanos a través de una reducción en la disponibilidad de agua y un aumento de la variabilidad entre años. La disminución en la disponibilidad de agua es la resultante de un aumento de la temperatura que, en algunos casos, se verá amplificada por una disminución de las precipitaciones. En general, para el productor agropecuario es más fácil adaptarse a una disminución de agua constante que a un aumento de la variabilidad, que trae aparejada sequías extremas seguidas por años muy húmedos. Sequías extremas en el corto plazo resultan en una disminución de la producción de forraje y en el largo plazo en el sobrepastoreo y deterioro del pastizal. La combinación de sequía y sobrepastoreo ha llevado a los pastizales, en algunos casos, a la degradación irreversible, consecuencia de la pérdida de suelo, introducción de espe-

cies invasoras sin valor forrajero y pérdida de especies con valor forrajero.

El sistema de alarma ganadero alertaría a productores agropecuarios y técnicos en diferentes órganos provinciales y nacionales sobre la posibilidad de sequía extrema y sugeriría acciones rápidas tendientes a proteger los pastizales y la producción animal que ellos sostienen. Estos tipos de sistemas de alarma están conceptualmente relacionados con los sistemas de alarma de plagas que se usan en la producción frutícola y que alertan a los productores y técnicos sobre la necesidad de comenzar acciones tendientes a controlar una determinada plaga.

El sistema de alarma SAG estaría basado en el uso de pronósticos meteorológicos de mediano plazo (semanas a meses), modelos ecológicos capaces de predecir las consecuencias de cambios climáticos para el funcionamiento de los pastizales y la producción ganadera, y finalmente una red rápida de comunicación de los resultados del SAG. Los modelos de predicción climática de mediano plazo están actualmente disponibles y han mejorado significativamente en los últimos años. De la misma manera, existen modelos ecológicos capaces de utilizar predicciones climáticas de mediano plazo y transformarlas en predicciones de producción y peligro de deterioro.

Un conocimiento anticipado de las condiciones de riesgo es sólo parte de la solución para disminuir las deficiencias de forraje y agua de bebida que surgen de una sequía extrema. En respuesta a un pronóstico de reducción severa en la producción de forraje, los productores pueden vender ganado o comprar forraje y conseguir fuentes alternativas de agua. Los productores que sigan el SAG y decidan vender parte de su ganado se verían favorecidos por precios más altos de los que obtendrían si vendieran luego que la sequía se haya

establecido y los animales hayan perdido estado nutricional. Así el sistema de alarma disminuiría la variabilidad en los ingresos de los productores agropecuarios que en general es mayor que la variabilidad climática. Períodos de sequía resultan en disminución de la producción y el precio del producto, resultante de que muchos productores se ven forzados a vender sus animales ya que no existe suficiente forraje. El SAG puede sugerir otras muchas alternativas de respuesta a la sequía que no estén relacionadas con la venta de ganado. Por ejemplo, que los productores, con o sin el apoyo estatal, puedan usar reservas forrajeras producidas localmente o traídas de otras regiones. Las instituciones provinciales y nacionales serían una parte clave para el desarrollo de sistemas de alarma ya que ellas podrían implementar el diseño del SAG y de la red de comunicaciones por medio de televisión y radio con productores y técnicos. Los gobiernos podrían crear instrumentos económicos que faciliten la utilización de los pronósticos del SAG: nuevos créditos a tasas preferenciales para la compra de forraje, reducciones impositivas temporarias, y otros. Los sistemas de alarma representan una herramienta tecnológica útil dentro de un contexto de aumento de la variabilidad climática y de la producción forrajera y ganadera.

El cambio climático es inminente. Las alternativas que tenemos ante este cambio inevitable son adoptar prácticas tendientes a la mitigación del cambio climático y adaptarnos al mismo lo mejor posible, usando el conocimiento del funcionamiento de los sistemas biológicos e implementando herramientas que deben estar al servicio de los productores.

AGRADECIMIENTOS

Los estudios presentados en este trabajo fueron realizados

con el apoyo del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET; PIP 132), la Universidad de Buenos Aires (UBA; G440), la US National Science Foundation (DEB 0917668) y Arizona State University. Los autores agradecen los comentarios realizados por Martín Oesterheld.

REFERENCIAS

- Christensen JH, Hewitson B, Busuioic A, Chen A, Gao X, Held I, Jones R, Kolli RK, Kwon WT, Laprise R, Magaña Rueda V, Mearns L, Menéndez CG, Raisanen J, Rinke A, Sarr A, Whetton P (2007) Regional Climate Projections. En Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (Eds.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. Nueva York, NY, EEUU.
- Fabricante I, Oesterheld M, Paruelo JM (2009) Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia. *J. Arid Env.* 73: 745-753.
- Fay PA, Carlisle JD, Knapp AK, Blair JM, Collins SL (2000) Altering rainfall timing and quantity in a mesic grassland ecosystem: design and performance of rainfall manipulation shelters. *Ecosystems* 3: 308-319.
- Giménez A (2006) *Climate Change and Variability in the Mixed Crop/Livestock Production Systems of the Argentinean, Brazilian and Uruguayan Pampas*. Final Report, AIACC Project LA27. 70 pp. www.aiaccproject.org/.
- Grau HR, Aide TM, Gasparri NI (2005) Globalization and Soybean Expansion into Semiarid Ecosystems of Argentina. *AMBIO J. Human Env.* 34: 265-266.
- Grigera G, Oesterheld M, Pacin F (2007) Monitoring forage production for farmers' decision making. *Agric. Syst.* 94: 637-648.
- Jobbágy E, Sala OE, Paruelo JM (2002) Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach. *Ecology* 83: 307-319.

- Knapp AK, Beier C, Briske DD, Classen AT, Luo Y, Reichstein M, Smith MD, Smith SD, Bell JE, Fay PA, Heisler JL, Leavitt SW, Sherry R, Smith B, Weng E (2008) Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. *BioScience* 58: 811-821.
- McNaughton SJ, Oesterheld M, Frank DA, Williams KJ (1989) Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature* 341: 142-144.
- McNaughton SJ, Sala OE, Oesterheld M (1993) Comparative ecology of African and South American arid to subhumid ecosystems. En Goldblatt P (Ed.) *Biological Relationships Between Africa and South America*. Yale University Press. New Haven, CT, EEUU. pp. 548-567.
- Oesterheld M, Sala OE, McNaughton SJ (1992) Effect of animal husbandry on herbivore-carrying capacity at a regional scale. *Nature* 356: 234-236.
- Rimoldi P, Buono G (2001) Esquema flexible de ajuste de cargas por precipitación. En INTA (Ed.) *IV Reunión del Grupo Regional Patagónico de Ecosistemas de Pastoreo: Taller de Actualización sobre Métodos de Evaluación, Monitoreo y Recuperación de Pastizales Naturales Patagónicos*. Esquel, Chubut, Argentina. pp. 13-14.
- Sala OE, Parton WJ, Lauenroth WK, Joyce LA (1988) Primary production of the central grassland region of the United States. *Ecology* 69: 40-45.
- Schlesinger WH, Reynolds JF, Cunningham GL, Huenneke LF, Jarrell WM, Virginia RA, Whitford WG (1990) Biological feedbacks in global desertification. *Science* 247: 1043-1048.
- Yahdjian L, Sala OE (2002) A rain-out shelter design for intercepting different amounts of rainfall. *Oecologia* 133: 95-101.
- Yahdjian L, Sala OE (2006) Vegetation structure constrains primary production response to water availability in the Patagonian steppe. *Ecology* 87: 952-962.
- Yahdjian L, Sala OE (2008) Climate change impacts on South American Rangelands. *Rangelands* 30: 34-39.
- Zak M, Cabido M, Cáceres D, Díaz S (2008) What Drives Accelerated Land Cover Change in Central Argentina? Synergistic Consequences of Climatic, Socioeconomic, and Technological Factors. *Env. Manag.* 42: 181-189.