

# Impacto humano sobre los ecosistemas

## El caso de la desertificación

José M Paruelo

Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección.

Instituto de Investigaciones Fisiológicas y Ecológicas Vinculadas a la Agricultura (IFEVA)- Cátedra de Ecología, Facultad de Agronomía, UBA y CONICET

Martín R Aguiar

IFEVA-Cátedra de Ecología, Facultad de Agronomía, UBA y CONICET

*El deterioro de los recursos agua, suelo y vegetación asociado al fenómeno de desertificación modifica la capacidad de los ecosistemas de proveer servicios ecológicos esenciales. La evaluación de la desertificación plantea grandes desafíos a los ecólogos debido a la escala espacial y temporal a la que tienen lugar los procesos que determinan este fenómeno. El uso combinado de modelos de simulación, sensores remotos y experimentos de campo ha permitido un significativo avance en el análisis de los mecanismos y de la magnitud del deterioro ambiental en zonas áridas.*

**E**l estudio de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, de la dinámica de las poblaciones y de sus interacciones provee el marco conceptual para entender y operar sobre uno de los problemas más serios que enfrenta la humanidad en el siglo XXI: el impacto de las actividades humanas sobre los sistemas naturales. La mayor parte de las actividades humanas –agropecuarias, extractivas, turísticas, etc.– afecta en mayor o menor medida al ambiente. El área afectada (escala espacial) puede variar de lo local (< de 1km<sup>2</sup>), como en el caso de un derrame de un cierto producto tóxico, a lo global, en el caso del aumento de la concentración de gases con efecto invernadero. La duración del episodio (escala temporal) también varía desde lo episódico (un derrame tóxico) a lo

crónico (la construcción de un dique). En este artículo analizaremos las características del proceso de desertificación poniendo énfasis en cómo los conocimientos ecológicos contribuyen a entender y operar sobre el efecto de ciertas actividades humanas en ambientes áridos y semiáridos.

Los ambientes áridos y semiáridos ocupan la mayor parte de la Argentina. Estos ecosistemas proveen una serie de servicios ecológicos esenciales para el sostenimiento de la vida humana y para el desarrollo de actividades productivas. El deterioro de estos ambientes afectará seriamente la capacidad de los ecosistemas de proveer estos servicios. Ejemplificaremos estos cambios a partir de estudios realizados en el noroeste de la Patago-

nia argentina. La prensa, la opinión pública y las instituciones gubernamentales le han dado una gran trascendencia al problema de la desertificación en la Patagonia. El alcance de los ejemplos tiene un claro límite: la disponibilidad de evidencias científicas de estos cambios en la región. Por otra parte, la extensión y heterogeneidad de la región patagónica nos lleva a ser cuidadosos en la generalización de estudios puntuales sin un adecuado protocolo de extrapolación. El énfasis estará puesto en las estepas gramíneas y las praderas húmedas patagónicas debido a su particular fragilidad o vulnerabilidad al deterioro.

### ¿Qué es la desertificación?

La convención sobre la desertificación organizada por la UNEP (Comisión de las Naciones Unidas para la Protección del Ambiente) en Nairobi (Kenia) en 1977 llamó por primera vez la atención de los gobiernos sobre este problema ambiental. En ese momento se propuso una primera definición de este término: 'La desertificación es una reducción de la producción potencial de la tierra en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas, que puede en última instancia dar lugar a condiciones de desierto'. Una serie de expertos modificó ligeramente esta definición en los siguientes 15 años. En 1992, durante la convención de Río de Janeiro (Brasil) se definió a la desertificación como 'la degradación de tierras en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas que resulta de la acción de diversos factores que incluyen al clima y las actividades humanas'. Estas definiciones, con un alto grado de vaguedad, conforman en general a políticos pero no a quienes deben evaluar la desertificación y eventualmente controlarla. Es necesario ser más específicos con relación a qué entendemos por desertificación para poder operar sobre este proceso.

El término desertificación no es un fenómeno simple y cuantificable en sí mismo. Cuando se menciona la disminución de la producción potencial se hace referencia a un conjunto de procesos asociados al deterioro de ambientes áridos, semiáridos y subhúmedos. Tal deterioro involucra *la extinción local de especies, la erosión del suelo, la modificación de la estructura de la vegetación y la disminución de la productividad biológica del ecosistema*. Todos estos procesos pueden ocurrir espontáneamente debido a la acción de agentes naturales y/o a la dinámica interna del ecosistema. Por ejemplo, la erosión eólica o hídrica opera sobre los paisajes patagónicos de manera indepen-

diente a la acción del hombre (figura 1). Por otro lado, las interacciones que se plantean entre las poblaciones que componen las comunidades determinan cambios independientemente de los factores externos. Sin embargo, solo hablaremos de desertificación cuando los cambios tienen lugar por acción del hombre (figura 2).

Para poder entender el proceso de desertificación, es necesario primero establecer claramente la diferencia con el concepto de *aridez*. La aridez hace referencia a una condición ambiental promedio, mientras que la desertificación corresponde a un proceso de cambio direccional con una clara dimensión temporal. En la definición de aridez se tiene en cuenta la relación entre la 'demanda' de agua promedio anual de la atmósfera (la evapotranspiración potencial) y la 'oferta' de agua promedio (la precipitación anual). Esta condición está determinada climáticamente y es independiente de la actividad humana. Se clasifican como áreas áridas, semiáridas o subhúmedas secas a aquellas en las cuales la precipitación media anual solo cubre el 65 por ciento de la demanda atmosférica promedio del año. La mayor parte de la Patagonia queda por debajo de dicho límite. Para poder afirmar la ocurrencia de la desertificación deberíamos poder trazar la

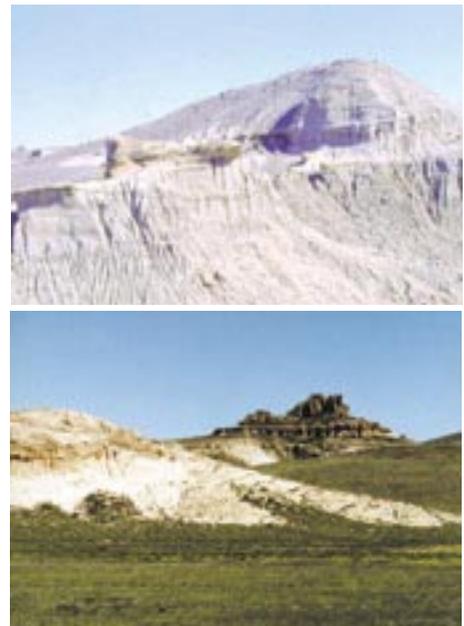


Figura 1. Procesos de erosión natural en la Patagonia (Fotos: JM Paruelo).



Figura 2. Erosión asociada a actividades humanas.

dinámica en el tiempo de uno o más cambios asociados al proceso de deterioro del ecosistema (la extinción local de especies, la erosión del suelo, la modificación de la estructura de la vegetación y/o la disminución de la productividad biológica del ecosistema).

### ¿Por qué nos interesa evaluar la desertificación?

El deterioro de los recursos agua, suelo y vegetación asociado al fenómeno de desertificación modifica, en el corto y largo plazo, la capacidad del ecosistema de proveer *servicios ecológicos*. Los servicios de los ecosistemas son las condiciones y procesos a través de los cuales estos sostienen y satisfacen la vida humana. La sociedad ha modificado los ecosistemas naturales y de ellos obtiene una cantidad de bienes esenciales para su funcionamiento y bienestar: alimentos, fibras, combustibles, drogas, etc. Todos estos bienes tienen una enorme importancia económica. El aumento o disminución de la oferta o la demanda de estos bienes adquiere una gran importancia a la hora de tomar decisiones relacionadas con los recursos naturales. Estas decisiones generalmente están asociadas a un análisis de costos y beneficios económicos. Para muchos de estos bienes estas decisiones son sencillas ya que se encuentran incorporados al mercado y este, en última instancia, define un valor para cada uno de ellos.

Existe sin embargo una cantidad de bienes y servicios que no están incorporados en los análisis económicos. Sin estos servicios, por otra parte, la humanidad no podría sostenerse. Una lista de ellos incluye: el mantenimiento de la biodiversidad, la moderación de fenómenos meteorológicos y de sus efectos, la purificación del agua y del aire, la regulación de la composición atmosférica, el ciclo de nutrientes y materiales, la detoxificación y descomposición de residuos, la recreación y estímulo intelectual, el control de la erosión, entre otros.

Ninguno de estos servicios se comercializa en un mercado formal y, por lo tanto, carece de un precio o valor económico. Esto dificulta la toma de decisiones debido a que la valuación es materia opinable y depende de los criterios de las personas que realicen la valoración. La definición de los mecanismos a través de los cuales los servicios de los ecosistemas pueden ser valuados ha generado un intenso debate ya que, en general, se trata de 'externalidades' positivas: los servicios provistos por el ecosistema y, por lo tanto, los beneficios son, en general, externos (no apropiables) a las

partes involucradas en la definición de un precio de mercado de ese ecosistema. La desertificación reducirá sensiblemente la capacidad de los ecosistemas de proveer algunos de estos servicios. Dicha reducción está asociada a una *alteración de la estructura y el funcionamiento del ecosistema*. Las actividades humanas modifican la distribución de biomasa entre organismos y compartimentos del ecosistema, su arreglo espacial y la manera en que estos intercambian materia y energía con el ambiente. El grado de alteración de estos servicios proveerá una medida de la mayor o menor sustentabilidad de ese ecosistema.

Se ha relacionado la capacidad de proveer servicios con la 'salud del ecosistema' y con la idea de 'sustentabilidad'. Un ecosistema saludable será estable y sustentable, manteniendo su organización, autonomía en el tiempo y su capacidad de recuperación ante disturbios que generen algún grado de estrés. La desertificación puede verse como una alteración compleja de la salud de los ecosistemas áridos y semiáridos. La idea de 'salud' aplicada a un ecosistema es claramente una metáfora y no implica necesariamente considerar al ecosistema como un organismo. La salud de ecosistemas semiáridos se relaciona con tres aspectos centrales: la productividad, la integridad biológica y el aspecto estético. El desarrollo de indicadores debería ser capaz de captar la manera en la que estos tres factores se modifican. En las páginas siguientes trataremos únicamente el primer aspecto, partiendo del supuesto de que la integridad biológica está asociada a la productividad. El tercer factor está fuera del alcance de nuestro análisis aunque las fotografías que ilustran el artículo aportan evidencias acerca de los cambios estéticos asociados al deterioro.

### ¿Cómo evaluamos la desertificación?

La naturaleza dinámica de la desertificación plantea un serio inconveniente. La observación de un ecosistema en un único momento no permitirá extraer conclusiones acerca de cuán desertificado se encuentra: ¿en qué medida la baja cobertura vegetal, la dominancia de plantas xerofíticas o la escasa productividad son una manifestación del grado de aridez del sistema o de un proceso de deterioro? En ecosistemas áridos o semiáridos los procesos tienen una dinámica lenta, por lo que el período de observación debería ser muy largo (del orden de años o décadas). Por otro lado, ¿cuál aspecto del deterioro debemos evaluar, cambios en la productividad, en la cobertura vegetal, en las especies, en los tipos funcionales de plantas o en el

suelo? La dinámica temporal de los cambios en cada uno de estos aspectos puede, además, no ser la misma. Una variable, por ejemplo la diversidad biológica, puede tener una respuesta lineal, otra, la productividad primaria, una respuesta curvilínea y una tercera, por ejemplo la proporción de tipos funcionales de plantas (pastos, arbustos, hierbas, etc.) una respuesta de tipo umbral.

Dada la dificultad para evaluar a lo largo del tiempo el deterioro de distintos aspectos del ecosistema, la detección y cuantificación de la desertificación requiere conocer el valor potencial de la variable a evaluar. Este valor corresponde al nivel de la variable en cuestión en ausencia de impacto humano y para un ambiente equivalente al estudiado. Descartando la posibilidad de acceder a registros pasados, los ecólogos recurren a dos alternativas complementarias para estimar estos estados de referencia: *la sustitución del tiempo por el espacio y el uso de modelos de simulación*.

En el caso de sustituir tiempo por espacio se ubican sitios que corresponderían a distintos estados a lo largo de una secuencia cronológica. Este tipo de análisis ha sido muy usado en, por ejemplo, estudios de la sucesión ecológica. La calidad de este análisis depende en gran medida de la posibilidad de datar el tiempo transcurrido desde el disturbio que dio origen a los cambios que se quieren estudiar. Además es necesario realizar una larga lista de supuestos, por ejemplo: que la intensidad del disturbio inicial y de su nivel a lo largo del tiempo es similar en sitios de distinta edad, que la situación inicial era idéntica o que los factores ambientales e históricos afectaron los sitios de manera similar. Por otra parte es muy importante caracterizar la variabilidad natural de un proceso para poder separar aquellos cambios que ocurren por efecto antrópico de los vinculados a las fluctuaciones naturales del sistema debidas, por ejemplo, a distintas condiciones climáticas. La figura 3 muestra la variabilidad natural de la productividad primaria en un pastizal de pastos cortos de Norteamérica. Los valores de un año pueden duplicar a los de otro solo por causas naturales. La falta de certeza acerca de los supuestos enunciados y de la variabilidad natural restringe muchas veces el alcance de la sustitución del tiempo por el espacio.

Los cambios que tienen lugar en los ecosistemas a lo largo del tiempo, ya sean espontáneos o inducidos por el hombre, no ocurren de manera sincrónica en el espacio. En todo paisaje es posible identificar áreas en las cuales estos cambios han estado ocurriendo por diferentes períodos de tiem-

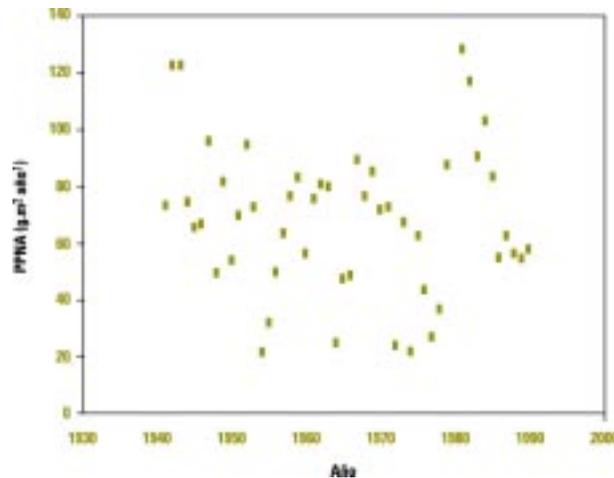


Figura 3. Variabilidad natural de la productividad primaria neta (PPNA) en un pastizal de pastos cortos en Colorado (Estados Unidos) (adaptado de Lauenroth WK y Sala OE, 1992, 'Long-term forage production of North American shortgrass steppe', *Ecological Applications* 2:397-403).

po y con distinta intensidad. Así se podrá encontrar un sector alejado de las aguadas al cual los animales rara vez acceden, con muy pocos signos de deterioro y otro próximo a la fuente de agua con un grado de alteración muy grande. En ocasiones es posible encontrar áreas que han permanecido clausuradas al pastoreo por períodos largos de tiempo. A partir de la ubicación en el espacio de áreas sometidas a distinto grado de alteración es posible reconstruir la secuencia de deterioro. El uso de áreas clausuradas de distinta edad es un ejemplo de cómo los ecólogos usan la sustitución de tiempo

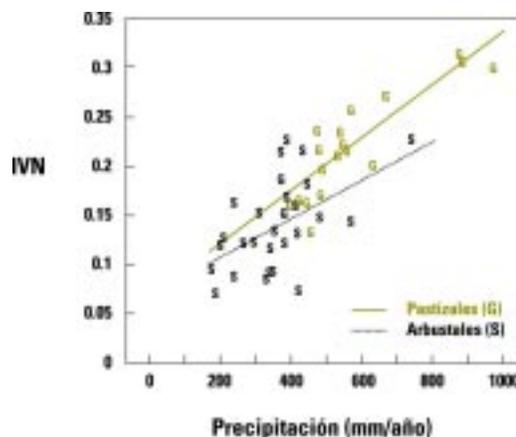


Figura 4. Relación entre el Índice Verde Normalizado promedio anual (IVN, un estimador lineal de la productividad primaria neta aérea) de zonas poco deterioradas o modificadas por el hombre y la precipitación primaria neta. Los ambientes incluidos en el gráfico corresponden a áreas de pastizales y arbustales de Norteamérica. El Índice Verde Normalizado es un índice espectral calculado a partir de la radiación reflejada por la superficie terrestre en las bandas del rojo y el infrarrojo cercano (adaptado de Paruelo JM y Lauenroth WK, 1995, 'Regional patterns of NDVI in North American grasslands and shrublands', *Ecology* 76:1888-1898).

por espacio en el estudio del deterioro de la vegetación. Se asume que la vegetación potencial de un área desertificada corresponde a la de la clausura más antigua ubicada en un hábitat similar.

Los modelos de simulación son una poderosa herramienta para explorar el comportamiento de largo plazo de los ecosistemas o para evaluar el efecto de disturbios que no pueden ser generados

## Modelos de estados y transiciones en la Patagonia

José Paruelo y Sandro Puetz\*

\*Investigador. Department of Ecological Modelling. UFZ Leipzig-Halle.

En la figura 1 se ilustran en forma esquemática los posibles estados y sus transiciones para una de las unidades de vegetación más frágiles del noroeste de la Patagonia, los mallines o vegas. Estos ambientes, que reciben aportes de agua por escurrimiento superficial o subsuperficial, se caracterizan por una alta cobertura en su situación no degradada y por la dominancia de gramíneas mesofíticas y cipéraceas. Cada estado representa una situación de deterioro que puede ser caracterizada en términos de su cobertura total,

proporción de tipos funcionales de plantas, características del suelo, etc. El pastoreo sin descansos y altas cargas reduce la cobertura vegetal. El pisoteo en suelos orgánicos, frágiles y con una marcada pendiente da lugar a la formación de canaliculos por donde el agua empieza a circular y a erosionar el ambiente. La profundización de estos canaliculos da lugar a la formación de cárcavas. En esas condiciones, la vegetación de vegas es reemplazada por plantas xerofíticas ya que el agua freática, que posibilitaba la existencia de vegetación mesofítica, baja su nivel cada vez más generando un ambiente más xérico. La

denudación del suelo y la exposición de las capas subsuperficiales acelera los procesos de erosión hídrica y eólica. Los distintos estados están relacionados entre sí y la transición entre ellos está mediada por una serie de factores que aumentan o disminuyen la probabilidad de que un estado se transforme en otro. Estos factores incluyen la precipitación actual, la redistribución del agua local y la presión de pastoreo, entre otros. Los factores mencionados unidos a la dinámica interna de la comunidad determinan los procesos básicos que dan lugar a las transiciones: mortalidad de ciertas plantas,

establecimiento de otras, cambios en cobertura total, erosión del suelo, etc. En buena medida los estados y transiciones así definidos son un conjunto de hipótesis, con mayor o menor grado de apoyo empírico, de la dinámica del sistema. Establecer estas hipótesis (o un modelo de estados y transiciones) sistematiza el conocimiento acerca del deterioro de un ecosistema dado y facilita su análisis crítico. Permite, a su vez, ubicar cuáles son los aspectos menos conocidos o los procesos involucrados a los que se les debe prestar mayor atención desde el punto de vista experimental. Nuevamente, los modelos de simulación aparecen como una alternativa muy interesante para explorar el comportamiento del sistema y estudiar la sensibilidad del proceso de deterioro a distintos supuestos relacionados a los controles de las transiciones. Los modelos, una vez evaluados, permiten explorar las consecuencias de largo plazo de alternativas de manejo y su interacción con variables climáticas sobre el proceso de deterioro.

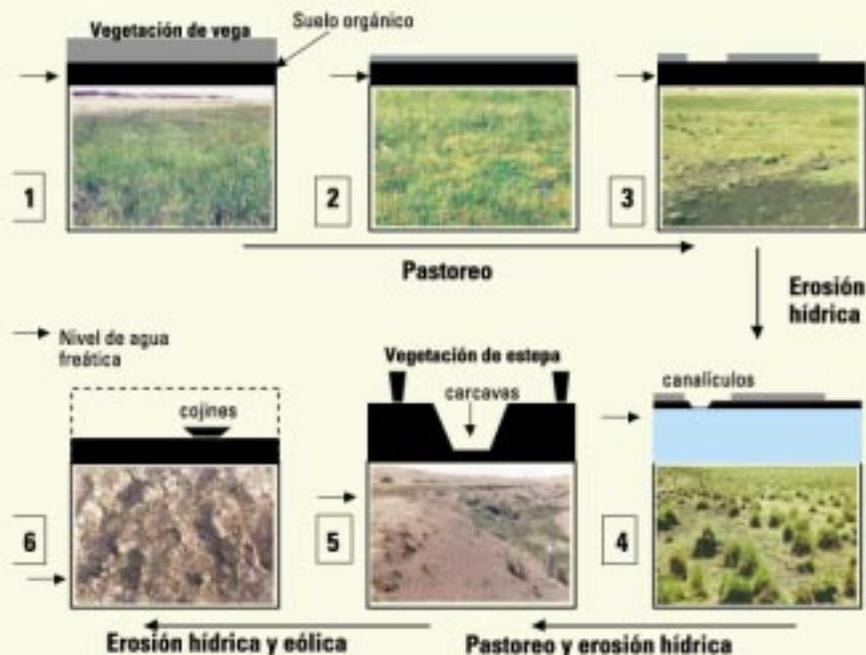


Figura 1. Secuencia de estados y transiciones asociados al deterioro de una pradera típica de mallines en la Patagonia.

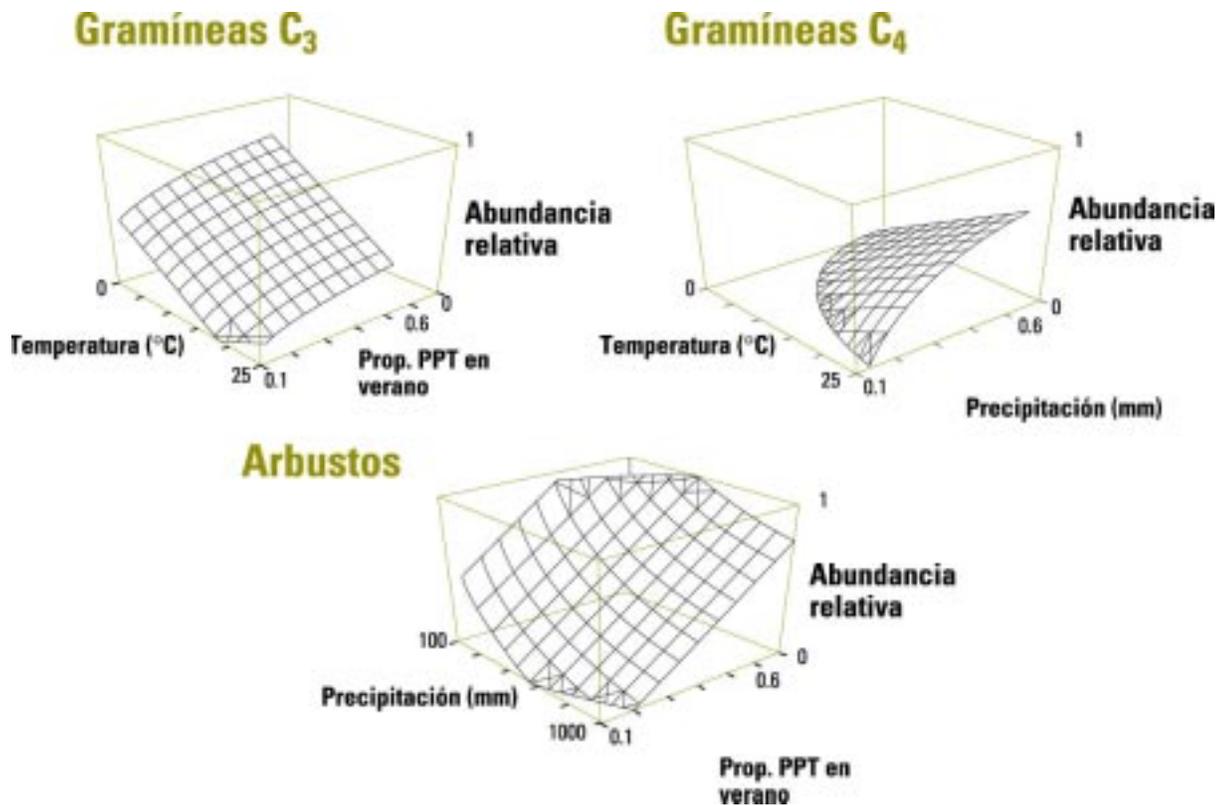


Figura 5. Relación entre la proporción relativa de arbustos, gramíneas de crecimiento invernal (C<sub>3</sub>) y estival (C<sub>4</sub>) y factores ambientales: precipitación media anual (PMA), temperatura media anual (TMA) y proporción de la precipitación caída en verano (PVER). Los datos usados para la generación del modelo corresponden a Norteamérica (adaptados de Paruelo JM y Lauenroth WK, 1996, 'Relative abundance of functional types in grasslands and shrublands of North America', *Ecological Applications* 6: 1212-1214).

experimentalmente. Los modelos de correlación entre la productividad primaria neta y la precipitación de sitios poco deteriorados permiten estimar la productividad potencial del sitio. Los modelos de simulación permiten resolver un problema fundamental, tener una estimación del nivel de referencia para una variable dada. Así por ejemplo observaciones de la productividad de áreas poco modificadas como parques nacionales o zonas protegidas, permiten generar modelos que a partir de las variables ambientales (por ejemplo, la precipitación) estiman los niveles potenciales de la productividad primaria, aquellos que corresponden a una situación sin deterioro. La información a obtener en estos casos está claramente asociada a la calidad del modelo la cual debe ser verificada mediante una adecuada evaluación. Esta evaluación consiste en contrastar los resultados del modelo con datos empíricos independientes a los usados en la generación del modelo. El recuadro 'Modelos de simulación. Su uso en el estudio de la desertificación' presenta algunos ejemplos del uso de modelos en el análisis de la desertificación.

Por otro lado, el proceso de desertificación no ocu-

rre a nivel de una planta o de una pequeña parcela. Los factores que lo determinan operan a nivel de paisaje (decenas a cientos de km<sup>2</sup>). Medir la productividad a esas escalas espaciales y por períodos suficientemente largos para incluir la variabilidad entre años es una limitante seria. ¿Qué alternativas ofrecen la ciencia y la técnica? En este caso los satélites aparecen en nuestra ayuda. Al registrar la radiación reflejada en las porciones rojas e infrarrojas del espectro electromagnético los sensores a bordo de los satélites permiten calcular índices que muestran una estrecha relación con la productividad primaria neta aérea. De esta manera es posible tener estimaciones de productividad primaria usando una misma metodología para grandes áreas y largos períodos de tiempo.

¿Cómo, entonces, pueden generarse estos escenarios de la estructura y funcionamiento potencial de la vegetación? Un ejemplo para la región de pastizales y arbustales de los Estados Unidos permite ilustrar este punto. A partir de mediciones del Índice Verde Normalizado (IVN), un índice espectral calculado a partir de mediciones satelitales y linealmente relacionado con la productividad de la vegetación y del registro de la precipitación media



Figura 6 A. Pastizales de *Festuca pallescens* en el oeste de Chubut (Argentina) poco deteriorados. B. La misma situación ambiental con dominancia de *Mulinum spinosum*, un arbusto creciente en condiciones de sobrepastoreo y pavimentos de erosión (Fotos: Paruelo JM).

anual, se generó un modelo que relaciona ambas variables para áreas protegidas (figura 4). Este modelo permite calcular la productividad 'potencial' de un área fuera de las zonas protegidas para las cuales fue generado el modelo. Un mapa de la productividad potencial calculado a partir de datos climáticos y la ecuación presentada en la figura 4 constituye, pues, una hipótesis de los niveles y de la heterogeneidad espacial de este aspecto del funcionamiento de la vegetación. De manera análoga se generaron para esta región relaciones entre algunos aspectos estructurales clave del ecosistema y variables ambientales para áreas con bajo o nulo impacto antrópico. Las variables elegidas fueron la proporción relativa de tres grupos funcionales de plantas: arbustos, gramíneas de ciclo invernal (con síndrome fotosintético  $C_3$ ) y gramíneas de ciclo estival (con síndrome fotosintético  $C_4$ ) (figura 5). ¿Cómo usamos estos escenarios para evaluar la desertificación? Básicamente comparando los valores predichos por los modelos con los observados en el campo (proporción de tipos funcionales) o por los satélites (productividad primaria).

#### La desertificación en la Patagonia

Las principales actividades económicas en la Patagonia continental son la ganadería ovina y la explotación petrolera. Ambas actividades promueven cambios en la vegetación y suelos. La primera lo hace mediante el pastoreo selectivo de los animales confinados a un sitio por un alambrado que los obliga a pastorear siempre las mismas especies (las preferidas) hasta provocar la muerte de plantas individuales. Una planta que muere puede ser sustituida por el establecimiento de otra planta de una especie de menor valor forrajero o por ninguna planta. En este caso el suelo queda descubierto y aumenta la probabilidad de erosión eólica o hídrica. La actividad petrolera, en cambio, fundamentalmente a partir del tráfico de maquinarias en caminos, playas de maniobras asociadas a los pozos petroleros, promueve no solo la desaparición de la cubierta vegetal (total y no específica) sino que también genera cambios en el suelo tales como compactación y erosión. El pastoreo en la Patagonia ha sido generalizado, a tal punto que en la actualidad no se conocen áreas remanentes no

pastoreadas. La explotación petrolera está más concentrada en el espacio, pero al mismo tiempo es un impacto de mayor intensidad. En el resto del artículo nos concentraremos en evaluar el pastoreo como agente que promueve y promovió procesos identificados como de desertificación.

La colonización de las estepas patagónicas ocurrió a fines del siglo XIX. Existieron dos rutas de colonización, una proveniente del norte y otra desde las costas hacia el interior del continente. En general, los herbívoros introducidos fueron vacas y ovejas, aunque las condiciones ambientales (clima y forraje) determinaron una progresiva predominancia de ovejas criadas para la producción de lana. La ganadería se introdujo siguiendo pautas de manejo que traían los colonos, en su totalidad europeos. A partir de la colonización la cantidad de ovejas en la Patagonia ha mostrado dos fases, una creciente, que llega hasta mediados del siglo XX, seguida por una fase decreciente. Esta caída en el número de ovejas totales ha sido interpreta-

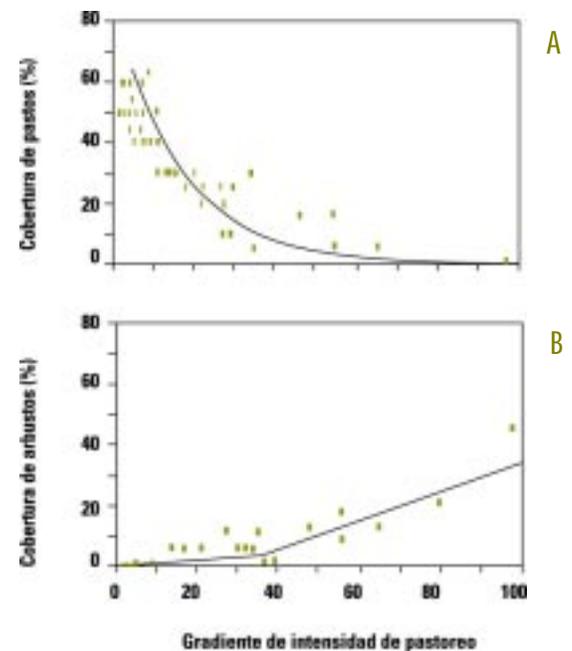


Figura 7. Cambios en la cobertura de la gramínea dominante en las estepas gramíneas del oeste del Chubut (*Festuca pallescens*) (A) y de un arbusto nativo creciente (*Mulinum spinosum*) (B) a lo largo de un gradiente de deterioro por pastoreo (adaptado de León y Aguiar, 1985, 'El deterioro por uso pasturil en estepas herbáceas patagónicas', *Phytocoenologia* 13:181-196).

da como el resultado del progresivo deterioro de la productividad de las estepas patagónicas, es decir desertificación. Esta interpretación no parece estar errada ya que se han detectado otros cambios. Por ejemplo, la caída generalizada de la cobertura total, el aumento de especies poco pastoreadas al tiempo que disminuían las preferidas por el ganado, el aumento de indicios de erosión eólica e hídrica tales como la formación de cárcavas o médanos. En el recuadro 'Evaluación de los cambios a partir del "contraste de alambrados"', se presenta un ejemplo para las estepas gramino-

sas del distrito Subandino. En conjunto, estos cambios sugieren que el sobrepastoreo ovino ha causado un progresivo proceso de desertificación.

A lo largo del tiempo la menor productividad vegetal ha promovido cambios en la cantidad de animales, pero ¿cómo se relacionan los cambios en la vegetación o el suelo con los cambios en el número de ovejas? La progresiva pérdida de plantas de las especies más pastoreadas por las ovejas determina una peor alimentación. La alimentación regula no solo la cantidad de lana que producen las ovejas sino también su dinámica poblacional.

## Modelos de simulación. Su uso en el estudio de la desertificación

Thorsten Wiegand.

Investigador. Department of Ecological Modelling, UFZ Leipzig-Halle.

Durante la última década tuvo lugar un cambio en la manera de analizar la dinámica de sistemas áridos y semiáridos. Este cambio reconoció la ausencia de estados de equilibrios en las comunidades. La dinámica de la vegetación se caracteriza por la ocurrencia estocástica de eventos discretos y pulsos separados por largos períodos en los que no se verifica, por ejemplo, la instalación de nuevos individuos o la mortandad de otros. La interacción compleja entre la precipitación, la herbivoría, las características intrínsecas de la vegetación, el suelo y las diferencias determinadas por la escala espacial y temporal no hace trivial la tarea de entender la dinámica de la estructura de los ecosistemas áridos y semiáridos.

Una posibilidad para resolver este problema es el uso de modelos de simulación. Ellos

permiten describir el comportamiento de individuos de distintas especies y tipos funcionales de plantas, incorporando los conocimientos acerca de su historia de vida y de los factores y procesos claves de su dinámica (producción y dispersión de semillas, establecimiento, crecimiento, competencia, facilitación, producción de biomasa, defoliación, dinámica de agua, etc.). Este tipo de modelos tiene una ventaja fundamental: los datos necesarios para armar un conjunto de reglas que describa estos factores y procesos, que son en general accesibles a escalas de mayor detalle que la de todo el sistema. El 'truco' consiste entonces en utilizar el conocimiento sobre el comportamiento de individuos accesible a escalas de tiempo relativamente cortas y de espacio relativamente pequeñas e incorporar al modelo las determinantes y limitaciones al largo plazo (la precipitación o el manejo). La

dinámica del sistema a largo plazo emerge directamente del comportamiento del conjunto de sus elementos. En este marco conceptual se puede incorporar información que describe aspectos de la dinámica de la comunidad a largo plazo (por ejemplo, cambios asociados a clausuras al pastoreo, experimentos de evaluación de largo plazo). Estos datos no se pueden incorporar directamente al conjunto de reglas de un modelo que opera a la escala individual. No obstante, ellos juegan un papel importante para calibrar los parámetros y definir la estructura del modelo. La idea es simple; si el modelo reproduce los patrones observados podemos suponer que es capaz de capturar los aspectos más importantes de la dinámica del sistema. Si no, podemos suponer que faltan ingredientes importantes en el modelo y tenemos que modificarlo.

Una ventaja de los modelos de simulación es que estos nos permiten explorar

preguntas imposibles de contestar con técnicas tradicionales de campo debido fundamentalmente a problemas logísticos. Esas preguntas incluyen investigar el papel de la estocasticidad en la dinámica del sistema, tarea que requeriría armar y evaluar muchas de parcelas, o explorar la dinámica a largo plazo asumiendo distintas estrategias de manejo de ganado ovino, lo cual requiere de grandes superficies para acomodar situaciones con distinta carga o modalidad de pastoreo. Los modelos de simulación del tipo de los descriptos fueron aplicados a diversas comunidades de plantas en zonas áridas y semiáridas por todo el mundo, incluyendo comunidades semiáridas de arbustos en el Karoo (Sudáfrica), sabanas áridas en la Kalahari (Sudáfrica), el *western grassland biome* en Sudáfrica, acacias en el desierto de la Negev (Israel), la estepa arbustiva-graminosa o la estepa de *Festuca pallescens* en la Patagonia.

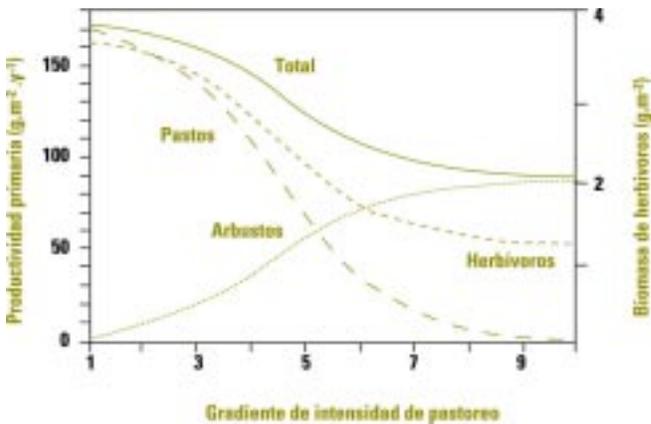


Figura 8. Cambios en la productividad primaria neta aérea y la biomasa de herbívoros a lo largo del gradiente de pastoreo (adaptado de Aguiar MR, Paruelo JM, Sala OE y Lauenroth WK, 1996, 'Ecosystem consequences of plant functional types changes in a semiarid grassland', *Journal of Vegetation Science* 7:381-390).

La mala alimentación reduce la supervivencia de corderos. Por otra parte, aumenta la mortalidad de las categorías adultas. Estos fracasos 'demográficos' son más evidentes en los años secos en los que las escasas lluvias determinan una baja productividad. Animales mal alimentados tienen menor tolerancia a situaciones climáticas extremas tales como las grandes nevadas.

¿Cómo promovió la explotación ovina estos cambios en la vegetación? El forrajeo constante sobre estas especies promueve dos efectos a nivel de la planta individual. Primero reduce la producción de semillas, reduciendo las posibilidades de reproducción o regeneración. Segundo, promueve que las plantas deban utilizar sus reservas para sostener la continua reposición de hojas removidas por el pastoreo. Esto finalmente promueve la muerte de las plantas que no pueden ser reemplazadas por otras plantas pues no hay semillas. En situaciones extremas de sobrepastoreo los animales van incorporando a su dieta especies de menor valor forrajero lo que determina un proceso generalizado de denudación del suelo y erosión. En este momento la desertificación se evidencia con mayor claridad. Sin embargo, de nuestro desarrollo surge que el proceso de desertificación ha comenzado antes, cuando la cobertura de las especies más pastoreadas comienza a decrecer.

¿Hasta qué punto los cambios son promovidos por el pastoreo o por la secuencia de años desfavorables? Hemos discutido el hecho de que la mayor mortalidad de ovejas o fracasos demográficos

ocurre en años con sequía o frío. Esta mortalidad se produce porque los animales se encuentran mal alimentados. Muchas veces los productores argumentan que la desertificación no es producto del uso sino de contingencias climáticas. En buena medida este argumento confunde la causa, ya que si bien la mortalidad se manifiesta en los años más severos las causas se originan antes y por otro proceso.

¿En qué se diferencia el pastoreo de los herbívoros nativos como los guanacos y las liebres patagónicas, del pastoreo que realizan las ovejas? O, de otra forma, ¿por qué el pastoreo ovino promueve desertificación? Existe un conjunto importante de datos que apoyan la idea de que los herbívoros son un agente de selección importante y que las plantas han respondido desarrollando un conjunto de caracteres que reducen las probabilidades de ser pastoreadas. Una lista incompleta de caracteres que reducen el pastoreo incluye espinas, bajo porte de las plantas, presencia de taninos u otros compuestos secundarios. En otros casos se ha encontrado que hay caracteres que favorecen la tolerancia a la herbivoría, como ser la acumulación de reservas o altas tasas de rebrote. El sistema planta-herbívoro (al igual que el sistema planta-polinizador) muestra evidencias de un proceso de coevolución en el que ambos actores se han influido mutuamente a lo largo del tiempo promoviendo cambios adaptativos.

La introducción de las ovejas en la Patagonia representó la incorporación de un herbívoro diferente, que no coevolucionó con la flora patagónica. Las ovejas tienen una dieta diferente de la de los herbívoros nativos y que no necesariamente incluye especies que antes hayan sido profusamente pastoreadas. No obstante, la diferencia más importante ha sido la forma en que se conducen los pastoreos. En el caso de las ovejas el pastoreo está confinado a los límites demarcados por los alambrados. Información proveniente de África y de Norteamérica señala que los grandes herbívoros se caracterizan por tener un patrón migratorio que determina que los pastoreos ocurran en diferentes sitios. Esto contrasta con el confinamiento señalado anteriormente. La consecuencia del confinamiento es la selección por parte de las ovejas de las mismas plantas una y otra vez sometiendo al esfuerzo de tener que reponer el tejido removido e impidiendo la asignación de recursos a la formación de reservas o a la producción de flores y frutos. Por otro lado, los pastoreos confinados

muchas veces mantienen las cargas animales constantes durante todo el año y en diferentes años. En los momentos de mayor sensibilidad, como los períodos de sequía, las plantas son sometidas en términos relativos a una mayor presión extractiva.

Los procesos descriptos a escala de la interacción planta-animal se integran a nivel de comunidad y ecosistema. A estos niveles el resultado de estas interacciones se traduce en cambios en la proporción de grupos funcionales o de la productividad que alejan al ecosistema de los valores po-

tenciales reseñados en la sección anterior. Por ejemplo, en el oeste de Chubut el sobrepastoreo produce un descenso exponencial en la cobertura de la gramínea dominante, *Festuca pallescens* (preferidas por el ganado) y un aumento en la importancia relativa de los arbustos (figuras 6 y 7). Estos análisis son un claro ejemplo de la sustitución del tiempo por el espacio en el análisis de procesos de deterioro. Los cambios en la estructura darán lugar en el funcionamiento del ecosistema. Frente a las dificultades logísticas que representa su evaluación experimental, el uso de mode-

## Evaluación de los cambios a partir del 'contraste de alambrados'

José Paruelo y Ariela Cesa\*

\*INTA, Río Gallegos

La evaluación de características estructurales y funcionales de los ecosistemas en situaciones separadas por un alambrado constituye un ejemplo de la sustitución del espacio por el tiempo en el análisis del proceso de desertificación. Esta aproximación tiene, no obstante, algunos riesgos: la interpretación de los resultados depende de las evidencias disponibles acerca de la historia de pastoreo a ambos lados. Raramente se cuenta con información confiable al respecto en la Patagonia. En un estudio reciente analizamos una situación particular en las estepas gramíneas del distrito Subandino, el contraste asociado a áreas clausuradas al pastoreo con fines de investigación (clausuras realizadas por la Dra. Bertiller del Centro Nacional Patagónico), debido a la realización de forestaciones o por causas fortuitas (cambios en la distribución de

alambrados). Contamos para este análisis con cinco situaciones apareadas de clausura y pastoreo distribuidas en la porción oeste de la provincia de Chubut para las cuales es posible asegurar al menos 10 años de ausencia de pastoreos. En todas ellas se realizaron mediciones de atributos de la vegetación usando la misma metodología. En las áreas de clausura estudiadas se observa un aumento de la cobertura total, de la cobertura de pastos y arbustos y de la densidad de la especie dominante (*Festuca pallescens*) (figura II). Las características de los individuos de esta especie también se modifican, su tamaño aumenta, produciendo esto una mayor acumulación de biomasa verde y de material muerto en pie. El análisis directo del efecto del pastoreo –a partir de situaciones apareadas de áreas clausuradas y pastoreadas– sugiere que los cambios más

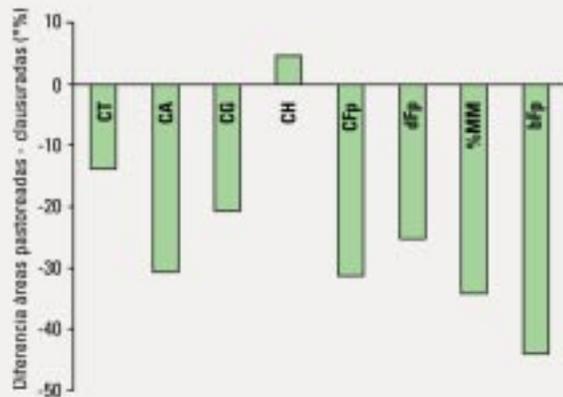


Figura II. Cambios relativos (expresados en porcentaje) en distintos atributos estructurales de la vegetación entre áreas clausuradas al pastoreo y pastoreadas en las estepas gramíneas del oeste de Chubut. CT: cobertura vegetal total, CA: cobertura de arbustos, CG: cobertura de gramíneas perennes, CH: cobertura de hierbas y especies anuales, CFp: cobertura de *Festuca pallescens*, dFp, densidad de individuos de *Festuca pallescens*, %MM: porcentaje de biomasa muerta en las matas de *F. pallescens*, y bFp: biomasa verde promedio por individuo de *F. pallescens*.

importantes ocurren a nivel de los individuos ya instalados y que tanto las gramíneas como los arbustos aumentan en ausencia de ovinos. Los resultados de estos estudios muestran un caso particular de sustitución del tiempo por el espacio. La interpretación de estas evaluaciones en términos

de la desertificación generada por el pastoreo se basa en dos supuestos, que las condiciones iniciales (no registradas) eran similares y que los cambios derivados de la clausura al pastoreo son equivalentes a los generados por la introducción del pastoreo (ausencia de histéresis).

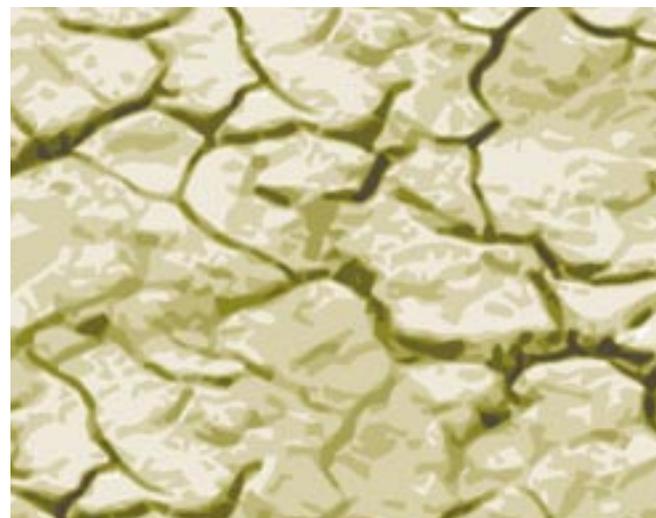
los correlativos y de simulación ofrece una interesante alternativa exploratoria. Aplicando estas herramientas se observa que los cambios estructurales determinarían una reducción en la productividad primaria del ecosistema y una caída más que proporcional en la cantidad de ovejas que el sistema puede mantener (figura 8). La evaluación rigurosa de las hipótesis generadas por estos estudios requiere de experimentos manipulativos que analicen procesos parciales y su integración en nuevos modelos del funcionamiento y dinámica de la vegetación (ver recuadro 'Modelos de simulación. Su uso en el estudio de la desertificación').

#### Modelos de cambios en los ecosistemas promovidos por el pastoreo

En el punto anterior describimos los cambios que el pastoreo promovería en las estepas patagónicas. También discutimos la cadena de causalidades. Ahora nos interesa presentar estos cambios desde la perspectiva de las modificaciones que ocurren en las comunidades vegetales. Basados en la teoría sucesional que describe los cambios que ocurren en la comunidad luego de un disturbio, los ecólogos de pastizales agrupaban las especies de una comunidad en grupos con distinta respuesta frente al pastoreo. La teoría suponía que el pastoreo era un disturbio que alejaba a la comunidad de las condiciones de equilibrio propias de ese ambiente, el clímax. En la medida en que esta se alejaba de esa condición, algunas especies decrecían y otras aumentaban en importancia. Si el pastoreo era más intenso promovería el ingreso de especies que no eran componentes de la comunidad (figuras 6 y 7). Estas especies se denominaban invasoras. La teoría proponía que al moderarse la intensidad de pastoreo la comunidad retornaba a la condición climáxica. Los técnicos que manejaban los campos pastoreados estimaban el estado, es decir cuán lejos del clímax se encontraba la comunidad. También estimaban la tendencia, es decir si el pastizal tendía a alejarse o a acercarse al clímax. Condición y tendencia de un pastizal eran estimados a partir de la cobertura total del pastizal, su composición botánica, o el vigor de las plantas. También se utilizaban indicadores del suelo (por ejemplo la presencia de signo de erosión incipiente). De acuerdo con el estado y tendencia, los técnicos recomendaban modificar la cantidad de animales en pastoreo. Cada región ecológica tiene su dinámica y clímax particular por lo que gran parte del trabajo necesario para aplicar este método era identificar la secuencia de cambios que promovía el pastoreo. El problema

de una adecuada caracterización de la situación de referencia seguía presente en este esquema y además los problemas propios de la sustitución de tiempo por espacio.

Luego de más de 30 años de uso de este modelo teórico, se acumularon evidencias que mostraban que algunos pastizales no se comportaban según las predicciones. Reducciones en la intensidad de pastoreo no promovían los cambios esperados en la composición de la comunidad o reversión de otros síntomas. En respuesta a estas experiencias un grupo de ecólogos (Imanuel Noy-Meir, en Israel y Mark Westoby y Brian Walker en Australia) propuso un modelo que describía la dinámica de una forma distinta. A diferencia del anterior, este nuevo modelo proponía que existían varios estados de equilibrio (antes el único estado de equilibrio era el clímax). El pastoreo en combinación con otros factores como períodos de sequía o humedad excepcional promovían cambios o transiciones entre estos estados. El manejo de la carga aprovechando estas situaciones de oportunidades excepcionales permitía mover al pastizal a la condición (ahora denominado estado). Cada cambio de estado era entonces el producto de una transición particular. Este nuevo modelo de concebir la dinámica de los pastizales y de manejarlas se conoce con el nombre de Modelo de Estados y Transiciones. En el recuadro 'Modelos de estados y transiciones en la Patagonia' de la página 52 se presenta el esquema de estados y transiciones para una de las unidades de vegetación más frágiles de la Patagonia: los mallines o vegas. Los modelos de estados de transiciones representan lo que se conoce acerca de la heterogeneidad de cada unidad y propone hipotéticas transiciones entre los estados. Buena parte del trabajo de los ecólogos en la Patagonia apunta a evaluar las transiciones hipotetizadas entre estados.



## Conclusiones

Los modelos conceptuales ecológicos proveen la base a partir de la cual se define e intenta comprender el fenómeno de desertificación. Sin una adecuada comprensión del flujo de energía, la dinámica de poblaciones, los procesos evolutivos o las interacciones entre especies, entre otras cosas, el estudio de un fenómeno como la desertificación se transforma en una colección de anécdotas y casos de muy difícil síntesis. El método científico al permitirnos descartar modelos de funcionamiento del sistema (por ejemplo el esquema sucesional clásico de manejo de pastizal) abre el camino a modelos que permiten predicciones más ajustadas a las observaciones. Cuando se estudia un sistema complejo en donde múltiples causas (económicas, sociales, biológicas o físicas) pueden generar patrones similares (el abandono de los campos de producción lanera en la Patagonia, por ejemplo) una aproximación sistemática que permita evaluar hipótesis alternativas a la luz de las evidencias brinda las mayores posibilidades de éxito.

Otro tipo de modelos, los correlativos y los de simulación, son también auxiliares valiosos en el estudio de la desertificación. Los estudios de los controles ambientales de atributos funcionales y estructurales de los ecosistemas constituyen la herramienta fundamental para la generación de escenarios potenciales. Sin estas situaciones de referencia el estudio de un proceso como la desertificación es extremadamente difícil. Las escalas temporales y espaciales a las que ocurren los cambios impide en la mayor parte de los casos generar estas situaciones de referencia a partir de una aproximación exclusivamente experimental.

Mucho nos queda por conocer acerca de los procesos que subyacen al fenómeno de la desertificación. Casi con seguridad ese conocimiento será siempre incompleto y parcial. Sin embargo, aun con esas limitaciones, las decisiones de manejo que tomemos sobre la base del conocimiento de los procesos involucrados serán mejores que la prueba o el error o la ausencia de manejos planificados. 



*José M Paruelo:*

Doctor en Ecología de pastizales, Colorado State University, EEUU. Profesor adjunto de Agronomía, UBA. Investigador Independiente, CONICET.  
[paruelo@ifeva.edu.ar](mailto:paruelo@ifeva.edu.ar)



*Martín R Aguiar:*

Doctor en Ecología, Colorado State University, EEUU. Profesor adjunto, UBA, Investigador adjunto, CONICET.  
[aguiar@ifeva.edu.ar](mailto:aguiar@ifeva.edu.ar)

## Lecturas sugeridas

- ARES et al., 1990, 'Structural and dynamic characteristics of evergrazed lands of Northern Patagonia, Argentina', In BREMEYER A (ed.), *Managed grasslands: regional studies*, Elsevier, Amsterdam, pp. 149-175.
- BERTILLER MB, ELISSALDE NO, ROSTAGNO CM y DEFOSSE GE, 1995, 'Environmental patterns and plant distribution along a precipitation gradient in western Patagonian', *Journal of Arid Environments* 29:85-97.
- JOBAGY EG, SALA OE and PARUELO JM, 2002, 'Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach', *Ecology* 83:307-319.
- OESTERHELD M, AGUIAR MR y PARUELO JM, 1998, 'Ecosistemas patagónicos', *Ecología Austral* 8: 75-84.
- SORIANO A, 1983, 'Deserts and semideserts of Patagonia', In WEST NE (ed.). *Temperate Deserts and Semideserts*, Elsevier, Amsterdam, pp. 423-459.

