

PATRONES FENOLÓGICOS DE LA PROVINCIA DE MENDOZA, ARGENTINA, MEDIANTE SERIE TEMPORAL DE IMÁGENES NOAA - AVHRR NDVI GAC

GONZÁLEZ LOYARTE, M. M.¹, M. MENENTI² & F. A. ROIG¹

Summary: Phenological patterns of the province of Mendoza, Argentina, through a temporal series of NOAA-AVHRR NDVI GAC images. The temporal dynamics of vegetation in Mendoza is described through analysis of regional foliar phenology using a series of 108 monthly NOAA-AVHRR NDVI GAC images. A Fast Fourier Transform was used to decompose the series into dynamic parameters: mean NDVI, amplitudes (maximum NDVI variability) and phases (time from start of cycle to maximum NDVI) for different time periods. A classification is made based on those parameters with larger information content (inter- and intra-annual variability), achieving a map of 18 areas of phenological behaviour. This map is related to ecosystems and vegetation units. The phenological pattern (monthly NDVI curve) is modelled for 17 vegetation units. The map contributes dynamic elements to the regional study of vegetation, generating a new zonation explained by variables that determine vegetative activity. The phenological pattern describes the functioning of vegetation and allows understanding of its geographic variations. The overall vegetation of Mendoza responds to an annual cycle with localized weak bimodal patterns. The patterns of low winter-summer contrast correspond to xeric climate conditions, expressing the vegetative maximum at the end of the summer; water availability enhances this contrast, shortening the time of maximum vegetative expression.

Key words: Foliar phenology. NOAA-AVHRR NDVI GAC images. Fourier Transform. Vegetation. NDVI modelling. Phenological behaviour. Phenological pattern.

Resumen: Se describe la dinámica temporal de la vegetación de Mendoza mediante análisis de la fenología foliar regional con una serie de 108 imágenes mensuales de índice de vegetación NOAA-AVHRR NDVI GAC. La serie se descompone aplicando la Transformada Rápida de Fourier en parámetros dinámicos: NDVI medio, amplitudes (máxima variabilidad del NDVI) y fases (tiempo entre inicio del ciclo y máximo NDVI) para diferentes períodos. Con los parámetros con mayor información (variabilidad inter e intraanual) se hace una clasificación y se obtiene un mapa de 18 áreas de comportamiento fenológico. Éste se vincula con los ecosistemas y con las unidades de vegetación. Se modela el patrón fenológico (curva NDVI mensual) para 17 unidades de vegetación. El mapa aporta elementos dinámicos al estudio regional de la vegetación generando una zonificación nueva explicada por variables que determinan la actividad vegetativa. El patrón fenológico describe el funcionamiento de la vegetación y permite comprender sus variaciones geográficas. El conjunto de la vegetación de Mendoza responde a un ciclo anual con matices localizados de ligera bimodalidad. Los patrones de bajo contraste invierno-verano corresponden a condiciones climáticas xéricas expresando su máximo vegetativo al final del verano; la disponibilidad hídrica incrementa este contraste acortando el tiempo de máxima expresión vegetativa.

Palabras clave: Fenología foliar. Imágenes NOAA-AVHRR NDVI GAC. Transformada de Fourier. Vegetación. Modelado NDVI. Comportamiento fenológico. Patrón fenológico.

¹ Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas (IADIZA/CONICET), gloyarte@lab.cricyt.edu.ar

² Delft Institute for Earth Observation Systems DEOS, Delft University of Technology, Delft The Netherlands, M.Menenti@tudelft.nl

INTRODUCCIÓN

La fenología analiza la respuesta de la vegetación a las condiciones meteorológicas. En estudios de detalle se consideran distintas fases fenológicas como germinación, brotación, floración, fructificación, senescencia, etc.; en estudios regionales en cambio interesan los cambios producidos en el follaje (intensidad y duración) del conjunto de plantas que es el atributo más sensible de detectar a nivel de áreas extensas, es decir la fenología foliar (Fuller & Prince, 1996). Las imágenes satelitarias han demostrado su utilidad en el análisis regional de la vegetación particularmente las imágenes de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) calculada con imágenes del rojo visible (RV) y del infrarrojo cercano (IRC) ($NDVI = (IRC - RV) / (IRC + RV)$). La sólida vinculación del NDVI con la radiación fotosintéticamente activa (PAR por su sigla en inglés) (Choudhury, 1987) explica la relación entre las imágenes de este índice y la actividad fotosintética de la cubierta vegetal (fenología foliar) (Tucker & Sellers, 1986) y entre patrones climáticos y fenología foliar a escala regional (Justice *et al.*, 1986; Potter & Brooks, 1998). Consecuentemente, las variaciones de la fenología foliar a través de varios ciclos vegetativos pueden ser registradas por series temporales de imágenes de NDVI (Anyamba & Tucker, 2005).

Una síntesis de la serie temporal permite obtener una descripción del comportamiento fenológico foliar medio (que incorpore la variabilidad interanual más importante y la variabilidad intraanual); para ello es necesario simplificar la serie temporal en parámetros que la describan con sentido dinámico. En este sentido Soriano & Paruelo (1992) definen las biozonas como unidades funcionales caracterizadas por la dinámica estacional de la biomasa verde a través de la dinámica del NDVI; concepto que profundizan al definir las biozonas de la Patagonia (Paruelo *et al.*, 1998) y los tipos funcionales ecosistémicos (Paruelo *et al.*, 2001) mediante tres atributos obtenidos de las curvas estacionales de NDVI: el NDVI integral anual (NDVI-I), el rango relativo del NDVI (RREL) y la fecha de máximo NDVI (MMAX). Otros autores simplifican la información de la serie temporal mediante la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (TRF) (Menenti *et al.* 1991, 1993; Verhoef, 1996), donde los atributos descriptores de la serie son el NDVI

medio, y amplitud y fase para distintos períodos (componentes periódicas). La información sintetizada por los Parámetros de Fourier es de carácter dinámico y explica la fenología foliar (Fuller & Prince, 1996). Por esta razón tiene variadas aplicaciones en el estudio de la dinámica vegetal y el clima (Schultz & Halpert, 1995; Azzali & Menenti, 1996; Negrón Juárez & Liu, 2001; Roerink *et al.*, 2003; González Loyarte & Menenti, 2008a) y en la cartografía de la estacionalidad foliar (Fuller & Prince, 1996) y de unidades con diferentes características fenológicas que Azzali y Menenti (2000a, 2000b) denominaron “complejo vegetación-suelo-clima” o de isorecambio.

El objetivo del trabajo es obtener una descripción dinámica de la vegetación de Mendoza, a través del análisis de una serie temporal de imágenes satelitarias (NOAA-AVHRR NDVI GAC), que permita caracterizar diferentes patrones fenológicos a nivel regional.

MATERIAL Y MÉTODO

Obtención de los parámetros de Fourier

El material utilizado es una serie de 108 imágenes mensuales NOAA-AVHRR NDVI GAC, de 7,6 x 7,6 km de resolución espacial, que se extiende de julio de 1982 a junio de 1991 en correspondencia temporal con la cartografía regional de la vegetación (Martínez Carretero *et al.*, 1988; Roig *et al.*, 1988, 2000). El pre-procesamiento consistió en una georeferenciación de las imágenes a un mapa digitalizado de la República Argentina (con coordenadas latitud/longitud) mediante el programa de procesamiento de imágenes satelitarias ERDAS IMAGINE, módulo Raster/Geometric correction, mediante ajuste polinomial de segundo orden con 27 puntos de control conservados y un error cuadrático medio total de 1,2356 pixel ($x = 0,8791$; $y = 0,8683$). A las imágenes georeferenciadas se les aplicó una máscara para recortar la provincia de Mendoza (Módulo: Image interpreter/Utilities/Mask).

Posteriormente la serie temporal de imágenes se analizó (en Holanda) mediante el software de la Transformada Rápida de Fourier (TRF) desarrollado por Verhoef (1996). La TRF es un algoritmo que descompone, para cada pixel, la serie temporal en varias componentes periódicas sencillas y compren-

sibles (parámetros de Fourier): un índice de vegetación medio para toda la serie y, varias amplitudes y fases (Menenti *et al.*, 1993). La amplitud representa la medida de la máxima variabilidad del NDVI y la fase el tiempo transcurrido entre el inicio de la serie y el momento en que se produce la máxima variabilidad. Se obtuvieron así 108 imágenes nuevas (parámetros de Fourier): NDVI medio e imágenes de amplitud (54) y de fase (53) para diferentes períodos. Cada amplitud y fase están asociadas a un determinado período, desde 9 años a 2 meses, p.ej.: 9; 4,5; 3; 2,25; 1,8; ; 0,167 años (2 meses). La selección de los parámetros de Fourier relevantes se realizó según la contribución de la varianza de la amplitud de cada período a la varianza total de la amplitud. La varianza total de la serie temporal fue calculada como la suma de las varianzas de cada término individualmente (Jakubauskas *et al.*, 2001):

$$\text{Varianza total} = \sum_{j=1}^n \frac{\text{amplitud}_j^2}{2} \quad (1)$$

donde j es cada término (período) en la serie y n es el número total de términos. La contribución relativa de cada término fue calculado dividiendo la varianza individual de cada término por la varianza total. De este modo, se seleccionaron para la clasificación los períodos 9, 3 y 1 año que explicaron en conjunto al menos el 80% de la varianza total.

Obtención del mapa de áreas de comportamiento fenológico semejante

Para transformar los datos de los distintos parámetros de Fourier (una imagen o banda por cada parámetro) en un mapa se necesita agruparlos en clases y encontrar para cada clase la información que contienen. Para ello se realizó una clasificación con 5 imágenes (bandas): NDVI medio, amplitud a 9, 3 y 1 años, y fase a un año; es decir, se asignaron los píxeles de las imágenes a categorías discretas para obtener un mapa con clases estadísticamente diferentes. Cada clase está definida por un perfil estadístico (media, varianza, mínimo y máximo) para cada banda y se parte de la hipótesis que cada clase caracteriza y explica la fenología foliar de la porción de terreno correspondiente. Se decidió realizar clasificaciones no-supervisadas debido a la ausencia de información fenológica a nivel regional

que hubiera permitido muestrear áreas de fenología conocida y obtener su perfil estadístico. La clasificación no supervisada se realiza a partir de “perfiles estadísticos” creados automáticamente por el programa en función del número de agrupamientos definidos apriori. Se probaron clasificaciones de 20 y 15 agrupamientos aplicando la técnica de autoorganización iterativa de ERDAS (Módulo Isodata) que fue ajustando las medias de cada clase y asignando los píxeles (criterio de mínima distancia euclidiana) a una clase en forma iterativa hasta que el 95% de los píxeles permanecía en una misma clase (Erdas, 1991). La clasificación de 20 clases dio un resultado inadecuado ya que produjo una marcada alternancia de clases en píxeles vecinos (se observa un moteado de clases distintas). Se conservó la clasificación de 15 clusters y se obtuvieron 14 clases fenológicas y una de ruido de límites políticos de los datos originales. Posteriormente se revisaron cuatro clases muy extensas cuya heterogeneidad permitió su reclasificación, mediante una máscara, obteniendo cuatro clases más. Se evaluaron las clases mediante la calidad de los histogramas de cada banda (una buena clase presenta mínima dispersión, su evaluación fue visual a partir de los gráficos correspondientes y del valor de la varianza), distancia euclidiana (máxima distancia espectral entre clases) y distribución espacial (continuidad espacial de la misma clase y no alternancia pixel a pixel de distintas clases); las clases muy similares fueron fusionadas y se recalcularon sus parámetros estadísticos (mínimo, máximo, media, desviación estándar). De este modo el mapa final es de 18 clases.

Se trata de una clasificación basada en la dinámica temporal de la vegetación sobre nueve ciclos vegetativos. Estos cambios de la vegetación son a nivel de la duración e intensidad del follaje (desarrollo foliar), es decir de la fenología foliar. Basados en que Fuller y Prince (1996) concluyeron que los parámetros de Fourier constituyen un nuevo abordaje para el estudio del comportamiento fenológico a nivel regional denominamos al mapa resultante de la clasificación: mapa de áreas de comportamiento fenológico semejante. Se obtuvo así un mapa que describe el comportamiento fenológico caracterizando las clases con los valores medios de cada banda. El mapa trata de representar los distintos comportamientos fenológicos pero siempre considerando que cada clase presenta una heterogeneidad

que se ha tratado sea mínima en las cinco variables utilizadas. Por esta razón se consideran áreas semejantes (no idénticas) en su comportamiento fenológico.

Se hicieron pruebas de clasificación con tres bandas: NDVI medio y la amplitud y fase a un año, que resultaron adecuadas para las zonas húmedas de Mendoza, pero se descartaron debido a que las zonas áridas eran mejor caracterizadas agregando las amplitudes a 9 y 3 años que registran la variabilidad interanual del NDVI sin perder calidad en la detección de las zonas húmedas.

Mapa de ecosistemas y su comparación con las áreas de comportamiento fenológico semejante

Los ecosistemas considerados en este trabajo se basan en los ecosistemas de la Provincia de Mendoza determinados por Roig *et al.* (1988) quienes lo definen como el “conjunto de animales y vegetales que viven en un medio donde hay una estrecha relación entre los elementos físicos y biológicos que lo componen en un determinado equilibrio de integración, interdependencia y funcionamiento dentro de ciertos límites topográficos”. La homogeneidad de factores bióticos y abióticos está determinada por la distinta magnitud de los ecosistemas. Los ecosistemas de primer orden, denominados también Ecosistemas naturales o grandes ecosistemas o ecobiomas son: Andino, Puneño, Patagónico y Monte. A ellos se subordinan ecosistemas de segundo orden o mesoecosistemas (nivel regional) y a éstos se subordinan ecosistemas de tercer orden (nivel subregional) (Roig *et al.*, 1988). La descripción de las unidades de vegetación de Roig *et al.* (2000) corresponde a estos dos niveles de ecosistemas y los factores con los que se los identifica y designa son geomofológicos, particularmente geofomas como huayquerías, Precordillera, etc. (Roig *et al.*, 1988). Por esta razón se digitalizó el mapa geomorfológico de Abraham (2000) identificando las unidades básicas (geofomas) de los ecosistemas de segundo y tercer orden, simplificando algunas unidades muy complejas por su nivel de detalle, y se georeferenció en coordenadas latitud/longitud de modo de ser compatible con las imágenes de los parámetros de Fourier.

Para analizar la relación entre las áreas de comportamiento fenológico semejante y los ecosistemas de segundo y tercer orden se cruzaron los mapas

correspondientes mediante el módulo Summary de ERDAS y se calculó el porcentaje de coincidencia espacial entre las clases de ambos mapas.

Asociación de las clases de comportamiento fenológico con las unidades de vegetación de Mendoza

A partir del muestreo, cada 10 minutos de grado en latitud/longitud, del mapa de las unidades de vegetación de Mendoza a escala 1:1.500.000 (Roig *et al.*, 2000) y del mapa de comportamiento fenológico se detectaron las unidades más representadas. Este análisis orientó en la selección de las unidades de vegetación a describir en su patrón fenológico.

Patrón fenológico (modelado del NDVI anual)

La descomposición de la serie temporal en las componentes periódicas que la integran permite realizar el proceso inverso, es decir construir (modelar) una serie temporal sólo con las componentes periódicas que contengan mayor información y que denominamos patrón fenológico. Azzali & Menenti (2000a) construyeron la curva de la fenología anual mediante el modelado del NDVI mensual aplicando la siguiente ecuación (2):

$$I = \sum_n \left[A_n * \sin(\omega_n t + \varphi_n) + A_n * \cos(\omega_n t + \varphi_n) \right] \quad (2)$$

donde:

I = valor del NDVI modelado

n = frecuencia (en nuestro trabajo consideramos cinco frecuencias: las correspondientes a los períodos 9, 4,5, 3, 1 y 0,5 años, además de la frecuencia cero cuya amplitud es el NDVI medio)

A_n = valor de la amplitud correspondiente a la frecuencia ω_n

$\omega_n = \frac{2\pi}{P_n}$ siendo P_n = período en meses correspondiente a la frecuencia ω_n

t = tiempo, de 1 a 12 meses (de julio a junio)

φ = valor de la fase en radianes

En nuestro trabajo aplicamos la ecuación (2)

para generar la marcha del NDVI anual. Se calculó y graficó el NDVI mensual sin el ruido que introducen los períodos muy breves como 4, 3, 2 meses y sin los períodos como 2,25, 1,8, 1,5 años, etc. con poco aporte a la señal observada del NDVI, es decir sin información fenológica clara. La gráfica obtenida constituye lo que denominamos patrón fenológico. Para caracterizar el patrón fenológico de las unidades de vegetación para Mendoza se identificaron las unidades de vegetación de Roig *et al.* (2000) más representadas en el muestreo y se seleccionaron sitios representativos (evitando bordes) y para esas coordenadas se extrajeron los datos correspondientes de las 11 imágenes de los parámetros de Fourier para las frecuencias mencionadas. Cada curva corresponde a un pixel de la unidad de vegetación representada y permite detectar un patrón fenológico y comprender las diferencias entre las distintos patrones fenológicos de la misma o de diferentes unidades de vegetación. Se realizó así una descripción dinámica de 17 unidades de vegetación de Roig *et al.* (2000).

RESULTADOS

Mapa de áreas de comportamiento fenológico semejante

Las imágenes de los parámetros de Fourier correspondientes a los períodos 9, 3 y 1 año se presentan en Figura 1. El mapa de áreas de comportamiento fenológico semejante obtenido es presentado junto al mapa de ecosistemas de segundo y tercer orden (Roig *et al.*, 1988) adaptado del mapa geomorfológico de Abraham (2000) (Figura 2). Cada clase de comportamiento fenológico es descrita por el valor medio para cada parámetro (Tabla 1). Para evitar confusiones, a las categorías de este mapa se les llamará *clases*, a las del mapa de *ecosistemas* se las identificará el nombre del ecosistema (geofomas) y a las del mapa de vegetación de Roig *et al.* (2000) *unidades*.

Comportamiento fenológico y ecosistemas

La distribución porcentual de cada clase de comportamiento fenológico en los ecosistemas de segundo y tercer orden muestra el contraste entre ecosistemas con variada actividad vegetativa hasta

ecosistemas donde sólo se detectan dos clases de comportamiento fenológico (Tabla 2).

Patrón fenológico para diversas unidades de vegetación

Las curvas correspondientes a los patrones fenológicos se presentan de acuerdo con el agrupamiento de las unidades de vegetación de Roig *et al.* (2000) (Figura 3).

Vegetación de las montañas

Se desarrolla en la región oeste de Mendoza sobre dos grandes ecosistemas naturales: el Andino y el Puneño, dentro de ellos las unidades de vegetación ocupan diversos pisos altitudinales cuyas diferencias se reflejan en el patrón fenológico que varía desde vegetación cubierta por la nieve de junio a septiembre, a vegetación perennifolia sin cubierta de nieve que incrementa su actividad en el verano hasta otra cuya fenología foliar es casi constante a lo largo del año (Figura 3A).

Unidad 3: Vegetación de la vertiente oriental con *Adesmia horrida*, *Mulinum spinosum*, *Nassauvia axillaris*, etc. (Roig *et al.*, 2000). Forma parte del gran ecosistema natural Andino, localizada en los Andes Glaciales, piso de veranada que ocupa el piso inferior andino (Cordillera Frontal, 1500 a 3000 msm); desde lo fisonómico participa de la Formación orófila del Cuerno de Cabra constituida por extensos matorrales muy abiertos de cuerno de cabra (diversas ssp. del género *Adesmia*) (25-50% de cobertura) con un estrato herbáceo de diversas ssp. de *Stipa*, coirones que cubren de 50-75% (Roig, 1982; Roig *et al.*, 1988; Martínez Carretero *et al.*, 1988). La temperatura registrada en septiembre (7,2°C) que pasa a 10,6 °C en octubre en la estación meteorológica El Manzano Histórico, si bien a una altimetría inferior (1200 msnm), explica el rápido incremento en el NDVI de octubre a diciembre mes en que se produce el NDVI máximo (0,204) ya que los 495 mm anuales de lluvia se distribuyen casi uniformemente durante todo el año (Figura 3A_a). Por otro lado la abundancia de pastos, también explicaría el pico de índice de vegetación en diciembre con fuerte crecimiento primavero-temprano estival. El pixel modelado se localiza en la Cordillera Frontal, en la coordenada 33,36° S, 69,51° W y corresponde a la clase 8 del mapa de comportamiento fenológico (Figura 2B).

Unidad 5: Comunidades de nanofanerófitos, *Adesmia pinifolia*, *A. schneiderii*, *A. obovata*, etc., pastizales de *Poa holciformis*, diversas ssp. de *Stipa*, etc. (Roig *et al.*, 2000). Según Roig *et al.* (1988) los arbustos cubren 25-50% y los pastos pueden superar el 75% de cobertura. Integra también la Formación del Cuerno de Cabra pero en la Cordillera Principal donde forma parte del piso de veranada de los Andes Nivales. Según el patrón fenológico la vegetación se desarrolla de octubre a abril y alcanza su máxima expresión vegetativa en noviembre (NDVI máximo = 0,135). El inicio de la actividad vegetativa en octubre es coincidente con el salto térmico de septiembre a octubre (8,1 a 12,1°C) en la Estación de Malargüe, ubicada al SE del sitio modelado y a menor altimetría (1420 msm). (Figura 3A_b). El pixel modelado corresponde a una altimetría superior a 2000 msm con inviernos muy fríos con cubierta de nieve, como se refleja en los valores negativos del índice de vegetación de junio a septiembre y que tiene una fuerte influencia en la disminución del NDVI medio (0,096). El segundo valor alto de NDVI en marzo sería la respuesta a las lluvias de verano que concentran para Malargüe el 27 % de 295 mm entre diciembre y febrero. El pixel modelado se localiza en la Cordillera Principal (35,32° S, 69,84° W) y corresponde a la clase 8.

Unidad 6: Pampas altas y piedemontes con *Ephedra ochreatea*, *Neosparton aphyllum*, *Stillingia patagonica*, *Junellia spathulata*, etc. (Roig *et al.*, 2000). Participa del gran ecosistema natural Patagónico, ecosistema de la Payunia (Roig *et al.*, 1988), integrando la Formación del solupal (Martínez Carretero *et al.*, 1988). Si bien nuestro pixel está al SW de la Estación El Yaucha (1403 msm) podríamos asociarlo con el clima semiárido (274 mm/año) de inviernos muy fríos (temperatura media de junio a agosto: 5°C) y 65% de las lluvias concentradas de septiembre a febrero (primavera verano) como refleja el patrón fenológico (Figura 3A_c). La curva es bastante simétrica con su máximo en diciembre (0,101). El NDVI medio (0,088) refleja la menor cobertura del matorral abierto de *N. aphyllum* (Martínez Carretero *et al.*, 1988), con coberturas de 25-50% para los arbustos y 50-75% para los pastos (Roig *et al.*, 1988). La presencia de especies de follaje perenne se evidencia en el NDVI de los meses invernales. El pixel modelado se localiza en el piedemonte de la Cordillera Frontal (34,34° S, 69,32° W) y corresponde a la clase 10 del

mapa de comportamiento fenológico.

Unidad 12: Matorrales húmedos de *Junellia scoparia*, *Colliguaja integerrima*, *Schinus fasciculatus*, etc. con grandes cactáceas (*Denmoza rhodacantha*, *Lobivia formosa*) y con *Maytenus boaria* en área sur (Roig *et al.*, 2000). Forma parte del piso de Colliguay y Solupe negro (*C. integerrima* y *J. scoparia*) estudiado por Roig (1989) para la vertiente oriental de la Sierra de Uspallata. Este piso se extiende de 1600 a 2500 msm en zona parageocriogénica donde el congelamiento del suelo es esporádico con temperatura media anual entre 8 y 11,8 °C (Roig *et al.*, 2007). Estos matorrales presentan de 2 a 3 estratos con cobertura total media de 70-80% como respuesta al clima subhúmedo y fresco debido a la concurrencia de vientos del Atlántico y del Pacífico y al efecto orográfico. La disponibilidad hídrica se ve reflejada en el valor máximo de NDVI mensual (0,142) registrado en enero (Figura 3A_d) y la alta cobertura de especies perennifolias se evidencia en el índice de vegetación de invierno, que supera a las otras unidades de la montaña. El pixel modelado se localiza en la Precordillera (33,03° S, 69,19° W) y corresponde a la clase 14 del mapa de comportamiento fenológico.

Unidad 16: Estepas arbustivas del bolsón de Uspallata con *Larrea divaricata*, *Lycium chañar*, *Scleropogon brevifolius*, etc. (Roig *et al.*, 2000). Forma parte del gran ecosistema natural puneño con clima árido seco y frío con lluvias de 100-120 mm (Roig *et al.*, 1988). Las condiciones de xericidad del Valle de Uspallata (128 mm/año) se ven reflejadas en la cobertura media total de 55% (Martínez Carretero, 2000) y también en el patrón fenológico donde el índice de vegetación medio es muy bajo (0,041) y con un valor máximo mensual (octubre) que difiere muy poco del mínimo mostrando una cobertura perenne dominante (*Larrea* ssp.) que refleja las condiciones de marcada aridez a tal punto que este lugar ha sido denominado como pequeño Sahara (Le Houérou *et al.*, 2006) (Figura 3A_e). Este máximo de NDVI en primavera es explicado por la cobertura de hemicriptófitos, forma de vida que secunda a los nanofanerófitos en el espectro de cobertura de los jarillales (Martínez Carretero, 2000) y usufructúan las escasas lluvias invernales. El pixel modelado se localiza en el Valle de Uspallata (32,31° S, 69,19° W) y corresponde a la clase 5 de comportamiento fenológico.

Vegetación de Bolsones y Huayquerías

Estas unidades de vegetación se ubican en el gran ecosistema natural del Monte (Roig *et al.*, 1988); la vegetación presenta características particulares según los ecosistemas donde crezcan pero el denominador común son las condiciones de aridez evidenciadas en las curvas fenológicas (Figura 3B). El NDVI invernal es semejante a todos los bolsones y huayquerías, las diferencias se dan entre octubre y marzo (mostrando la máxima actividad vegetativa en meses diferentes) y están determinadas por el ecosistema y la disponibilidad hídrica.

Unidad 17: Bajadas arbustivas de *L. divaricata* y *L. cuneifolia* con *Bulnesia retama* (Roig *et al.*, 2000). Vegetación que cubre el piedemonte de la Precordillera y las bajadas de las Huayquerías del centro de Mendoza. La dominancia en cobertura de especies perennes se refleja en los valores del NDVI en invierno (Figura 3B_a). La disponibilidad hídrica de estos piedemontes, con variaciones altitudinales de 750 a 1800 msm y precipitaciones de 150 a 238 mm/año (Roig, 1976), es mayor que la de los jarillales de Uspallata y se refleja en el NDVI medio (0,103). Con coberturas totales de 50 a 79% (Roig, 1989; Méndez, 1997; Dalmaso *et al.*, 1999) la vegetación logra su máximo en marzo respondiendo a las lluvias estivales que se concentran (45-50%) de diciembre a febrero. El pixel modelado se localiza en las bajadas de las Huayquerías (33,69° S, 68,21° W) y corresponde a la clase 13 del mapa de comportamiento fenológico.

Unidad 20: Huayquerías (bad lands) con comunidades saxícolas diversas de *L. cuneifolia* y *Zuccagnia punctata*, de *Chuquiraga erinacea*, de *Gochnatia glutinosa*, etc. y riparias en cursos temporarios con *Tessaria dodonaefolia*, etc. (Roig *et al.*, 2000). Desde lo fisonómico es un matorral muy xérico y abierto, de muy baja cobertura y debido a la abundancia de *C. erinacea* ("chiriadora") se la denomina Formación de la chirriadora (Martínez Carretero *et al.*, 1988). Este conjunto de comunidades saxícolas puede variar en sus coberturas desde 70-90% en comunidades de *Z. punctata* con *G. glutinosa* sobre cuaternario no erosionado hasta 10-60% en comunidades con *C. erinacea* sobre el terciario por erosión del cuaternario y de 40 a 70% en el jarillal sobre mantos de limos y sobre conglomerados (Méndez, 1989, 1997). La cobertura total del follaje presenta un ligero incremento en el verano cuando ocurren las lluvias (Figura 3B_b). Las pendientes fuertes y baja a media cobertura vegetal pro-

mueven el escurrimiento reflejado en un menor NDVI medio (0,096); el máximo NDVI ocurre en febrero. El pixel modelado (33,42° S, 68,66° W) corresponde a la clase 13 de comportamiento fenológico.

Unidad 21: Huayquerías con *Deuterocohnia longisepala* (Roig *et al.*, 2000). Esta especie constituye comunidades saxícolas en la Precordillera (Roig, 1976) donde en la vertiente oriental de la Sierra de Uspallata forma parte de la vegetación del Cardonal que se extiende de 1500 a 2800 msm (Roig, 1994). En la Reserva Natural Villavicencio la comunidad de *D. longisepala* ocupa las laderas de solana entre 1600-2000 msm (Dalmaso *et al.*, 1999), coincidiendo con el primer piso de vegetación del Cardonal (1500-2000 msm; Roig, 1994) conformado por el coironal de *Stipa eriostachya* (Dalmaso *et al.*, 1999). Funes (2008) estudió esta comunidad en la Precordillera (900- 970 msm) donde *D. longisepala* crece en exposiciones N y NW, acompañada por *Z. punctata*, *L. cuneifolia*, *C. praecox* y las cactáceas *Opuntia sulphurea* y *Trichocereus strigosus*; en umbrías los pastos (*S. plumosa* y *Poa ligularis*) alcanzan 45% de cobertura. El patrón fenológico (Figura 3B_c), a pesar de su bajo nivel de NDVI, muestra una ligera bimodalidad con un máximo en octubre (0,069) y un valor alto en abril (0,066) que se explica con el modelo climático Paramillo norte de Roig Juñent & Boninsegna (1990). Este modelo climático indica invierno frío y húmedo en junio-julio y verano húmedo a fines de febrero-marzo. De modo que el primer máximo respondería a las lluvias invernales y la abundancia de pastos y el aumento de actividad fotosintética de abril respondería a las lluvias de fines de verano. La cobertura total de 50-60% en solanas y 90% en umbrías y las especies de follaje perenne presentes en ambas laderas (*Z. punctata* y *L. cuneifolia*) más *D. longipetala* en solanas (Funes, 2008) explicarían los valores invernales del NDVI. El pixel modelado se localiza en la Precordillera (32,31° S, 68,86° W) y corresponde a la clase 1 del mapa de comportamiento fenológico.

Unidad 26: Meseta del Guadal con estepa de *Atriplex lampa* y *Trichloris crinita* (Roig *et al.*, 2000). *A. lampa*, el arbusto dominante, da el nombre a la Formación del Zampal que es característica de esta meseta de suelos arenosos o limo arenosos (Martínez Carretero *et al.*, 1988) con coberturas totales del 50 % para los arbustos (*A. lampa*, *J. seri-*

phoides, *Tricycla spinosa*, *Acantholippia seriphoides*) y de 25-50% para los pastos (Roig *et al.*, 1988; De Marco *et al.*, 1993). Presenta una cubierta todo el año dada por sus especies perennes con un máximo en enero (0,115) en respuesta a las precipitaciones primavera-estivales (Figura 3B_d); el NDVI medio (0,111) refleja la permanencia anual del follaje dominante de la zampa. El pixel modelado se localiza en la meseta (34,01° S, 68,66° W) y corresponde a la clase 12 del mapa de comportamiento fenológico.

Vegetación de las Travesías

Las travesías son grandes llanuras que se extienden al E de la Provincia y que están transitadas por los ríos Tunuyán y Diamante que la dividen en tres: la Travesía de Guanacache (al N del río Tunuyán), la Travesía del Tunuyán (entre los ríos Tunuyán y Diamante) y la Travesía de La Varita (al sur del río Diamante) (Roig *et al.*, 1992). La Travesía de Chachahuén es la más meridional y se localiza en una meseta volcánica. Cada una de ellas presenta distintas condiciones ambientales reflejadas en el contrastado patrón fenológico (Figura 3C).

Unidad 30: Travesía de Guanacache con vegetación psamófila en médanos con *Sporobolus rigens*, *Mimosa ephedroides*, *Ephedra boelckei*, etc., alternando con rodales abiertos de *Prosopis flexuosa* y *Geoffroea decorticans* (Roig *et al.*, 2000). El patrón fenológico (Figura 3C_a) sintetiza este conjunto de comunidades que se alternan espacialmente: estepas arbustivas sobre médanos (cobertura total 30 a 60%), bosques cerrados a semi cerrados en valles (55 a 100%) y bosques abiertos a muy abiertos en ondulaciones arenosas (43 a 80%) (González Loyarte *et al.*, 2000a, 2000b). El patrón fenológico muestra escaso contraste de cobertura total entre invierno y verano y la mayor expresión vegetativa aunque baja se da en abril (0,092). La curva refleja la mayor aridez de la llanura oriental de Mendoza con clima hiperárido (Roig *et al.*, 1988) con lluvias de 160 mm/año concentradas en primavera-verano (80%) e inviernos templados a frescos. El pixel modelado se localiza en la llanura NE (32,64° S, 67,81° W) y corresponde a la clase 11 del mapa de comportamiento fenológico.

Unidad 35: Travesía del Tunuyán con estepas de *L. divaricata* alternando con médanos de *Aristida inversa*, *Chloris castilloniana*, etc. (Roig *et al.*, 2000). *L. divaricata* y *Capparis atamisquea* forman

parte del estrato arbustivo del algarrobal; el mismo se presenta como un bosque muy abierto con coberturas de 0-25% del estrato arbóreo, 50-75% del arbustivo y 50-75% del herbáceo (Roig *et al.*, 1988). Dentro de la extensa formación del algarrobal también están presentes los bosquecitos de *G. decorticans* (chañaral) y bosquecitos o matorrales de *Bulnesia retama* (retamal) (Martínez Carretero *et al.*, 1988). Las precipitaciones son más abundantes que en la Travesía de Guanacache (300-350 mm/año) y se expresa una mayor actividad vegetativa reflejada en el valor medio del NDVI (0,119) y en el patrón fenológico (Figura 3C_b) con un mayor índice de vegetación, aún en el invierno; alcanza su máximo en febrero (0,152) como respuesta a las lluvias de concentración primavera-estival (76-89%). El pixel modelado se localiza en la Travesía del Tunuyán (34,01° S, 67,49° W) y corresponde a la clase 15 del mapa de comportamiento fenológico.

Unidad 36: Playa de divagación de los ríos temporarios con bosque abierto de *P. flexuosa* alternando en el norte con médanos con *Gomphrena boliviana* y con matorrales de *L. cuneifolia* en barreales arrosariados (brousse tigrée) (Roig *et al.*, 2000). La playa de divagación, según lo descrito para la Reserva de Biósfera de Ñacuñán (Roig, 1970), involucra al bosque de *P. flexuosa* en la llanura medanosa de los interfluvios (60-80%), alternando con el jarillal de *L. cuneifolia* en la zona de escurrimiento (80 a 100%) que disminuye su cobertura en los guadales (2-40%) y jarillal de *L. divaricata* en médanos (40 a 100%). Fuera de la reserva las coberturas esperables son menores y a ellas responde el patrón fenológico que refleja menor actividad vegetativa (NDVI medio = 0,103) y un máximo (0,125) en enero (Figura 3C_c). El pixel modelado se localiza en la llanura centro (34,34° S, 68,21° W) y corresponde a la clase 14 de comportamiento fenológico.

Unidad 39: Travesía de La Varita, llanura psamófila donde alternan médanos con *Elionurus muticus* y bosques abiertos de *P. flexuosa* y *P. caldenia* (Roig *et al.*, 2000). Presenta la mayor disponibilidad hídrica de las travesías (400 mm/año), esto explica la mayor actividad vegetativa con coberturas de 25-50% para el estrato arbóreo del algarrobal y de 50-75% para el estrato arbustivo y para el herbáceo separadamente (Roig *et al.*, 1988). El patrón fenológico (Figura 3C_d) así lo refleja (NDVI medio = 0,174) superando a todas las clases de vegetación de las travesías con un máximo (0,238) alcanzado en

enero. El pixel modelado se localiza en la llanura sur (34,86° S, 67,16° W) y corresponde a la clase 17 del mapa de comportamiento fenológico.

Unidad 40: Travesía de Chachahuén, estepa arbustiva de *Larrea* con *Grindelia chilensis*, *Retamilla patagonica*, etc. (Roig *et al.*, 2000). Se localiza en la meseta holocena de la Payunia, constituida por una planicie de coladas de lava apiladas con una sucesión de elevaciones y depresiones con alta cobertura de arena y cuencas de deflación (Abraham, 2000). El clima de esta travesía es árido (Martínez Carretero, 2004) y la cobertura para los arbustos es de 25-50 % y para el estrato herbáceo puede variar de 0 a 50% (Roig *et al.*, 1988). El patrón fenológico (Figura 3C_e) muestra la menor actividad vegetativa de las travesías, con escaso contraste entre invierno y verano, y con un máximo en mayo tal vez producto de las precipitaciones estivo-otoñales (67% de 254 mm/año de Estación Agua Escondida). El pixel modelado se localiza en la Payunia Sur (36,69° S, 68,66° W) y corresponde a la clase 6 del mapa de comportamiento fenológico.

Vegetación de la Región Volcánica de La Payunia

La Payunia se enmarca en el gran ecosistema Natural Patagónico y está cubierta en su mayor parte por la Formación del Solupal, matorral abierto de *N. aphyllum* donde son comunes *E. ochreata*, *Schinus roigii* y otros elementos patagónicos (Martínez Carretero *et al.*, 1988; Roig *et al.*, 1988). La vegetación de dos ecosistemas fuertemente vinculados a la disponibilidad hídrica también es analizada desde lo fenológico, la Cuenca de Llanquanelo y los Bañados del Atuel (Roig *et al.*, 1988) (Figura 3D). La Provincia Fitogeográfica de la Payunia tiene clima mediterráneo atenuado con equilibrio entre las lluvias invernales y estivales (Martínez Carretero, 2004).

Unidad 41: Estepas arbustivas sobre suelos arenosos con *N. aphyllum* alternando con vegetación de médanos con *S. rigens* y vegetación saxícola sobre basaltos (Roig *et al.*, 2000). Esta unidad corresponde en su mayor parte al Distrito Florístico de los Pastizales Psamófilos de la Provincia Fitogeográfica de la Payunia bajo bioclima semiárido inferior (Martínez Carretero, 2004). Es una comunidad muy extensa presente en las mesetas neopleistocenas y conos piroclásticos con escoriales, cobertura de aluvio, arena y cuencas de deflación (Payunia N) y en

parte de las mesetas holocenas (Payunia S) (Abraham, 2000) y se inscribiría en el Patrón biogeográfico A de Páez *et al.* (2004) (Figura 2A). Debido a su extensión presentamos un pixel modelado en el sector norte (Figura 3D_a) y otro en el sector sur (Figura 3D_b). Se observan diferencias en el patrón fenológico de ambos: la comunidad en el norte presenta moderada actividad vegetativa invernal y un buen contraste con la actividad estival que alcanza su máximo NDVI en febrero (0,125); la comunidad en el sur presenta un empobrecimiento de la cobertura vegetal con baja actividad en invierno y poco incremento de la actividad en verano con un máximo NDVI en febrero (0,068). Esto se explicaría por la reducción progresiva de las precipitaciones hacia el sur que harían que el sector norte se pudiera asociar al bioclima semiárido inferior de Martínez Carretero (2004) y el sur a la transición entre éste y el bioclima árido. Los pixeles modelados se localizan en: Payunia Norte (35,65° S, 68,66° W) y corresponde a la clase 13 del mapa de comportamiento fenológico y en Payunia Sur (36,30° S, 68,93° W) donde le corresponde la clase 7.

Unidad 47: Cuenca endorreica de Llanquanelo con estepas halófilas con *Frankenia juniperioides*, *Limonium brasiliense*, etc. (Roig *et al.*, 2000). Abarca un complejo de comunidades desde poco hasta fuertemente salinas, consecuentemente la cobertura vegetal varía desde 80 a 100% en pastizales de *Distichlis spicata* hasta 2 a 50% en comunidades de *Cressa truxillensis* (Méndez, 2005). Debido a estas variaciones y a la extensión de la cuenca endorreica se modelaron dos sitios: uno más alejado de la laguna, en medio de la estepa que presenta menor actividad vegetativa (Figura 3D_c) con un máximo en marzo (0,103) y el otro sitio hacia el SW (Figura 3D_d) cuyo patrón fenológico muestra mayor contraste entre el invierno y el verano con un máximo en febrero (0,174) que refleja su proximidad a las zonas más húmedas. Esta unidad correspondería al Patrón azonal B definido por Páez *et al.* (2004). Los pixeles modelados se ubican en el Bolsón de Llanquanelo, y corresponden: el pixel "c" (35,32° S, 69,19° W) a la clase 9 del mapa de comportamiento fenológico y el "d" (35,52° S, 69,32° W) a la clase 15.

Unidad 48: Totorales de La Junta con *Cortaderia rudiusscula*; pantanos halófilos con *Ranunculus cymbalaria*, *Chenopodium macrospermun*, etc. (Roig *et al.*, 2000). Esta comunidad forma

parte del ecosistema Bañados de los ríos Atuel y Malargüe donde crece la vegetación higrófila con una cobertura del estrato herbáceo muy alta, variando de 50 a 100% (Roig *et al.*, 1988). La intensa actividad fotosintética queda reflejada en el patrón fenológico (Figura 3D_e). La vegetación higrófila muestra un patrón semejante al de los oasis bajo riego, que es la clase de comportamiento fenológico con mayor NDVI (Figura 2B). La unidad 48 presenta un marcado contraste entre invierno y verano y alcanza el mayor NDVI medio (0,205) de Mendoza en condiciones naturales con un máximo (0,292) en febrero. La disponibilidad hídrica es fundamental para los bañados y explica el patrón fenológico (González Loyarte y Diblasi, 2009): el río Atuel tiene un derrame anual medio de 1098 hm³ con los mayores caudales (28,28 a 64,39 m³/seg) de octubre a marzo debido al deshielo (EVARSA, 2001) y la respuesta en el NDVI se presenta con un mes de retardo. El pixel modelado se localiza en el piedemonte cordillerano, en los Bañados del Atuel (35,32° S, 69,51° W) y corresponde a la clase 18 del mapa de comportamiento fenológico.

DISCUSIÓN

Parámetros de Fourier

Las imágenes de los parámetros de Fourier seleccionados para la clasificación: NDVI medio, amplitudes a 9 y 3 años y amplitud y fase a un año (Figura 1) contuvieron, para las condiciones de Mendoza, la mayor información en términos de varianza total de la amplitud y reflejaron comportamientos coherentes de la vegetación. Las imágenes de NDVI medio y amplitud a un año son semejantes excepto para la alta montaña (Figura 1A, D). Los valores más altos de ambos parámetros (grises más claros) correspondieron a una vegetación con mayor disponibilidad hídrica y alto contraste de la vegetación en invierno-verano como en la vegetación de los bañados de los ríos Atuel y Malargüe y en los oasis bajo riego (clase 18, Figura 2B, Tabla 1). Para la alta montaña el NDVI medio es bajo (gris oscuro) debido a la baja cobertura vegetal y la amplitud es alta (gris muy claro) porque la presencia de nieve en invierno genera valores negativos de NDVI acentuando el contraste entre el NDVI mínimo y máximo. El menor NDVI y la menor amplitud a un año

corresponde a ambientes áridos: Valle de Uspallata, llanura NE y Payunia (Figura 2A). Las áreas donde la imagen de amplitud a un año aparece como “perforada” (Valle de Uspallata y Payunia) es porque la amplitud es tan baja (o nula) que el programa les da valor cero porque no trabaja con números reales sino enteros y al ser menor a 0,5 redondea a cero; es decir no hay variaciones sensibles entre el NDVI de invierno y de verano y la imagen toma el valor cero como el fondo. La amplitud a 1 año refleja la variabilidad intraanual o estacionalidad (Fuller & Prince, 1996)

La amplitud para los períodos de 9 y 3 años (Figura 1B,C) presenta valores más elevados (gris más claro) en la montaña reflejando eventos esporádicos de nevadas intensas o muy escasas. Desde lo dinámico expresa cambios en la cubierta vegetal con una frecuencia de una vez en 9 años y de tres veces en 9 años respectivamente, es decir que refleja la variabilidad interanual. La imagen de la amplitud a 9 años muestra valores más altos asociados al curso de los ríos Tunuyán y Atuel, a los ecosistemas áridos de las cerrilladas y huayquerías en la región central y también en la Payunia. En la imagen de amplitud a 3 años la mayor variabilidad se observa en el árido Valle de Uspallata, en huayquerías y piedemontes centrales, en la Payunia y en la llanura sur. Se trata de eventos especiales con variabilidad interanual, esto es coherente con la variabilidad de las precipitaciones de las zonas áridas, con eventos de lluvias o de caudales fluviales, muy por encima o por debajo de la media. Por esta razón es que los períodos de 9 y 3 años fueron seleccionadas para la clasificación ya que contienen información complementaria para las zonas más áridas. Las zonas más húmedas de Mendoza en cambio concentraron su información en el período a un año, es decir mayores amplitudes a 1 año que a 9 y 3 años. Para África, Azzali & Menenti (1996) determinaron que la variabilidad interanual estaba contenida en la amplitud a 9 y 4,5 años; en ese contexto Fuller & Prince (1996) sugieren que las áreas con alto valor de amplitud a 9 años, como en la vegetación de Kalahari, podrían indicar mayor resiliencia frente a variaciones climáticas. La información aportada por los diferentes parámetros de Fourier es complementaria entre sí ya que las variables son estadísticamente independientes como ha quedado demostrado al modelar la aridez de la llanura de Mendoza (González Loyarte *et al.*, 2008b).

Para la vegetación de Mendoza, con un ciclo

vegetativo por año, la fase a un año es muy variable, es más corta (grises oscuros, Figura 1E) en sitios bien provistos de agua (natural o artificialmente) que alcanzan la mayor actividad vegetativa en diciembre, enero o febrero, y más largas (grises más claros) para la vegetación xérica de la llanura NE o del SW de Mendoza donde el máximo de la vegetación se alcanza en abril y mayo respectivamente (Figura 3C_a,e); aunque para las Huayquerías del Río Colorado y Valle de Uspallata ciertos lugares muestran una fase más corta (gris muy oscuro) y la vegetación alcanza su máximo en primavera. La fase también se mostró breve en sitios con lluvias invernales y abundantes pastos como en la unidad de vegetación de *D. longisepala* en Precordillera (Figura 3B_c). La fase a un año muestra para toda la provincia una progresión geográfica como ocurre en la llanura de Mendoza donde las fases más cortas se dan en la llanura sur alargándose hacia el norte con la reducción de las precipitaciones ya que el efecto de las lluvias es gradual como en la progresión bioclimática estudiada por González Loyarte *et al.* (2008b, 2009). Por esta razón la fase es un parámetro muy útil de cartografiar como lo demostraron Negrón Juárez & Liu (2001) quienes la aplicaron para distinguir variaciones espaciales y estacionales de las lluvias en sitios con escasas estaciones meteorológicas.

Resultados semejantes a los alcanzados en este trabajo han sido encontrados por Paruelo *et al.* (1998) al delimitar las biozonas de la Patagonia y analizar los tipos funcionales ecosistémicos (Paruelo *et al.*, 2001) donde la integral del NDVI, asociada a la productividad primaria neta aérea anual refleja la abundancia de biomasa como consecuencia de las mayores lluvias. En nuestro trabajo es el parámetro NDVI medio el que refiere a la biomasa. Nuestro parámetro amplitud a un año en los oasis irrigados y vegetación de bañados de Mendoza cuya senescencia ocurre en invierno representa la máxima variabilidad intraanual y es comparable al rango relativo (RREL) (Paruelo *et al.*, 2001), que es la diferencia entre el máximo y mínimo valor anual del NDVI dividido la integral de NDVI, que alcanza una alta variabilidad intraanual en los bosques subantárticos caducifolios debido a la caída de hojas de las especies dominantes. Nuestra fase a un año es equivalente al tercer parámetro dinámico aplicado por dichos autores: el MMAX que es el mes en que alcanza el máximo valor del NDVI y conceptual-

mente es el mismo que la fase de Fourier, aunque Paruelo *et al.* (1998, 2001) determinan el MMAX para una curva de NDVI promedio de 10 píxeles y para nosotros, si bien la fase más importante es la del período a un año, también obtenemos fases para todos los períodos, datos necesarios para modelar la marcha anual del NDVI (11 bandas), que hemos denominado patrón fenológico, y la obtenemos para cada píxel (Figura 3).

Por otra parte podemos asociar nuestros resultados, por analogía con los parámetros para medir la variabilidad fenológica y su relación con la actividad fotosintética para Estados Unidos (Reed *et al.*, 1994), con la actividad fotosintética. De este modo podemos asociar la fase con el momento de máxima fotosíntesis medible, la amplitud con el rango de actividad fotosintética medible y el NDVI medio con la productividad primaria neta. Vemos así que si bien en nuestro trabajo no analizamos la productividad primaria, el concepto de actividad fotosintética está implícito en: los parámetros de Fourier, las clases del mapa de comportamiento fenológico y los patrones fenológicos. Las clases del mapa de áreas de comportamiento fenológico semejante son equivalentes conceptualmente a las clases de isocrecimiento de Azzali & Menenti (2000b).

Comportamiento fenológico y patrón fenológico

Es importante diferenciar comportamiento fenológico de patrón fenológico. Si bien ambos se basan en la fenología foliar, descrita y explicada mediante los parámetros de Fourier, se diferencian en el objetivo y en el número de parámetros involucrados.

En el comportamiento fenológico el objetivo es obtener un mapa cuyas clases sinteticen arealmente, dentro de la heterogeneidad propia de la clase, el nivel de actividad vegetativa (fotosintética) y su variabilidad inter e intraanual. Se obtiene mediante la clasificación de cinco parámetros de Fourier y las clases se describen por sus valores medios.

En el patrón fenológico el objetivo es modelar la marcha mensual del NDVI desprovista de ruidos y conteniendo la variabilidad inter e intraanual; es una curva que se calcula con 11 parámetros de Fourier, cinco de ellos son comunes al mapa de comportamiento fenológico. El patrón fenológico describe el funcionamiento de la vegetación a nivel regional; muestra cómo varía, mes a mes, la actividad vegetativa (fotosintética), a través de los cambios de la

fenología foliar, a lo largo de un año para un sitio determinado.

Mapa de comportamiento fenológico

El mapa resultante de la clasificación con los parámetros de Fourier está basado en la dinámica temporal de la vegetación y sus clases son descritas por el valor medio de dichos parámetros (Tabla 1). Siguiendo el concepto de Fuller y Prince (1995) que los parámetros de Fourier constituyen un nuevo abordaje para el estudio del comportamiento fenológico a escala regional es que denominamos a nuestro mapa: áreas de comportamiento fenológico semejante. Hablamos de comportamiento semejante porque estos parámetros presentan una dispersión generando una heterogeneidad al interior de cada clase. El criterio para fijar un límite a esta heterogeneidad está determinado fundamentalmente por el perfil estadístico de cada clase pero también por la distribución espacial de la clase. Se podría obtener un número elevado de clases de dispersión casi nula pero en ese caso tendríamos una variación espacial de clases tan grande que el mapa parecería un conjunto de puntos diferentes carentes de significado ecológico. Por esta razón la continuidad espacial de las clases fue considerada ya que los cambios fenológicos son graduales como respuesta al clima a menos que condiciones topográficas (cerros) o edáficas muy notables (vegas, irrigación) determinen un cambio rápido. En estas clases la fase a un año es la variable de mayor dispersión. Consideramos que 18 clases de comportamiento fenológico son por ahora suficientes para comprender el comportamiento fenológico de la vegetación a nivel regional para Mendoza y muestran en general coherencia espacial y dinámica y pueden orientar en la selección de áreas para futuros estudios fenológicos de detalle y para instalar estaciones climáticas ya que la fenología es la expresión de la vegetación frente al clima.

Los parámetros de Fourier al ser integrados mediante la clasificación complementan su información dinámica y son sintetizados geográficamente en una sola imagen. En nuestro mapa, a diferencia del obtenido para el sur de África (Azzali & Menenti, 2000a) hemos utilizado la amplitud a 9 y 3 años para expresar la variabilidad interanual en lugar de los 9 y 4,5 años que dichos autores aplicaron. En relación a la variación intraanual sólo utili-

zamos amplitud y fase a un año porque en Mendoza hay un ciclo anual tanto en la vegetación natural como en los cultivos perennes; para África en cambio, hay unidades próximas al ecuador que responden a la bimodalidad de las lluvias con dos ciclos de vegetación por año donde la amplitud a seis meses es importante.

Al comparar, mediante el muestreo, las clases de comportamiento fenológico con las unidades de vegetación de Roig *et al.* (2000) observamos que a nivel regional no hay una relación unívoca, a una unidad de vegetación le corresponden varias clases de comportamiento fenológico como lo demostraron también estudios para el sur de África donde las 19 clases dinámicas definidas por parámetros de Fourier, denominadas complejo vegetación-suelos-clima, coincidían geográficamente con varias (cinco a nueve) unidades fisonómico-florísticas de vegetación y que la máxima correspondencia con una sola unidad fue de 72% (Azzali & Menenti, 2000a). En nuestro caso la no correspondencia completa de clases del mapa de comportamiento fenológico con unidades de vegetación de Mendoza se debe a que ambos mapas se realizaron con criterios diferentes: la dinámica temporal de la actividad vegetativa para el primero y las características fisonómico-florísticas y de ecosistemas a nivel regional (Roig *et al.*, 1988) para el segundo. La información que brinda cada mapa es diferente y resulta complementaria ya que uno describe áreas de fenología foliar semejante y el otro áreas semejantes desde lo fisonómico-florístico. La fenología foliar responde a un conjunto de características de la vegetación: cobertura, estructura, biomasa, y caducidad del follaje; esto es consecuencia de la composición florística pero no es "sensible" a un listado florístico detallado ya que interesa fundamentalmente la cobertura y caducidad del follaje detectada por imágenes regionales de NDVI. Por otro lado, en estas imágenes cada pixel representa 57,8 km² y engloba comunidades diferentes y la señal del NDVI responde a las características del follaje de la vegetación dominante espacialmente. El mapa de vegetación de Roig *et al.* (2000) en cambio ha sido realizado sobre la base de la regionalización determinada por los ecosistemas de segundo y tercer orden a los que se ha volcado la información proveniente de cartas y estudios de vegetación de detalle de diversas escalas (1:50.000 – 1:100.000) y de prospecciones a campo; las curvas de nivel han constituido

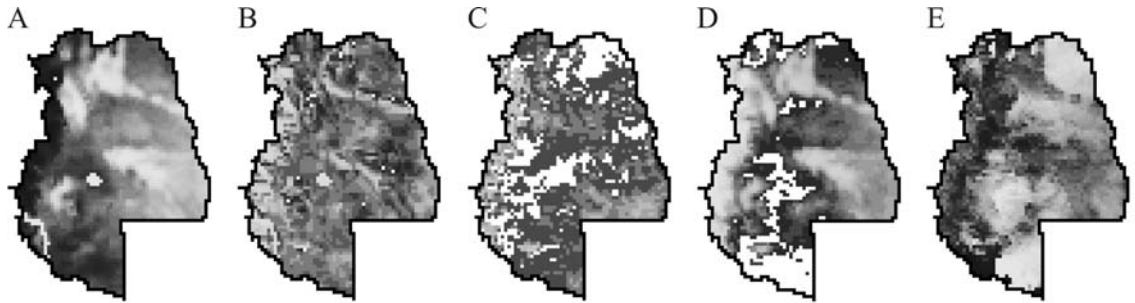


Fig. 1. Imágenes de los parámetros de Fourier seleccionados para las clasificaciones no supervisadas. A. NDVI medio, B. Amplitud a 9 años, C. Amplitud a 3 años, D. Amplitud a 1 año, E. Fase a 1 año. A mayor valor de la variable más claro es su gris; donde la variable toma valor 0 (cero) se confunde con el fondo de la imagen y parece “perforado”.

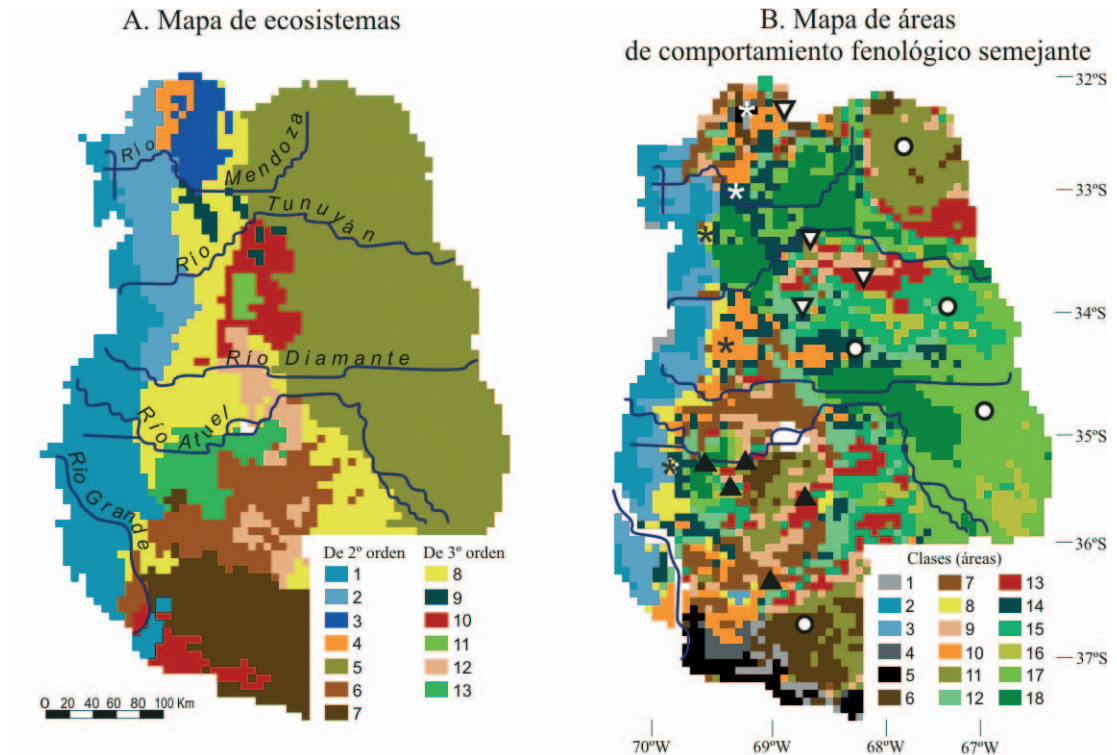


Fig. 2. Mapas de ecosistemas y de áreas de comportamiento fenológico semejante para la Provincia de Mendoza. A. Mapa de ecosistemas (adaptado de Abraham, 2000 y Roig *et al.*, 1988). Ecosistemas de segundo orden: 1- Cordillera Principal, 2- Cordillera Frontal, 3- Precordillera, 4- Valle de Uspallata, 5- Llanura, 6- Payunia N, 7- Payunia S. Ecosistemas de tercer orden: 8- Piedemontes, 9- Cerrilladas, 10- Huayquerías, 11- Meseta del Guadal, 12- Bloque de San Rafael, 13- Bolsón de Llancañel y bañados. B. Mapa de áreas de comportamiento fenológico semejante con los sitios muestreados para modelar el patrón fenológico y que corresponden a las unidades de vegetación (Roig *et al.*, 2000) de: las montañas (*), de los bolsones y huayquerías (∇), de las Travesías (○) y de la Payunia (▲).

una guía para el trazado de las unidades de vegetación que son a su vez complejas con un elenco de comunidades donde la composición florística es importante. Este mapa, publicado en escala sintética (1:1.500.000) constituye el mapa de referencia de las unidades de vegetación para la provincia de Mendoza. Consecuentemente, la diferencia en la generación de cada mapa explica las variaciones dinámicas que la misma unidad de vegetación presenta en los diferentes climas y ecosistemas como en la unidad 41 (Figura 3D_a,b). Paruelo *et al.* (2001) no encontraron una clara correspondencia entre los tipos funcionales ecosistémicos y las provincias fitogeográficas donde allí también un tipo funcional ecosistémico puede presentarse en más de una provincia fitogeográfica y viceversa.

Comportamiento fenológico y ecosistemas

La diversidad de ecosistemas de Mendoza determina una variada respuesta de la fenología foliar regional. La comparación del mapa de comportamiento fenológico con el de ecosistemas muestra sintéticamente cómo se distribuyen las clases dinámicas en los ecosistemas de segundo y tercer orden (Figura 2A, B; Tabla 2). Los ecosistemas más extensos si bien tienen mayor número de clases (14) a veces presentan una fuerte concentración (>40%) de una clase fenológica como en Cordillera Principal, Llanura y Payunia S.

Las clases de comportamiento fenológico que evidencian la menor actividad vegetativa (NDVI medio <0,020, Tabla 1) y la mayor variabilidad asociada a la cubierta de nieve (clases 2,3) se concentran en la cordillera en cambio aquellas de baja actividad (NDVI medio 0,060-0,070) y variada época de máxima actividad fotosintética (fase) (clases 1,4,5,6) se concentran en ecosistemas áridos (Payunia S y huayquerías) que presentan condiciones difíciles para el desarrollo de la vegetación. Las clases de actividad vegetativa media (NDVI medio 0,075-0,090), se distribuyen principalmente en el borde oriental de la cordillera (clase 8), en el piedemonte (7,10), en Payunia N (7,9) y en la Llanura árida del NE (11). Las clases de actividad vegetativa alta (NDVI medio 0,100-0,150; clases 12-16) se distribuyen principalmente en la llanura y piedemontes con algún desarrollo en Payunia N y Bloque de San Rafael. Las clases de mayor actividad foliar (NDVI medio > 0,150; clases 17,18) se desarrollan

principalmente en llanura y algo en los piedemontes.

Vemos que los ecosistemas determinan las características dinámicas de la vegetación correspondiendo en general baja actividad vegetativa en ecosistemas de relieve pronunciado y suelos secos donde a las bajas precipitaciones se suma el fuerte escurrimiento (Payunia S y Huayquerías); la mayor actividad fotosintética se desarrolla en la llanura y piedemontes.

Cada ecosistema presenta clases que muestran distinta actividad fotosintética comparables con los tipos funcionales ecosistémicos definidos por características funcionales: productividad primaria neta anual aérea, suelos y grandes unidades fisonómicas (Paruelo *et al.*, 1998, 2001).

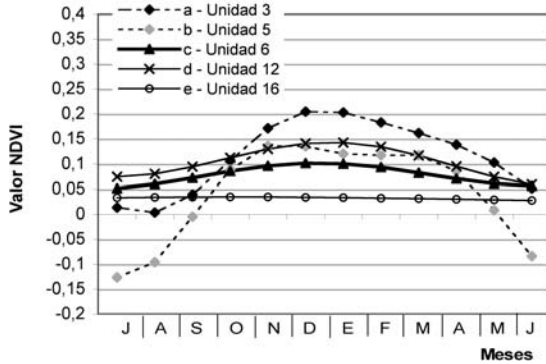
Patrones fenológicos

Los diversos patrones fenológicos que caracterizan la vegetación de Mendoza reflejan el contraste entre la vegetación de zonas muy áridas donde la dinámica de la cubierta vegetal a nivel regional es muy baja para diversos ecosistemas (Figura 3: A_e; B_c; C_e; D_b) y vegetación con mayor disponibilidad hídrica donde los cambios en la actividad fotosintética del invierno al verano son contrastados (Figura 3: C_d; D_e). Entre estos dos últimos patrones podemos apreciar cómo se producen los cambios, progresivos y desde un nivel de actividad vegetativa en invierno para la Llanura sur (unidad 39) o los cambios más fuertes en la vegetación de vegas de Llanquanelo (unidad 48) donde la baja actividad invernal cambia muy rápidamente con la disponibilidad hídrica hasta llegar a niveles de intensa actividad fotosintética.

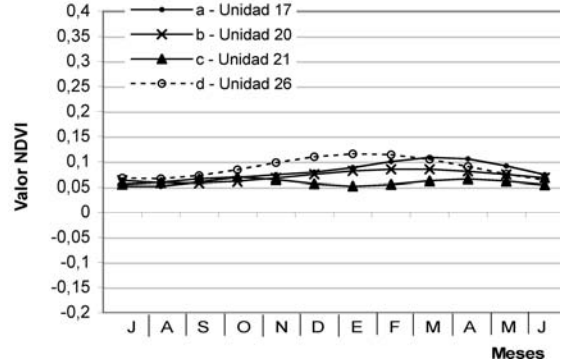
Hay patrones fenológicos que son casi simétricos con su máximo NDVI en pleno verano (Figura 3: A_d; B_d; C_c) y otros marcadamente asimétricos que reflejan su máxima actividad vegetativa a fines del verano (Figura 3: B_a; C-b). Los patrones fenológicos también pueden reflejar una cierta bimodalidad producto de dos momentos en el año en que la actividad vegetativa es más alta (Figura 3: A_b; B_c); se trata de situaciones especiales en el contexto de los patrones para Mendoza donde predomina un solo máximo por año.

La variedad de patrones fenológicos nos muestra que la caracterización fenológica de las unidades de vegetación no es unívoca ya que una misma unidad

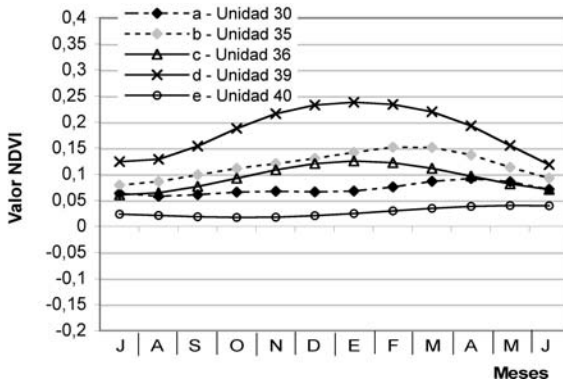
A – VEGETACIÓN DE LAS MONTAÑAS



B – VEGETACIÓN DE BOLSONES Y HUAYQUERÍAS



C – VEGETACIÓN DE LAS TRAVESÍAS



D – VEGETACIÓN DE LA PAYUNIA

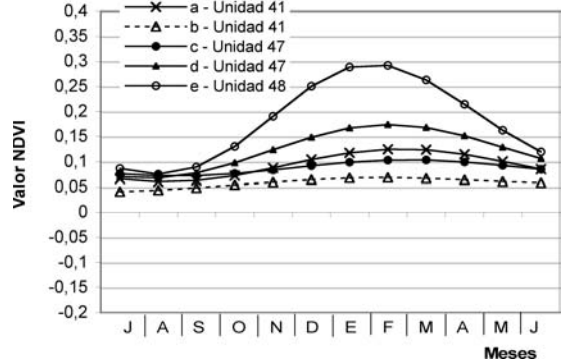


Fig. 3. Patrón fenológico de 17 unidades de vegetación de la Provincia de Mendoza. Las unidades de vegetación corresponden al mapa de vegetación de Roig *et al.* (2000).

de vegetación puede presentar varios patrones fenológicos como queda reflejado en las unidades 41 y 47 (Figura 3 D_a-d). Las unidades de vegetación de Mendoza de Roig *et al.* (2000) han sido definidas por su fisonomía y composición florística dominante aunque presentan variaciones determinadas por la topografía (altimetría, exposición), el suelo, el uso, etc., es decir presentan heterogeneidad. El patrón fenológico expresa los cambios de la cubierta vegetal a lo largo del año, por esta razón una misma unidad de vegetación puede ser descripta dinámicamente por más de un patrón fenológico según su ubicación geográfica. En este sentido el patrón fenológico podría aplicarse para caracterizar los cambios graduales en la cubierta vegetal en un gradiente de

humedad o de uso. De este modo el patrón fenológico también brinda información complementaria al mapa de unidades de vegetación.

El hecho que una misma unidad de vegetación de Roig *et al.* (2000) puede ser caracterizada fenológicamente por más de un patrón fenológico según su localización implica que los patrones fenológicos que caractericen dinámicamente a cada unidad de vegetación pueden corresponder a una o varias clases de comportamiento fenológico. Por otro lado, la misma clase de comportamiento fenológico puede caracterizar dos unidades de vegetación con dos curvas diferentes (Figura 3A_a,b; clase 8). Esto se explica porque al interior de las clases del mapa de comportamiento fenológico también existe hete-

Tabla 1. Valores medios de los cinco parámetros de Fourier para las 18 clases del mapa de áreas de comportamiento fenológico semejante para la Provincia de Mendoza.

Clases	Valores medios de los parámetros de Fourier				
	NDVI medio	Amp 9 años	Amp 3 años	Amp 1 año	Fase 1 año
1	-0,157	0,024	0,014	0,002	7,806
2	-0,102	0,074	0,048	0,288	5,17
3	0,011	0,068	0,034	0,171	5,141
4	0,062	0,03	0,016	0,002	4,005
5	0,064	0,033	0,019	0,003	2,558
6	0,068	0,034	0,017	0,006	6,872
7	0,075	0,029	0,015	0,019	5,247
8	0,076	0,045	0,023	0,079	5,043
9	0,083	0,027	0,015	0,014	5,703
10	0,088	0,029	0,016	0,025	4,834
11	0,089	0,029	0,014	0,014	6,119
12	0,107	0,03	0,016	0,025	5,24
13	0,113	0,029	0,019	0,024	5,693
14	0,119	0,028	0,016	0,039	5,05
15	0,121	0,028	0,018	0,031	5,433
16	0,143	0,036	0,023	0,048	5,5
17	0,16	0,031	0,02	0,059	5,259
18	0,213	0,029	0,017	0,105	5,179

rogeidad. Por estas razones una misma clase de comportamiento fenológico presenta diferentes patrones fenológicos como ocurre en la unidad de vegetación 5 la cual a pesar de presentar un patrón fenológico diferente a la unidad 3 pertenece a la misma clase de comportamiento fenológico. Esto se explica porque a la heterogeneidad propia de cada clase en las cinco bandas se suman seis parámetros más para modelar el patrón fenológico de modo que dos pixeles vecinos presentarán difícilmente valores idénticos en once variables. Es decir, se debe considerar la heterogeneidad de: las unidades de vegetación, las clases de comportamiento fenológico y los patrones fenológicos.

Los patrones fenológicos de menor crecimiento vegetativo y con menos contraste invierno-verano corresponden a condiciones climáticas más xéricas expresando su máximo vegetativo en general al final del verano. A medida que las condiciones son más húmedas el contraste entre invierno y verano se incrementa acortándose el período de máxima expresi-

ón vegetativa. La influencia de las precipitaciones níveas se evidencian por los valores negativos de las curvas y en algunos casos con un máximo de actividad vegetativa temprano en primavera-verano.

CONCLUSIONES

La Transformada Rápida de Fourier posibilita un análisis sencillo y claro de las series temporales de imágenes de índice de vegetación. Los períodos a 9 y 3 años reúnen información de la variabilidad interanual y el período a un año explica la variabilidad intraanual o estacionalidad.

El mapa de comportamiento fenológico contribuye con elementos dinámicos al estudio regional de la vegetación, plantea una zonificación diferente que debe ser comprendida desde un complejo de variables: vegetación, clima, uso del suelo, etc. que determinan una mayor o menor actividad vegetativa (fotosintética).

Tabla 2. Comparación del mapa de comportamiento fenológico con el mapa de ecosistemas. Distribución porcentual de la correspondencia geográfica de cada clase de comportamiento fenológico con cada ecosistema.

Clases	Ecosistemas de 2º orden													Ecosistemas de 3º orden						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
1	6,1	0	3	6,1	0	0	54,6	3	0	27,3	0	0	0							
2	81,6	18,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
3	70,9	26,7	0	0	0	0	2,4	0	0	0	0	0	0							
4	25	0	8,3	4,2	0	0	25	0	0	37,5	0	0	0							
5	11,7	0	5	1,7	0	6,7	33,3	0	0	41,7	0	0	0							
6	0	0	2,1	2,1	12	2,1	63,4	2,1	0	3,5	0	0	0							
7	4,7	10,7	3,3	1,9	1,9	15,4	11,6	34	0	3,7	0,5	9,3	3,3							
8	59,2	22,5	0	0	0	9,9	5,6	2,8	0	0	0	0	0							
9	0	6,5	2	2	18,2	18,2	11,7	16,2	2	7,1	0	7,1	9,1							
10	13,9	18,2	14,6	3	2,4	3,6	12,7	22,4	0	3	0,6	5,5	0							
11	0	0,7	0	0,4	55,8	9,3	16	4,8	0	2,2	0	1,5	9,3							
12	9,8	1,8	4,3	1,2	17,8	13,5	2,5	13,5	0	8,6	5,5	17,8	3,7							
13	0	0	0,6	0	44,2	16,6	4,4	17,1	0,6	6,6	1,1	3,9	5							
14	13,6	7,7	10,9	1,4	16,3	6,3	0,9	21,3	5,9	9,5	0,5	5,9	0							
15	0,7	0	0	0	54,2	12,9	2,2	11,4	0,4	8,1	1,5	5,2	3,3							
16	0	0	0	0	74,3	2	0	11,9	2	1	0	0	8,9							
17	1,2	1,6	0,8	0,4	78,1	1,4	0	12,6	1,2	0,8	0	0,8	1							
18	1,6	5,5	0	0	69,4	0,3	0	21,9	0,3	0	0	0,3	0,7							

El patrón fenológico describe el funcionamiento de la vegetación a nivel regional y permite detectar y comprender sus variaciones tanto en una misma unidad de vegetación como en una misma clase de comportamiento fenológico o en un ecosistema. El conjunto de la vegetación de Mendoza responde a un ciclo anual con algunos matices muy localizados de ligera bimodalidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a I. Peralta de Galmarini por la lectura crítica del texto, a G. Varoli Piazza por sus valiosas sugerencias, a M. C. Scoones por su cuidadosa ilustración, a N. Horak por la traducción del resumen y al Programa Regional de Meteorología de Mendoza (CCT- CONICET/ Mendoza) por el acceso a datos climáticos inéditos. Los autores agradecen especialmente a los revisores por sus valiosas y detalladas observaciones y recomendaciones que contribuyeron a aclarar conceptos, profundizar la investigación y a mejorar el manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- ABRAHAM, E. M. 2000. Geomorfología de la Provincia de Mendoza. In: ABRAHAM, E. M. & F. RODRÍGUEZ MARTÍNEZ (eds.), *Argentina. Recursos y Problemas Ambientales de la Zona árida. Primera Parte. Provincias de Mendoza, San Juan y La Rioja*. Vol.1-2, pp. 29- 48. PAN/SDSyPA-INTA-GTZ, IADIZA, U. de GRANADA. Mendoza, Argentina.
- ANYAMBA, A. & C. J. TUCKER. 2005. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003. *J. Arid Environ.* 63(3):596-614.
- AZZALI, S. & M. MENENTI (eds.). 1996. *Fourier analysis of temporal NDVI in the Southern African and American continents*. Report 108, pp. 1-149. Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, Wageningen, The Netherlands.
- AZZALI, S. & M. MENENTI. 2000a. Mapping vegetation-soil-climate complexes in southern Africa using temporal Fourier analysis of NOAA-AVHRR data. *Int. J. Rem. Sens.* 21(5):973-996.
- AZZALI, S. & M. MENENTI. 2000b. Mapping isogrowth zones on continental scale using temporal Fourier analysis of AVHRR-NDVI data. In: ROERINK, G. J & M. MENENTI (eds.), *Time series of satellite data: development of new products*, pp. 40-52. Netherlands Remote Sensing Board (BCRS), NRSP-2 Report 99-33. Holanda.
- CHOUDHURY, B. J. 1987. Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitive analysis. *Remote Sens. Environ.* 22(2):209-233.
- DALMASSO, A., E. MARTÍNEZ CARRETERO, F. VIDELA, S. PUIG & R. CANDIA. 1999. Reserva Natural Villavicencio (Mendoza, Argentina). Plan de Manejo. *Multequina* 8:11-50.
- DE MARCO, G., F. A. ROIG & C. F. WUILLOUD. 1993. Vegetación del Piedemonte Andino en el Centro Oeste de Mendoza. *Multequina* 2: 201-241.
- ERDAS. 1991. *ERDAS Field Guide*. ERDAS Inc., Second Edition, pp. 394. Atlanta, Estados Unidos.
- EVARSA (Evaluación de Recursos S.A.). 2001. *Estadística Hidrológica del Siglo XX República Argentina*. Buenos Aires, pp. 1-291.
- FULLER, D. O. & S. D. PRINCE. 1996. Regional-scale foliar phenology in tropical Southern Africa: An application of the Fast Fourier Transform to time series of satellite imagery. In: AZZALI, S. & M. MENENTI (eds.). *Fourier analysis of temporal NDVI in the Southern African and American continents*. Report 108, pp.113-132. Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research. Wageningen, The Netherlands.
- FUNES, I. 2008. Evaluación de la potencialidad de uso de *Deuterocohnia longisepala* (Baker – Mez) “Chaguar”, para la revegetación de laderas degradadas por la actividad minera no metalífera. Tesis de Grado en Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, 48 pp. Facultad de Ciencias Agrarias, U.N de Cuyo.
- GONZÁLEZ LOYARTE, M. M., M. MENENTI, P. WEIDEMA, F. A. ROIG, & M. BARTON, inédito, 2000a. Mapping vegetation degradation applying remotely sensed data in the arid zones of Argentina. The northeastern plain of Mendoza. In: *Proceedings of United Nations / International Astronautical Federation Workshop on “Operational Strategy for Sustainable Development using Space”*. Sao José dos Campos, Brazil, 28-30 September 2000. 17 pp.
- GONZÁLEZ LOYARTE, M. M., A. G. RODEGHIERO, E. BUK & S. TRIONE. 2000b. Análisis comparativo de dos comunidades en el bosque de *Prosopis flexuosa* DC. del NE de Mendoza, Argentina. *Multequina* 9: 75-89.
- GONZÁLEZ LOYARTE, M. M. & M. MENENTI. 2008a. Impact of rainfall anomalies on Fourier parameters of NDVI time series of northwestern Argentina. *Int. J. Rem. Sens.* 29(4):1125 – 1152.
- GONZÁLEZ LOYARTE, M. M., M. MENENTI & M. M. DIBLASI. 2008b. Modelling bioclimate by means of Fourier analysis of NOAA-AVHRR NDVI time series in Western Argentina. *Int. J. Climatol.* 28: 1175-1188. DOI: 10.1002/joc.1610.
- GONZÁLEZ LOYARTE, M. M., M. MENENTI, A. M. DIBLASI. 2009. Mapa bioclimático para las Travesías de Mendoza (Argentina) basado en la fenología foliar. *Revista de la*

- Facultad de Ciencias Agrarias*. 41(1): 105-122. ISSN 0370-4661.
- GONZÁLEZ LOYARTE, M. M.; DIBLASI, A. M., 2009. Análisis regional de los factores que controlan la vegetación del abanico del Río Atuel (Provincia de Mendoza, Argentina). *Contribuciones Científicas GEA*, 21: 159-174.
- JAKUBAUSKAS, M.E., D. R. LEGATES & J. H. KASTENS. 2001, Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. *Photogramm. Eng. Rem. Sens.* 67: 461-470.
- JUSTICE, C. O., B. N. HOLBEN & M. D. GWYNNE. 1986. Monitoring East African vegetation using AVHRR data. *Int. J. Rem. Sens.* 7(11):1453-1474.
- LE HOUÉROU, H. N., E. MARTÍNEZ CARRETERO, J. C. GUEVARA, A. B. BERRA, O. R. ESTEVEZ & C. R. STASI. 2006. The true desert of the Central-West Argentina Bioclimatology, Geomorphology and Vegetation. *Multequina* 15: 1-15.
- MARTÍNEZ CARRETERO, E., F. A. ROIG & E. MÉNDEZ. 1988. *Mapa Fisonómico de la Provincia de Mendoza*. Suplemento Diario Los Andes: Mendoza, Argentina. 2 pp.
- MARTÍNEZ CARRETERO, E. 2000. Vegetación de los Andes Centrales de la Argentina. El Valle de Uspallata, Mendoza. *Bol. Soc. Argent. Bot.* 34(3-4): 127-148.
- MARTÍNEZ CARRETERO, E. 2004. La Provincia Fitogeográfica de la Payunia. *Bol. Soc. Argent. Bot.* 39(3-4): 195-226.
- MÉNDEZ, E. 1989. Ejemplo de dinamismo de la vegetación en el piedemonte de las huayquerías. In: ROIG, F.A. (ed.), *Detección y Control de la Desertificación*, UNEP-CONICET/IADIZA-CRICYT, pp. 192-195, Mendoza, Argentina.
- MÉNDEZ, E. 1997. Flora melífera de la Carta de vegetación Zapata (Mendoza-Argentina). *Bol. Soc. Argent. Bot.* 33(1-2): 7-12.
- MÉNDEZ, E. 2005. La vegetación de la Reserva Provincial Laguna de Llanquanelo (Mendoza, Argentina). *Candollea* 60(1):123-148.
- MENENTI, M., S. AZZALI, W. VERHOEF & R. VAN SWOL. 1991. *Mapping agroecological zones and time lag in vegetation growth by means of Fourier analysis of time series of NDVI images. Monitoring Agroecological Resources with Remote Sensing and Simulation (MARS)*. Report 32, pp. 1-46. Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research. Wageningen, The Netherlands.
- MENENTI, M., S. AZZALI, W. VERHOEF & R. VAN SWOL. 1993. Mapping agroecological zones and time lag in vegetation growth by means of Fourier analysis of time series of NDVI images. *Adv. Space Res.* 13(5): 233-237.
- NEGRÓN JUÁREZ R.I. & W. T. LIU. 2001. FFT analysis on NDVI annual cycle and climatic regionality in Northeast Brazil. *International Journal of Climatology* 21: 1803-1820.
- PÁEZ, M. M, F. A. QUINTANA & C. F. PÉREZ. 2004. Biogeografía de las Regiones Áridas y Semiáridas entre 35° y 39° S, Argentina. *Bol. Soc. Argent. Bot.* 39(3-4): 171-180.
- PARUELO, J. M., E. G. JOBBAGY & O. E. SALA. 1998. Biozones of Patagonia (Argentina). *Ecología Austral* 8: 145-153.
- PARUELO, J. M., E. G. JOBBAGY & O. E. SALA. 2001. Current distribution of Ecosystem Functional Types in Temperate South America. *Ecosystem* 4: 683-698.
- POTTER C.S. & V. BROOKS. 1998. Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI. *International Journal of Remote Sensing* 19: 2921-2948.
- REED B. C., J. F. BROWN, D. VANDERZEE, T. R. LOVE-LAND, J. W. MERCHANT & D. O. OHLEN. 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science* 5: 703-714.
- ROERINK, G. J., M. MENENTI, W. SOEPBOER & Z. W. SU. 2003. Assessment of climate impact on vegetation dynamics by using remote sensing. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 28:103-109.
- ROIG, F. A. 1970. Aportes al inventario de los recursos naturales renovables de la Provincia de Mendoza. 1. La Reserva Forestal de Ñacuñán. *Deserta* 1: 201-226.
- ROIG, F.A. 1976. Las comunidades vegetales del piedemonte de la Precordillera de Mendoza. *Ecosur* 3(5): 1-45.
- ROIG, F. A. 1982. Cuyo. In: *Conservación de la vegetación natural en la República Argentina*, pp. 61-100. Simposio XVIII Jornadas Argentinas de Botánica. Fundación Miguel Lillo, Sociedad Argentina de Botánica.
- ROIG, F. A. 1989. Ensayo de detección y control de la desertificación en el W de la Ciudad de Mendoza, desde el punto de vista de la vegetación. In: ROIG, F.A. (ed.), *Detección y Control de la Desertificación*, UNEP-CONICET/IADIZA-CRICYT, pp. 196-232, Mendoza, Argentina.
- ROIG, F. A. 1994. II La Provincia del Cardonal. In: Botánica y Fitosociología (IADIZA) (ed.), *La vegetación de los Andes Centrales de Argentina. Excursión Botánica*, pp. 19-24, Mendoza, Argentina.
- ROIG, F. A.; E. MARTÍNEZ CARRETERO & E. MÉNDEZ. 1988. *Mapa Ecológico de la Provincia de Mendoza*. Suplemento Diario Los Andes: Mendoza, Argentina. 2 pp.
- ROIG, F. A., M. M. GONZÁLEZ LOYARTE, E. MARTÍNEZ CARRETERO, A. BERRA & C. WUILLOUD. 1992. La Travesía de Guanacache, Tierra Forestal. *Multequina* 1: 83-91. Mendoza, Argentina.
- ROIG, F.A., E. MARTÍNEZ CARRETERO & E. MÉNDEZ. 2000. Vegetación de la Provincia de Mendoza. In: ABRAHAM, E. M. & F. RODRÍGUEZ MARTÍNEZ (eds.), *Argentina. Recursos y Problemas Ambientales de la Zona árida. Primera Parte. Provincias de Mendoza, San Juan y La Rioja*. Vol.1-2, pp. 63-64. PAN/SDSyPA-INTA-GTZ, IADIZA, U. de GRANADA. Mendoza, Argentina.
- ROIG, F. A. & B. ROSSI. 2001. Flora y Vegetación. In: Claver, S. & S. Roig-Juñent (eds.), *El desierto del Monte: La Reserva de Biosfera de Ñacuñán*, pp. 41-70. Ed. Trunfar, Córdoba, Argentina.
- ROIG, F. A., E. M. ABRAHAM & E. MÉNDEZ. 2007. Vegetation belts, cold and soil freezing in the Central Andes of Mendoza, Argentina. *Phytocoenologia* 37(1):99-114.
- ROIG JUÑENT, F. A. & BONINSEGNA, J. A. 1990. Environmental factors affecting growth of "Adesmia" communities as determined from tree rings. *Dendrochronologia* 8:39-66.

- SCHULTZ, P.A. & M. S. HALPERT. 1995. Global analysis of the relationships among a vegetation index, precipitation and land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing* 16: 2755-2777.
- SORIANO, A. & J. M. PARUELO. 1992. Biozones: vegetation units defined by functional characters identifiable with the aid of satellite sensor images. *Global Ecol. & Biogeog. Letters*, 2:82-89.
- TUCKER, C. J. & P. J. SELLERS. 1986. Satellite remote sensing of primary production. *Int. J. Rem. Sens.* 7(11):1395-1416.
- VERHOEF, W. 1996. Application of Harmonic Analysis of

NDVI Time Series (HANTS). In: AZZALI, S. & M. MENENTI (eds.). *Fourier analysis of temporal NDVI in the Southern African and American continents*. Report 108, pp. 19-24. Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research. Wageningen, The Netherlands.

Recibido el 4 de septiembre de 2009, aceptado el 20 de septiembre de 2010.