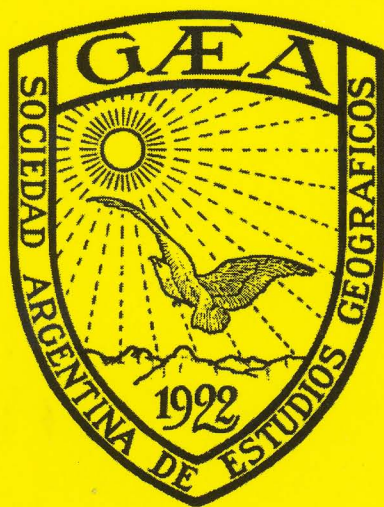


Contribuciones Científicas

GÆA - Sociedad Argentina de Estudios Geográficos

Volumen 20, 2008



AGENCIA

NACIONAL DE PROMOCION
CIENTIFICA Y TECNOLOGICA



Buenos Aires - 2008

MODELO PROBABILÍSTICO DE LA ARIDEZ EN LA PROVINCIA DE MENDOZA A PARTIR DE LA FENOLOGÍA FOLIAR A ESCALA REGIONAL

GONZÁLEZ LOYARTE, María Margarita ¹ - DIBLASI, Ángela Magdalena ^{2,3}
MENENTI, Massimo ^{4,5}

¹ Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas (IADIZA/ CONICET CCT Mendoza, sede CRICYT), CC 507, 5500 Mendoza, Argentina
gloyarte@lab.cricyt.edu.ar

² Facultad de Ciencias Económicas, Univ. Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina.

³ Área de Ciencias Exactas/ CONICET CCT Mendoza, sede CRICYT.

⁴ Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo – ISAFoM, S. Sebastiano al Vesuvio, Italia.

⁵ Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection (LSIT), Univ. L. Pasteur, Strasbourg, Francia.

Resumen

Se plantea un modelo espacial continuo del índice de aridez (P/ETP) en función de la actividad de la vegetación (fenología foliar) a escala regional. Como medida de la fenología foliar usamos los parámetros obtenidos de la descomposición de una serie temporal de 9 años de imágenes mensuales de índice verde (NOAA-AVHRR NDVI) mediante la Transformada Rápida de Fourier (TRF). La TRF descompone la serie en una señal media y componentes sinusoidales (nuevas imágenes). Se seleccionan los parámetros de Fourier índice verde medio, amplitud a 3 y 1 año. Se ajusta luego un modelo de regresión lineal múltiple con P/ETP como variable respuesta y los parámetros de Fourier como predictivas para los sitios con estación meteorológica. El modelo de regresión explica el 79% de la variabilidad de P/ETP. Este modelo es aplicado entonces a las imágenes completas para obtener un mapa de índice de aridez para la provincia de Mendoza.

Palabras Clave: serie de tiempo, análisis de Fourier, regresión múltiple, fenología foliar, índice de aridez.

PROBABILISTIC MODEL OF THE ARIDITY IN MENDOZA PROVINCE DERIVED FROM FOLIAR PHENOLOGY AT REGIONAL SCALE

Abstract

A continuum spatial model for the Aridity Index as a linear function of the vegetation activity (foliar phenology) is built at regional scale. As a measure of foliar phe-

nology we used parameters obtained by modelling NDVI time series with a Fast Fourier Transform (FFT) applied to a 9-year time series of monthly NOAA-AVHRR NDVI (vegetation index) images. The FFT decomposes the series into an average signal and sinusoidal components (new images). The selected FFT parameters are mean NDVI, and amplitude for three and a one-year period. Then, a multiple linear regression model is fitted to P/ETP as predicted variable and the FFT parameters as predictive variables for the locations with meteorological stations. The regression model explains 79% of the spatial variation in the P/ETP ratio. The regression model was then applied to the full images to obtain a map of the ratio P/ETP for the province of Mendoza.

Key words: time series, Fourier analysis, multilinear regression, foliar phenology, índice de aridez

Introducción

Numerosos estudios regionales han probado la utilidad de las imágenes satelitarias debido a la variedad de resoluciones radiométricas dentro de los sectores visible e infrarrojo del espectro electromagnético. La relación entre la banda (imagen) del rojo del espectro visible (RV) y la del infrarrojo cercano (IRC) ha potenciado los estudios de la cubierta vegetal y su relación con el clima. Resulta de especial interés un índice construido con estas dos bandas, el Índice Verde de la Diferencia Normalizada (IVDN, conocido por sus siglas en inglés NDVI) $IVDN = (imagen\ IRC - imagen\ RV) / (imagen\ IRC + imagen\ RV)$; el resultado es otra imagen, la de IVDN. El IVDN es una clara expresión de la fenología foliar (Justice *et al.*, 1985; Townshend y Justice, 1986) y su relación con las precipitaciones ha sido profusamente documentada, particularmente cuando las lluvias se encuentran entre 150-1000 mm/año (Hielkema *et al.*, 1986; Malo y Nicholson, 1990). Por esta razón las imágenes de IVDN son utilizadas para estudiar la distribución espacial e intensidad de las sequías a nivel regional (imágenes NOAA-AVHRR NDVI GAC) (Henricksen y Durkin 1986; Tucker *et al.*, 1986; Anyamba y Tucker, 2005).

Las series de varios años de imágenes mensuales de IVDN permiten analizar la variabilidad de las precipitaciones, reflejada por los cambios fenológicos, a tal punto que en lugares con datos dispersos de lluvia se han utilizado imágenes de IVDN para estudiar y predecir eventos El Niño (Liu y Negrón Juárez, 2001; Seiler y Kogan, 2002; Poveda y Salazar, 2004; Barbosa *et al.*, 2006). Para comprender el aporte climático de las series temporales de imágenes NOAA-AVHRR NDVI es necesario simplificar la serie temporal en parámetros que la describan y que tengan un significado dinámico de la vegetación. En este sentido ha sido aplicado con éxito el método de la Transformada Rápida de Fourier (Menenti *et al.*, 1993; Azzali y Menenti, 1996). La Transformada Rápida de Fourier (TRF) es un algoritmo que descompone (para cada pixel) la serie temporal de IVDN en varias componentes sencillas y comprensibles: el índice verde medio y , la amplitud y la fase para diferentes períodos o frecuencias (parámetros de Fourier). El IVDN medio es un solo valor para toda la serie de observaciones. Cada amplitud y fase están asociadas a un cierto período, por ejemplo 9;

4,5; 3 años; 12; 6 meses, etc. La amplitud representa la medida de la máxima variabilidad del IVDN para el período y la fase es el tiempo transcurrido entre el inicio de la serie y el momento en que se produce la máxima variabilidad. En regiones con un ciclo vegetativo anual los parámetros más representativos de la serie son: el IVDN medio y la amplitud y fase a 1 año.

Los Parámetros de Fourier permiten comprender el efecto de la lluvia y la temperatura sobre la vegetación (Azzali y Menenti, 2000) y la estacionalidad foliar (Fuller y Prince, 1996) así como explicar cuantitativamente las diferencias fenológicas debido a sequía o exceso de precipitaciones (González Loyarte y Menenti, 2008). Roerink *et al.* (2003) concluyeron que el IVDN medio y la amplitud a un año son indicadores sensibles a la variabilidad climática en Europa; para el NE de Brasil Liu y Negrón Juárez (2001) determinaron que el IVDN medio concuerda con los regímenes de precipitaciones y los tipos de clima y que la fase permite el estudio de la distribución espacial y estacional de las lluvias (Negrón Juárez y Liu, 2001).

Los parámetros de Fourier también fueron aplicados para estudiar en qué medida podían expresar las condiciones climáticas de áreas extensas con escasos registros meteorológicos. Así González Loyarte *et al.* (2008) probaron un modelo de regresión lineal múltiple para la llanura oriental de Mendoza (travesías) donde los parámetros de Fourier (IVDN medio, y amplitud y fase a un año) lograron explicar el 92% de la variabilidad del índice de aridez P/ETP (donde P es la precipitación media anual y ETP la evapotranspiración potencial estimada como $ETP = 68,64 t$, siendo t la temperatura media anual en grados Celsius (Le Houérou, 1989). Las condiciones regionales de homogeneidad geomorfológica y de vegetación natural de la llanura posibilita captar, mediante las diferencias fenológicas de la cubierta vegetal (expresadas por los parámetros de Fourier) diferencias climáticas. Conocer la influencia de la heterogeneidad geomorfológica y de formaciones vegetales en los parámetros de Fourier como expresión climática de la vegetación ayudaría a extender y optimizar los datos climáticos puntuales y, con frecuencia dispares, de las estaciones meteorológicas. Por esta razón, en este trabajo se plantea la búsqueda de un modelo probabilístico donde se asocie los parámetros de Fourier con el índice de aridez P/ETP cubriendo las diversas condiciones ecológicas de la provincia de Mendoza. Como resultado se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple con los parámetros IVDN medio, amplitud a 3 y 1 año que explicaron el 79,7% de la variación espacial del índice de aridez. A partir de la imagen de aridez generada se zonificó la provincia en las clases: hiperárida, subdesértica, árida, semiárida, subhúmeda y húmeda.

Material y método

Imágenes digitales

El material utilizado es una serie de 108 imágenes mensuales NOAA-AVHRR NDVI GAC que abarcan de julio 1982 a junio de 1991. A las imágenes se les aplicó una máscara para recortar la provincia de Mendoza. Se aplicó a la serie la Transformada

Rápida de Fourier y se obtuvieron como resultado de la descomposición de la serie 108 imágenes nuevas: la imagen de IVDN medio e imágenes de amplitud (54) y de fase (53) para diferentes períodos, p.ej: 9; 4,5; 3; 2; 1,5; 1 años y de 6, 4, 3, 2 meses. Se pre-seleccionaron las amplitudes de los períodos 9, 3 y 1 año que explicaron en conjunto al menos el 80% de la variación de la varianza de la amplitud total. Así las variables (parámetros de Fourier) pre-seleccionadas para explicar las variaciones del índice de aridez P/ETP fueron: IVDN medio, amplitud a 9, 3 y 1 año y fase a 1 año. Se extrajeron los valores de estas variables (imágenes) en las mismas coordenadas geográficas donde se localizan las estaciones meteorológicas.

Datos climáticos

Se recopilaron las series más largas de precipitación y temperatura anuales a partir de diversas fuentes: Programa Regional de Meteorología del CCT Mendoza-CONICET (PRM), Servicio Meteorológico Nacional (S.M.N), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y Departamento General de Irrigación (D.G.I.). Se obtuvieron los promedios anuales de precipitación y temperatura y se calculó el índice de aridez P/ETP a partir de la ecuación empírica ajustada por Le Houérou (1989).

Modelo probabilístico

La tabla de variables se armó con los valores puntuales, para las mismas coordenadas de las estaciones meteorológicas, de los parámetros de Fourier pre-seleccionados y el índice P/ETP de las estaciones meteorológicas. Se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple con los parámetros de Fourier pre-seleccionados como variables predictivas y el índice de aridez P/ETP como variable predicha. Se seleccionaron las variables significativas mediante un procedimiento *step wise*. Con estas variables se ajustó el modelo definitivo de regresión.

El modelo de regresión fue estudiado bajo la hipótesis nula,

H_0 : la regresión lineal no es diferente a una constante, es decir cuando las variables independientes (predictivas) varían, la variable predicha (P/ETP) no varía o varía no linealmente,

versus la hipótesis alternativa,

H_1 : el modelo es lineal.

Generación de la imagen y del mapa de aridez

Se aplicó (pixel a pixel) el modelo de regresión obtenido al conjunto de las imágenes seleccionadas como variables significativas y se obtuvo la imagen del índice de aridez

estimado. A la imagen de índice de aridez obtenida, con valores continuos, se aplicó una recodificación para establecer un mapa con clases de aridez. Para la identificación de las clases de P/ETP se siguió básicamente el criterio determinado por Le Houérou (1995, 1999) para Argentina considerando las clases hiperárida (P/ETP < 0,06), subdesértica (0,06-0,15), árida (0,16-0,33), semiárida (0,34-0,50), subhúmeda (0,51-0,75) y húmeda ($e^{0,76}$). Se obtuvo así un mapa de aridez.

Resultados

Las variables seleccionadas como estadísticamente significativas para la regresión lineal múltiple resultaron: IVDN medio, amplitud a 3 y 1 año. Durante el procedimiento *step wise* fueron eliminadas las variables amplitud a 9 años y fase a 1 año por ser no significativas. El modelo de regresión multilínea ajustado a los datos observados produjo buenos resultados. El error residual estandar fue de 0,1388 para 36 grados de libertad (gl), con un R² múltiple de 0,8121 y un R² ajustado de 0,797. El valor del estadístico F con 3 y 36 gl para el test de bondad del ajuste alcanzó el valor 52,04 con un p-valor asociado de $3,593 \times 10^{-13}$ (< 0,05). Con este resultado rechazamos la hipótesis nula y aceptamos un buen ajuste de los datos a un modelo de lineal múltiple. El modelo ajustado es:

$$P/ETP \text{ estimado} = -2.010325 + 0.016169 * NDVI - 0.054269 * \text{Amplitud}3 + 0.029396 * \text{Amplitud}1$$

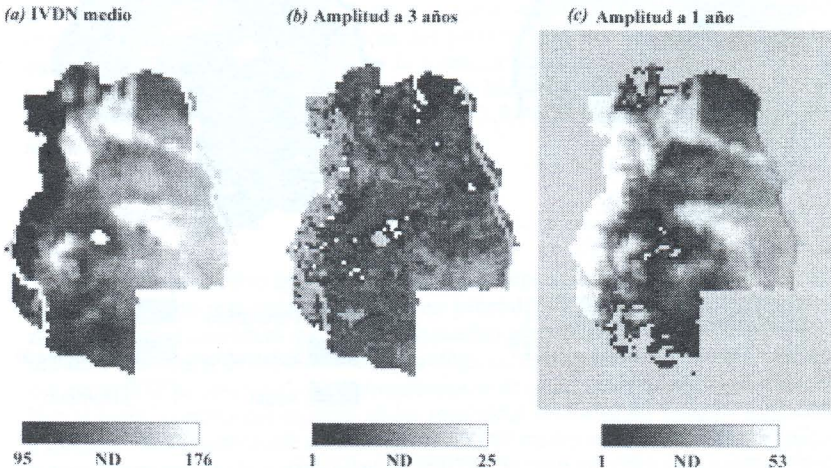


Figura 1. Imágenes de los parámetros de Fourier seleccionados para el modelo de regresión multilínea. Imágenes expresadas en números digitales (ND), a mayor número digital más alto es el valor de la variable y más brillante su gris: (a) IVDN medio, (b) Amplitud a 3 años, (c) Amplitud a 1 año.

La regresión aplicada a la totalidad de las imágenes seleccionadas (Figura 1) permitió predecir, a través de las variaciones espaciales del IVDN medio y de la amplitud a 3 y 1 año (variables independientes), el índice de aridez P/ETP (variable dependiente) en toda la provincia de Mendoza (Figura 2(a)). El modelo de regresión lineal múltiple ajustado explicó el 79,7% de la variación media estimada del índice de aridez mediante los parámetros de Fourier seleccionados. Los resultados del modelo probabilístico muestran que se ha optimizado la distribución espacial de los datos climáticos ya que éste ha permitido generar una imagen de índice de aridez (Figura 2(a)) basada en la fenología foliar de la vegetación de toda la provincia de Mendoza.

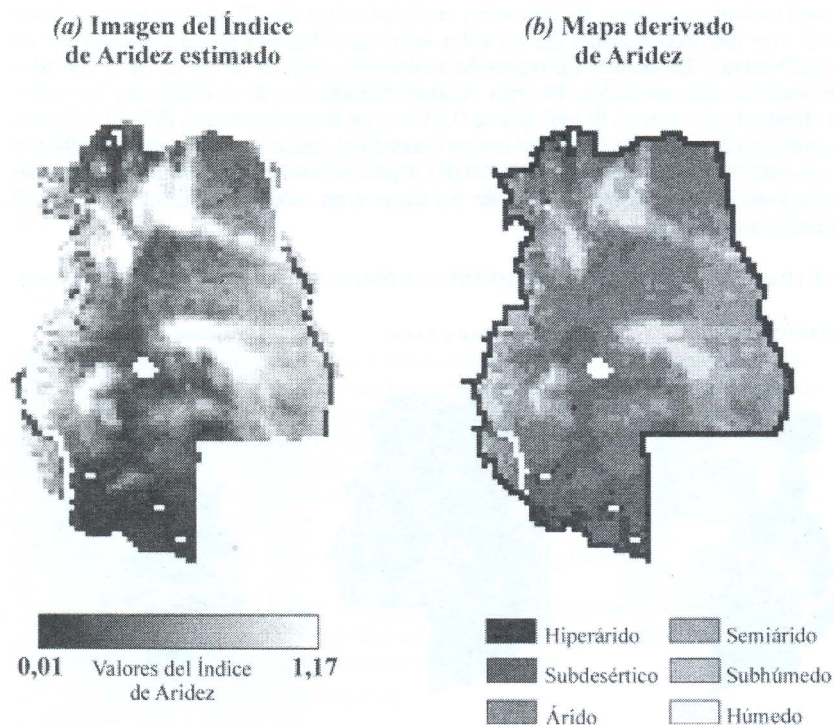


Figura 2: Imágenes resultantes de aplicar el modelo predictivo a toda la imagen.

(a) Imagen del Índice de Aridez generada.

(b) Mapa de aridez resultante de la recodificación de la imagen (a).

Discusión

La aplicación del modelo explicó el 79,7% de la variabilidad del índice de aridez P/ETP. La unidad geomorfológica que no fue bien representada es la Cordillera Principal debido a que la cubierta de nieve determina valores muy bajos de IVDN que artificialmente crean amplitudes que no concuerdan con la baja o nula cobertura vegetal.

La distribución espacial de las diferentes clases de aridez es en general consistente con el mapa climático de Norte (2000). La clase húmeda es una clase edáfica y no climática debido al riego en los oasis (Figura 2 (b)). La clase subhúmeda está por un lado rodeando los oasis y por otro en zonas con mayor humedad en el frente cordillerano, aquí sí por razones climáticas.

La llanura sureste de Mendoza se manifiesta como semiárida en consonancia con el ingreso de la isohieta de 400 mm. La clase árida se manifiesta como una diagonal N-S. La zona que muestra mayor aridez (subdesértico) según este modelo es el sur de Mendoza, en la Región de Payunia.

Es interesante destacar que la clase hiperárida, a pesar de estar fuera del rango de los valores correlacionados en el modelo predictivo (ninguna de las estaciones meteorológicas analizadas presentó un índice $P/ETP < 0,06$), aparece al aplicar la regresión a toda la imagen. El modelo estima dos pequeñas zonas hiperáridas en el valle de Uspallata y La Payunia. El valle de Uspallata es parte del denominado desierto de sombra con clima hiperárido (Le Houérou *et al.*, 2006) confirmando la clase hiperárida de la imagen de aridez estimada. Se observa que a pesar de su escala regional aparecen pequeñas zonas como las mencionadas que parecen ajustarse a una realidad climática que no podemos confirmar debido a la ausencia de estaciones meteorológicas. Los porcentajes de la superficie de la Provincia de Mendoza estimada para cada clase de aridez son: hiperárida (2,2), subdesértica (13,0), árida (36,1), semiárida (19,9), subhúmeda (12,3) y húmeda (6,4).

Conclusiones

El modelo predictivo aplicado, que utilizó la vegetación como expresión climática regional, ha dado resultados coherentes en general y ha permitido detectar pequeñas zonas con clases climáticas que, si bien no pueden ser confirmadas por datos climáticos debido a la ausencia de estaciones meteorológicas, se muestran consistentes. Mediante este modelo se ha optimizado los datos climáticos de estaciones meteorológicas disponibles al lograr continuidad espacial en los resultados mediante las imágenes generadas a través de la Transformada de Fourier. El IVDN medio es la variable que explica el mayor porcentaje de la variabilidad de P/ETP. Si bien en sitios con vegetación con un ciclo por año, la amplitud a un año resulta dominante no deben descartarse a priori las amplitudes para períodos superiores a un año particularmente en regiones áridas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a María Cecilia Scoones por las cuidadosas figuras.

Referencias

- Anyamba, A.; Tucker, C.J. (2005). Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003. *Journal of Arid Environments* 63, 596-614.
- Azzali S.; Menenti, M. (Ed.). (1996). *Fourier analysis of temporal NDVI in the Southern African and American continents*. Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, Report 108: Wageningen, The Netherlands. 1-149.
- Azzali, S.; Menenti, M. (2000). Mapping vegetation-soil-climate complexes in southern Africa using temporal Fourier analysis of NOAA-AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 21, 973-996.
- Barbosa, H.A.; Huete, A.R.; Baethgen, W.E. (2006). A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. *Journal of Arid Environment* 67, 288-307.
- Fuller, D.O.; Prince, S.D. (1996). Regional-scale foliar phenology in tropical Southern Africa: An application of the Fast Fourier Transform to time series of satellite imagery. In *Fourier analysis of temporal NDVI in the Southern African and American continents*, S. Azzali S, Menenti M (Eds.). Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, Report 108: Wageningen, The Netherlands; 113-132.
- González Loyarte, M.M.; Menenti, M. (2008). Impact of rainfall anomalies on Fourier parameters of NDVI time series of northwestern Argentina. *International Journal of Remote Sensing* 29, no 4, 1125 - 1152.
- González Loyarte, M.M.; Menenti, M.; Diblasi, A.M. (2008). Modelling bioclimate by means of Fourier analysis of NOAA-AVHRR NDVI time series in Western Argentina. *International Journal of Climatology* 28, 1175-1188.
- Henricksen, B.L.; Durkin, J.W. (1986). Growing period and drought early warning in Africa using satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 7, 1583-1608.
- Hielkema, J.U.; Prince, S.D.; Astle, W.L. (1986). Rainfall and vegetation monitoring in the Savanna Zone of the Democratic Republic of Sudan using the NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer. *International Journal of Remote Sensing* 7, 1499-1513.
- Justice, C.O.; Townshend, J.R.G.; Holben, B.N.; Tucker, C.J. (1985). Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. Reprint from *International Journal of Remote Sensing* 6, 1271-1318.

- Le Houérou, H.N. (1989). Classification éoclimatique des zones arides (s.l.) de l'Afrique du Nord. *Ecologia Mediterranea* 15, 95-144.
- Le Houérou, H.N. (1995). *Climate change drought and desertification*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Working Group II Adaptation and Mitigation; 1-53.
- Le Houérou, H.N. (1999). *Estudios e investigaciones ecológicas de las zonas áridas y semiáridas de Argentina*. Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas: Mendoza, Argentina; 1-228.
- Le Houérou, H.N.; Martínez Carretero, E.; Guevara, J.C.; Berra, A.B.; Estevez, O.R.; Stasi, C.R. (2006). The true desert of the Central-West Argentina. Bioclimatology, geomorphology and vegetation. *Mulitequina* 15, 1 -15.
- Liu, W.T.; Negrón Juárez, R.I. (2001). ENSO drought onset prediction in northeast Brazil using NDVI. *International Journal of Remote Sensing* 22, 3483-3501.
- Malo, A.R.; Nicholson, S.E. (1990). A study of rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using normalized difference vegetation index. *Journal of Arid Environments* 19, 1-24.
- Menenti, M.; Azzali, S.; Verhoef, W.; Van Swol, R. (1993). Mapping agroecological zones and time lag in vegetation growth by means of Fourier analysis of time series of NDVI images. *Advances in Space Research* 13, 233-237.
- Negrón Juárez, R.I.; Liu, W.T. (2001). FFT analysis on NDVI annual cycle and climatic regionality in Northeast Brazil. *International Journal of Climatology* 21, 1803-1820.
- Norte, F. (2000). Mapa climático de Mendoza. In Abraham EM, Rodríguez Martínez F. (Ed.). *Argentina. Recursos y Problemas Ambientales de la Zona árida. Primera Parte. Provincias de Mendoza, San Juan y La Rioja*. PAN/SDSyPA-INTA-GTZ, IADIZA, U. de GRANADA: Mendoza, Argentina; I-II, 25-27.
- Poveda, G.; Salazar, L.F. (2004). Annual and interannual (ENSO) variability of spatial scaling properties of a vegetation index (NDVI) in Amazonia. *Remote Sensing of Environment* 93, 391-401.
- Roerink, G.J.; Menenti, M.; Soepboer, W.; Su, Z.W. (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.
- Seiler, R.A.; Kogan, F. (2002). Monitoring ENSO cycles and their impacts on crops in Argentina from NOAA-AVHRR satellite data. *Advances in Space Research* 30, 2489-2493.
- Townshend, J.R.G.; Justice, C.O. (1986). Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing* 7, no 11, 1435-1445.
- Tucker, C.J.; Justice, C.O.; Prince, S.D. (1986). Monitoring the grasslands of the Sahel 1984-1985. *International Journal of Remote Sensing*, 7, no 11, 1571-1581.