

Dinámica estacional e interanual del NDVI en bosques nativos de zonas áridas argentinas

Seasonal and interannual dynamics of NDVI in arid forest of Argentina

M. R. Iglesias^{1,2}, A. Barchuk¹ y M. Grilli³
charo@agro.unc.edu.ar

¹ Becaria CONICET

² Facultad de Ciencias Agropecuarias. Cátedra de Ecología Agrícola.
Universidad Nacional de Córdoba. Avda. Valparaíso, s/n. 5000 Córdoba. Argentina

³ Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales.
Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba.
Avda. Valparaíso, s/n. 5000 Córdoba. Argentina

Recibido el 10 de marzo de 2010, aceptado el 24 de agosto de 2010

RESUMEN

Dinámica estacional e interanual del NDVI en bosques nativos de zonas áridas de Argentina. Se analizó la dinámica estacional e interanual de la actividad fotosintética de la vegetación original y su relación con las lluvias, en tres Reservas Naturales con diferentes regímenes hídricos. Se empleó el Índice Verde Normalizado (NDVI-*Normalized Difference Vegetation Index*) de imágenes de cada diez días del satélite SPOT V en un período de cinco años (1998-2003). La relación entre el NDVI y las lluvias se realizó por medio de correlaciones cruzadas. El análisis de las variaciones interanual y estacional del NDVI, permitió obtener valores de referencia del patrón de crecimiento vegetal en cada Reserva. Las variaciones del NDVI en el tiempo de las tres áreas protegidas evidencian el comportamiento estacional de la vegetación. Los valores de los atributos del NDVI son mayores en la Reserva más húmeda. Por otro lado, el análisis de correlaciones cruzadas comprueba que existe una correlación entre los valores de precipitaciones y el NDVI y en general, esta es mayor cuando se lo relaciona con un mes de retraso de la respuesta de la vegetación con respecto a las lluvias ocurridas.

PALABRAS CLAVE: Índice de Verde Normalizado (NDVI), correlaciones cruzadas, precipitaciones, bosques xerofíticos, Chaco Árido, Provincia fitogeográfica de Monte.

ABSTRACT

Seasonal and interannual dynamics of NDVI in dry forests of Argentina. The seasonal and interannual dynamics of the photosynthetic activity of the original vegetation and the relationship with the rainfall in three Forest Reserves were analyzed. It was used the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of the first 10-days image of SPOT V satellite along five years (1998-2003). For the study of the relationship between NDVI and rainfall, cross correlation was applied. The analysis of interannual and seasonal variations of NDVI shows reference values of patterns of plants growth in each Reserve. The NDVI variations over time in the three protected areas show the seasonal dynamic of native vegetation. The values of the NDVI's attributes are bigger in the wetter Reserve. Furthermore, cross correlation analysis shows that there is a correlation between the values of rainfall and NDVI, and this is bigger when it is related to one month of the response of NDVI from the rainfall occurring.

KEY WORDS: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), cross correlation, rainfall, xerofitic forest, Monte, Arid Chaco.

INTRODUCCION

En las últimas décadas se ha incrementado el interés por entender la interacción entre la vegetación y el clima, en especial, su relación con el cambio climático global y la desertificación (Hall *et al.*, 1991). Estos fenómenos modifican los patrones espaciales y temporales de la vegetación, la estructura (distribución espacial y de la biomasa), así como la dinámica y funcionamiento de los ecosistemas (flujo de energía, reciclaje de nutrientes, interacciones entre las especies y sucesión). Las regiones áridas se caracterizan por presentar procesos ecosistémicos de lenta dinámica y alta variabilidad espacio-temporal. Para estudiar dicha variabilidad espacial y temporal del funcionamiento de la vegetación son apropiadas las series temporales de imágenes satelitales (Paruelo *et al.*, 1998) y sus relaciones con variables climáticas (Chacon, 1999; Ballester, 2000; Duro *et al.*, 2007). Por otra parte, cada vez es más frecuente el uso de indicadores y situaciones de referencia como áreas protegidas o poco perturbadas, para estudiar las consecuencias de la desertificación (Paruelo *et al.*, 1998; Sebege *et al.*, 2002; Reynolds *et al.*, 2005; Reeves *et al.*, 2006; Verón *et al.*, 2006) y del cambio climático (Illera *et al.*, 1998; Hughes *et al.*, 2002; Cabello *et al.*, 2008; Alcaráz Segura *et al.*, 2008).

Diversos autores demostraron que la variación temporal de las precipitaciones controla la productividad primaria neta aérea (PPNA) en los sistemas áridos y semiáridos (Younis *et al.*, 1999; Jobbágy *et al.*, 2002). Estos sistemas se caracterizan por la elevada aleatoriedad espacio-temporal de las lluvias y el corto tiempo de disponibilidad de agua en el suelo como recurso para las plantas (Noy-Meir, 1973; Wiegand y Jeltsch, 2000). Se ha descrito la relación vegetación-precipitaciones como lineal, basada en el supuesto que la productividad primaria neta es función de la humedad disponible (Sebege *et al.*, 2002).

El Índice de Vegetación (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI) permite observar el nivel de desarrollo de la vegetación en las diferentes regiones y sintetiza el resultado de la dinámica del funcionamiento y los patrones debidos a factores físicos, bióticos y disturbios (Paruelo *et al.*, 1998; Gurgel *et al.*, 2003). Este índice relaciona la fracción de radiación

fotosintéticamente activa (fPAR) y la productividad primaria neta aérea (PPNA) (Jobbágy *et al.*, 2002). La principal ventaja del NDVI es su fácil interpretación, ya que sus valores varían entre -1 y $+1$, permitiendo conocer el estado de vigor vegetal de grandes superficies, detectando fenómenos de amplio rango de variación (Chuvieco *et al.*, 2002; Alcaráz Segura, 2006; Quevedo *et al.*, 2007). En regiones que exhiben una estacionalidad definida en las precipitaciones, la dinámica del NDVI se visualiza como ondas que acompañan de manera estrecha la variación interanual del crecimiento de la vegetación (Hill y Donald, 2003). Particularmente los bosques de zonas áridas de Argentina, presentan ventajas sobre los bosques tropicales en cuanto al uso de la teledetección, ya que es factible obtener imágenes libres de nubes y además de caracterizar ciclos fonológicos más marcados (Gasparri *et al.*, 2007, 2010).

Si bien, la relación entre la precipitación y el NDVI fue ampliamente investigado en distintos ecosistemas áridos y semiáridos (Paruelo y Lauenroth, 1998; Jobbágy *et al.*, 2002; Schmidt y Karnieli, 2002; Al-Bakri y Taylor, 2002; Rojas *et al.*, 2003; McR. Holm *et al.*, 2003; Scalón *et al.*, 2005; De la Casa y Ovando, 2006) y particularmente en áreas protegidas (Alcaráz Segura *et al.*, 2008), no se conocen estudios realizados en Reservas Naturales argentinas en la región árida con régimen monzónico. El objetivo de este estudio fue caracterizar la dinámica espacio-temporal del NDVI como indicadora del funcionamiento de la vegetación de tres Reservas Naturales ubicadas en la provincia fitogeográfica de Monte y la región del Chaco Árido y relacionar aquella dinámica con el patrón de ocurrencia de las lluvias.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo en tres Reservas Naturales con diferencias en el régimen hídrico, ubicadas en la región central-occidental de Argentina. Dichas Reservas constituyen áreas poco perturbadas, por lo que se las considera indicadoras de las limitaciones naturales propias del ambiente físico. La Reserva Natural Bosques de

Telteca de 38.507 ha se ubica en el NE de la Provincia de Mendoza, departamento de Lavalle (68° 01'30" O y 32° 23'27" S). La Reserva Natural Quebracho de la Legua con una superficie de 2243 ha., se ubica al NO de la provincia de San Luis (32° 21' S y 66° 55' O). Finalmente, la Reserva Natural Chancaní (31° 22' S y 65° 29' W) de 4.920 ha, al oeste de las sierras de Pocho, en las Planicies Occidentales en la provincia de Córdoba. La localización y características de cada Reserva se describen en la Figura 1 y en la Tabla 1.

Análisis de la dinámica del NDVI

Se realizó la caracterización de la heterogeneidad funcional de las tres Reservas en base a la construcción de series completas de 60 imágenes de NDVI derivadas del sensor VEGETATION del satélite SPOT, en el período julio de 1998-junio de 2003, correspondiente a los primeros diez días de cada mes. Las imágenes fueron procesadas por el centro de distribución de las imágenes SPOT (VITO) de Bélgica. Este sensor ofrece imágenes gratuitas corregidas con resolución espacial de 1 × 1 km (detalles del pro-

grama en www.vgt.vito.be) y temporal de 10 días que resume el mejor valor tomado en ese período, por lo que se descarta problemas de nubosidad y errores del satélite. Las imágenes se procesaron con el programa Idrisi Andes (Eastman, 2006).

Los datos de precipitación mensual de los períodos anuales correspondientes a julio de 1998 hasta junio del 2003, se obtuvieron de distintas fuentes. En el caso de la Reserva Chancaní, los datos provienen de registros diarios de la estación pluviométrica ubicada en un sitio abierto sin cobertura leñosa. Por otro lado, la falta de datos de una serie continua y del período de interés en las Reservas de Telteca y Quebracho de la Legua, condujo a la utilización de datos del registros históricos del Servicio Meteorológico Nacional de sitios distantes a menos de 60 km de los sitios de interés.

Para evaluar las series temporales de índices de vegetación NDVI se realizaron los siguientes pasos: (1) Extracción de los valores de los índices de vegetación (NDVI) mediante perfiles, a partir del módulo *profile* de Idrisi, sobre 14 píxeles ubicados en el área central de cada Reserva Natural. Estos valores fueron promediados a

| Reserva Natural | Telteca | Q. de la Legua | Chancaní |
|--|---|---|--|
| Provincia fitogeográfica | Monte | Chaco (región del Chaco Árido) | Chaco (región del Chaco Árido) |
| Clima (Torres Guevara, 2007) | Árido hiperárido | Árido | Árido-semiárido |
| Precipitación media anual | 150 mm (Estrella <i>et al.</i> , 1979) | 310 mm (promedio década del 80 según el Sistema Meteorológico Nacional) | 512 (promedio de 1973-2003, registros internos) |
| Temperatura media anual | 13-15,5°C | 18°C | 20°C |
| Descripción de las comunidades | Estepa de arbustos perennifolios, estepa halófila y bosques dominados por <i>Prosopis flexuosa</i> (Villagra <i>et al.</i> , 2004; Barros <i>et al.</i> , 2006, Álvarez <i>et al.</i> , 2006) | Bosque xerofítico de <i>Aspidosperma quebracho-blanco</i> y matorrales (Del Vitto <i>et al.</i> , 1994) | Bosque xerofítico de <i>Aspidosperma quebracho-blanco</i> y matorrales (Carranza <i>et al.</i> , 1992) |
| Porcentaje promedio de cobertura de la vegetación (Iglesias, 2010) | 40 % | 65% | 68% |

Tabla 1. Características resumen de las tres Reservas Naturales.

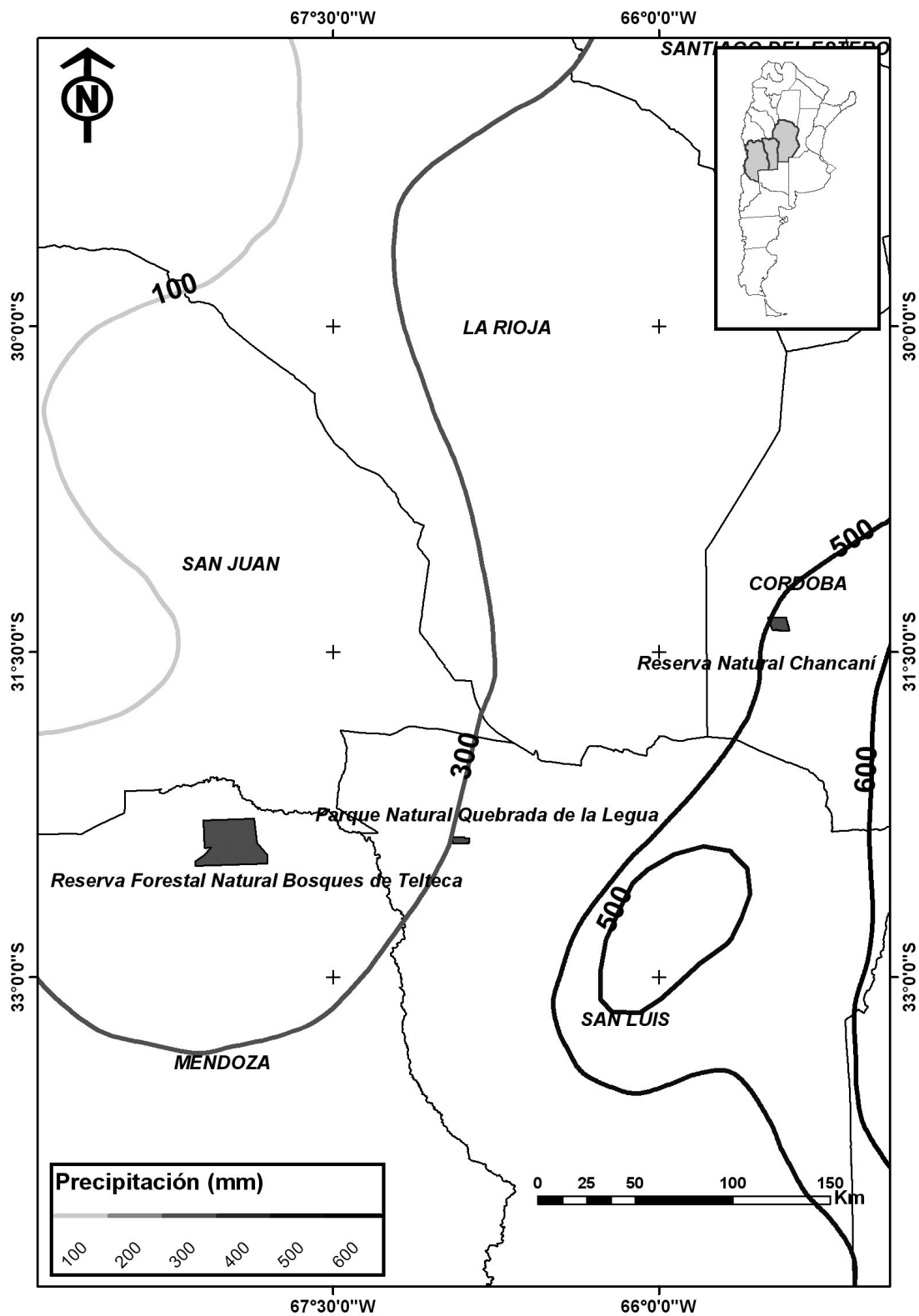


Figura 1. Ubicación de las tres Reserva Naturales situadas en la región centro-occidental de Argentina. Mapa de isohietas basado en valores medios del Servicio Meteorológico Nacional. De oeste a este: Reserva Natural Bosques de Telfeca; Reserva Natural Quebracho de la Legua y Reserva Natural Chancaní.

fin de obtener un único valor mensual que resume el estado de vigor de la vegetación y la heterogeneidad local de cada área de estudio, en el mes considerado. (2) Filtrado estacional de los datos de NDVI. Al igual que las mayoría de las variables de series de tiempo, la serie de NDVI se encuentran autocorrelacionada, por lo que se modifica la serie a partir de la aplicación de un filtro estacional anual (12 meses), mediante el algoritmo de promedios móviles (InfoStat, 2007, 2008). (3) Determinación del grado de dependencia lineal existente entre las variables precipitaciones y el NDVI mediante la estimación de correlaciones cruzadas, con distintos períodos de retraso (lags), medido en meses. Conceptualmente, la función de correlación cruzada es análoga a la función de autocorrelación, donde las correlaciones no son obtenidas entre observaciones de una misma serie, sino entre dos series diferentes, en este caso precipitación y NDVI. El retraso (lag k), mide la magnitud de la correlación lineal entre los valores de dos series de tiempo, las precipitaciones y los valores del NDVI, donde k es la cantidad de periodos desplazados hacia delante. La confiabilidad de estas estimaciones se determinó con una prueba estadística «F» de Fisher con un nivel de significancia global de 0,05%. Se aplicó dicha prueba a las series temporales de precipitaciones y NDVI de 60 meses (cinco años) y se ilustró mediante gráfico de líneas (InfoStat, 2007, 2008). Dicho análisis se realizó tanto para las serie crudas de NDVI y como para aquellas con filtro estacional.

Para cada periodo anual de la serie temporal (julio-junio de cada año) de valores medios del NDVI se calcularon los siguientes atributos de la curva estacional (régimen monzónico): a) la sumatoria anual (Σ -NDVI); b) los valores máximos y mínimos (NDVI-máx. y NDVI-min.); c) los valores promedio (NDVI media); d) la amplitud máxima (A-máx.). Estos atributos resumen la mayor parte de la variabilidad temporal de la dinámica del NDVI de un área (Paruelo *et al.*, 2005). La sumatoria anual (Σ -NDVI) se calculó adicionando los valores medios mensuales del índice calculado previamente para cada período considerado. Esta sumatoria del NDVI, brinda aspectos del funcionamiento ecosistémico anual del territorio y se considera un buen estimador de la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por el dosel (Paruelo

et al., 2005). Por otro lado, los valores máximos y mínimos (NDVI-máx. y NDVI-min) corresponden a los valores extremos encontrados en el año hidrológico considerado. El NDVI-media, indica el valor promedio del funcionamiento del ecosistema en el periodo estudiado. Finalmente, la amplitud máxima (A-máx.) responde a la diferencia entre los valores máximos y mínimos de NDVI registrados durante un período de tiempo determinado (año hidrológico).

RESULTADOS

Caracterización de la dinámica de la vegetación de las Reservas Naturales

En los tres sitios de estudio, las ondas de NDVI evidenciaron una marcada estacionalidad para todos los años hidrológicos estudiados (Fig. 2). En líneas generales, los valores de NDVI indicaron una cobertura de vegetación activa durante todo el año (NDVI superior a 0,15) y como era de esperar, los valores más elevados y mayor amplitud de onda se observaron en la Reserva más húmeda. La variación estacional de las precipitaciones es pronunciada en los tres sitios, concentrándose más del 75% de las lluvias en la temporada primavera-verano (octubre a marzo). Dicha estacionalidad hídrica marcada, concuerdan con los valores mayores y crecientes del NDVI (Fig. 2).

En la Reserva Chancaní, los mayores valores de NDVI (NDVI media, Σ -NDVI e NDVI máx.) se observaron en el período más húmedo (año 1999-2000, Tabla 2), mientras que en Telteca y Quebracho de la Legua, si bien el periodo 1999-2000 fue particularmente húmedo con valores de precipitación notablemente superior a la media, los valores mayores de NDVI se evidenciaron al año siguiente. Por otro lado, los valores más bajos de NDVI medio y Σ -NDVI se observaron en las tres Reservas estudiadas en los año hidrológico 1998-1999 y 2002-2003.

En líneas generales, los valores máximos (NDVI-máx.) y mínimos (NDVI-min.) del NDVI fueron muy variables según los años analizados. Por un lado, en la Reserva de Chancaní fue frecuente encontrar valores máximos extremos (NDVI-máx.) al finalizar la estación estival (mes de abril), mientras que en Telteca y Quebracho de la Legua, el pico máximo de NDVI ocurri-

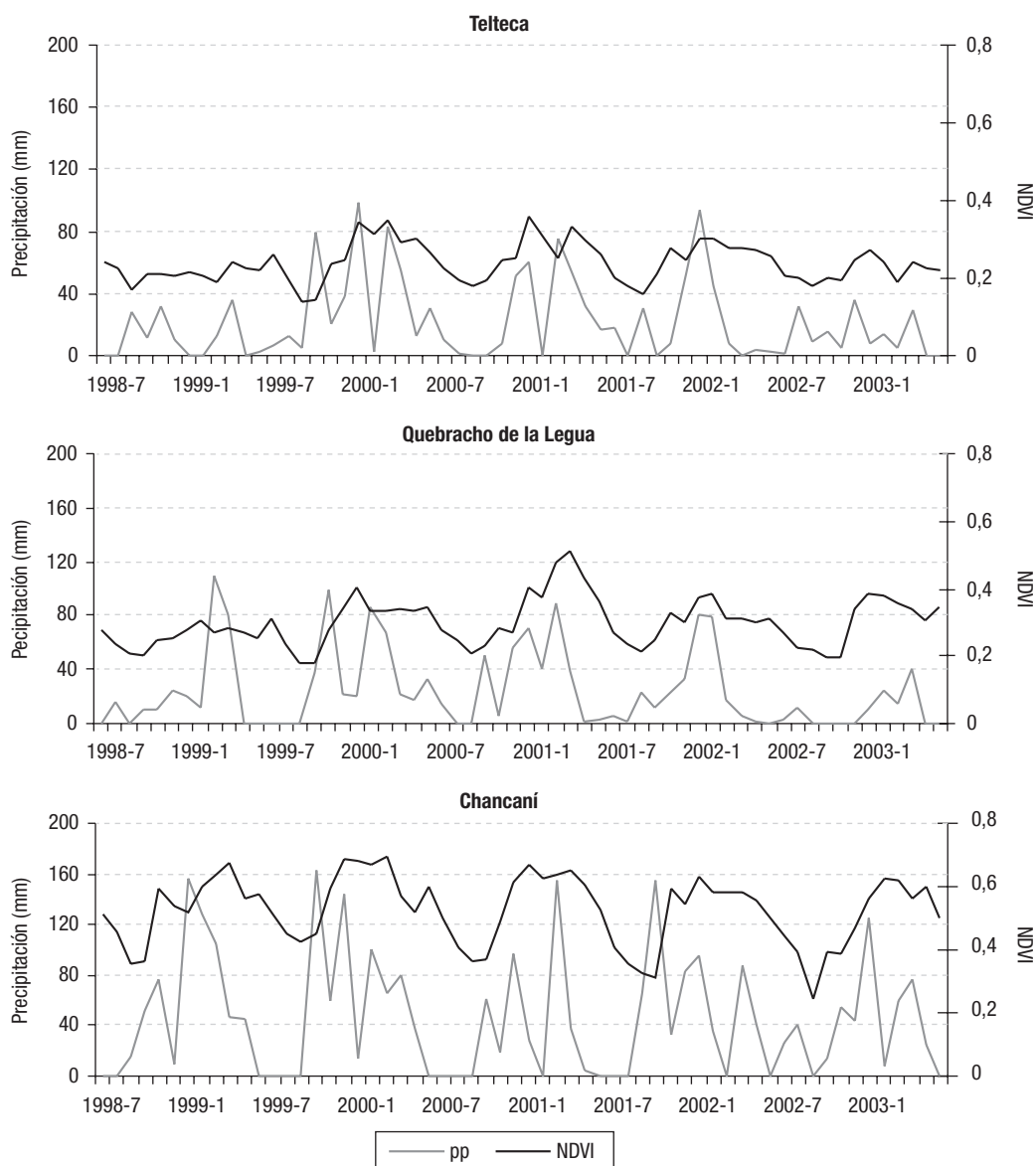


Figura 2. Variación estacional e interanual de las precipitaciones (mm) y NDVI para el período 1998-2003, en las Reservas Forestales Telteca, Quebracho de la Legua y Chancaní.

ron comúnmente en los meses de febrero-marzo. Por otro lado, en todos los sitios, los valores mínimos (NDVI-min) fueron usualmente alcanzados en el mes de septiembre, en concordancia con la finalización de la estación seca (Tabla 2).

Debido al estrés hídrico evidenciado en la vegetación, la amplitud del NDVI es en general menor en los años secos. Sin embargo se observa que no existe una reducción notable entre los valores de NDVI medios de los años secos (precipitación 20% menores a la media anual, Ej. Período 2002-2003 para Quebracho de la Legua y

Chancaní) en relación con los húmedos (años húmedos con precipitaciones 20% superiores a la media anual Ej, período 1999-2000).

Relación temporal del NDVI con las precipitaciones

En las tres Reservas, las correlaciones cruzadas entre la serie de precipitaciones mensuales y las series de NDVI (crudas y con filtro estacional) resultaron significativas ($p < 0,05$) y con

| | Año hidrológico | pp. Acum. | NDVI Media | Σ -NDVI | NDVI | | |
|-----------------------|-----------------|-----------|------------|----------------|------------|--------------|----------|
| | | | | | mín. | máx. | Amplitud |
| Telteca | 1998-1999 | 136 | 0,22 | 2,60 | 0,17 (sep) | 0,27 (jun) | 0,10 |
| | 1999-2000 | 419 | 0,25 | 3,03 | 0,14 (sep) | 0,35 (mar) | 0,21 |
| | 2000-2001 | 323 | 0,26 | 3,11 | 0,18 (sep) | 0,36 (ene) | 0,18 |
| | 2001-2002 | 276 | 0,25 | 2,96 | 0,16 (sep) | 0,3 (feb) | 0,14 |
| | 2002-2003 | 194 | 0,23 | 2,80 | 0,18 (sep) | 0,28 (mar) | 0,10 |
| Quebracho de la Legua | 1998-1999 | 346 | 0,26 | 3,12 | 0,20 (oct) | 0,30 (feb) | 0,10 |
| | 1999-2000 | 483 | 0,29 | 3,51 | 0,18 (oct) | 0,40 (ene) | 0,22 |
| | 2000-2001 | 387 | 0,33 | 4,06 | 0,21 (sep) | 0,51 (abril) | 0,30 |
| | 2001-2002 | 367 | 0,30 | 3,63 | 0,22 (sep) | 0,39 (feb) | 0,17 |
| | 2002-2003 | 101 | 0,29 | 3,52 | 0,2 (nov) | 0,39 (feb) | 0,19 |
| Chancaní | 1998-1999 | 636 | 0,54 | 6,59 | 0,37 (oct) | 0,67 (abr) | 0,30 |
| | 1999-2000 | 662 | 0,60 | 7,28 | 0,43 (sep) | 0,70 (dic) | 0,27 |
| | 2000-2001 | 401 | 0,57 | 6,89 | 0,38 (sep) | 0,70 (abr) | 0,32 |
| | 2001-2002 | 596 | 0,55 | 6,67 | 0,32 (sep) | 0,65 (ene) | 0,33 |
| | 2002-2003 | 473 | 0,53 | 6,38 | 0,41 (sep) | 0,62 (abr) | 0,21 |

Tabla 2. Atributos del Índice Verde Normalizado (NDVI) obtenido a partir de 60 imágenes satelitales (SPOT V) correspondientes al período 1998-2003 y a los territorios de las Reservas Telteca, Quebracho de la Legua y Chancaní. pp. Acum.: precipitación anual acumulada; NDVI media: valores promedio de NDVI; S-NDVI: NDVI acumulado anual; NDVI mín.: valores mínimos de NDVI; NDVI máx.: valores máximos de NDVI; Amplitud máx.: NDVI máx. - NDVI mín.

alto valores de coeficiente de correlación con un mes de atraso de la respuesta de la vegetación con respecto a la ocurrencia de las lluvias (Fig. 3). Se observa que al aplicar el filtro estacional en la serie de NDVI, los valores de correlación son en general más pequeños que con la serie cruda, aunque revela una correlación consistente entre las variables, mientras que en la correlación con la serie cruda, puede estar sobre o subestimando dicha relación.

En el caso de la serie cruda, también se observaron valores significativos ($p < 0,05$) y con alto valores de coeficiente de correlación con dos meses de retraso y en el caso de las Reservas del Chaco Árido (Quebracho de la Legua y Chancaní) y se detectaron además altos coeficientes a los 13 meses de retraso respecto a la respuesta del NDVI. En Telteca, además de los atrasos de 1 y 2 meses, se obtuvieron altos valores de coeficiente de correlación en el mismo mes de ocurrencia de las precipitaciones.

DISCUSIÓN

El análisis de las variaciones interanuales y estacionales del NDVI en las tres Reservas ana-

lizadas y su relación con las lluvias, permitió obtener valores de referencia del funcionamiento de estos ecosistemas en los diferentes bosques xerofíticos con diferencias en el régimen hídrico. La magnitud de los atributos que reflejan la dinámica del NDVI difirió en los distintos sitios de acuerdo a la disponibilidad de agua.

El comportamiento del NDVI a lo largo del tiempo sigue el patrón general unimodal descrito en la bibliografía para las regiones con estacionalidad hídrica marcada (Hill y Donald, 2003). La magnitud de los atributos analizados, responden directamente a la disponibilidad de agua. Las tendencias en el promedio anual de NDVI entre 1998 y 2003 en las tres áreas protegidas evidencian una estabilidad dentro de cada sitio, sin embargo, existe un cambio funcional importante entre los sitios. Se observaron cambios extensos en los atributos de NDVI, como la media y la amplitud de NDVI, a más del doble entre las Reservas Naturales de Telteca y Chancaní.

Es conocido que las regiones áridas-semiáridas funcionan robustamente acopladas a los sistemas hídrico-ecológicos con fuerte retroalimentación que ocurre desde escalas más finas a más gruesas (Noy-Meir, 1973; Wang *et al.*, 2007) donde el agua controla la productividad prima-

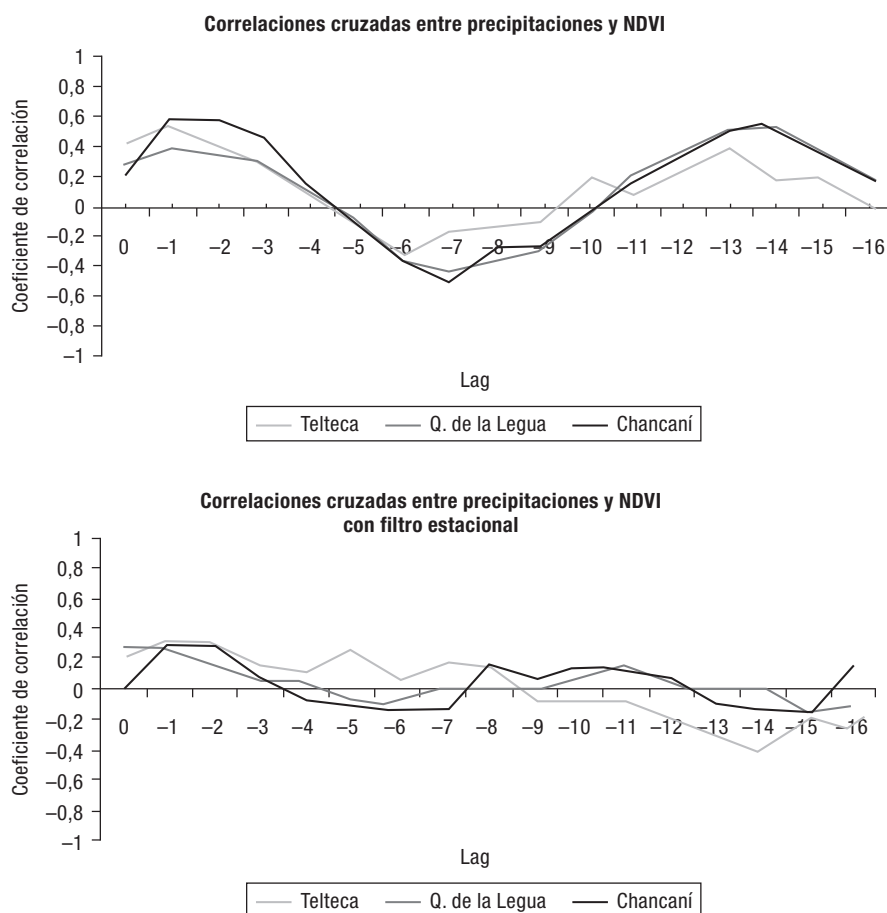


Figura 3. Correlaciones cruzadas de la respuesta del NDVI (crudas y con filtro estacional) con respecto a las precipitaciones en las tres Reservas. Lag: período de tiempo de retraso en meses. coef: coeficiente de correlación cruzada (R^2).

ria y, por ende, el potencial de acumulación de carbono (C) del sistema (Wiegand y Jeltsch, 2000). En estas comunidades leñosas, la diferencia en los valores de los atributos del NDVI de las formaciones boscosas con gran cobertura vegetal de la región del Chaco Árido hacia los bosques y estepas arbustivas abiertas propias del Monte, indican diferencias en la conservación de C en estos sitios (Iglesias, 2010). Por otro lado, la marcada estacionalidad detectada en los atributos del índice (valores máximos y mínimos, amplitud), refleja en parte los patrones fenológicos de dos tipos funcionales de plantas que coexisten en las regiones del Chaco Árido y del Monte: caducifolias y perennifolias (González Loyarte, 1992; Carranza *et al.*, 1992; Cabido *et al.*, 1993; Chebez, 2007). En un estudio previo (Iglesias, 2010) se determinó la abundancia relativa de las especies leñosas caducifolias en la

Reservas Telteca, Quebracho de la Legua y Chancaní, correspondiendo al 38%, 41% y 52%, respectivamente. El comportamiento del NDVI con valores máximos en plena temporada de lluvias, no permite la detección de estos grupos vegetales dominantes (perennifolias y caducifolias) sin embargo, los valores mínimos nos estaría indicando el estado de vigor sólo de la vegetación perennifolia esclerófila. Frente a esto, es de suponer que las diferencias en rangos de estacionalidad y a la amplitud entre máximo y mínimo estarían mayormente explicado por el grupo de caducifolias.

Los análisis de correlación cruzada confirmaron un retraso de la respuesta del índice verde con respecto a las precipitaciones, patrón también observado en regiones más húmedas (Gurgel *et al.*, 2003; Nagai *et al.*, 2005) y áridas mediterráneas (García-García, 2004; Parmiggiani

et al., 2006), tanto con series crudas como con filtro estacional (Adegoke y Carleton, 2002; Wang *et al.*, 2007). Este retraso estaría explicado en parte por el modelo de umbral-retraso que integra la idea de umbral de precipitación y retraso en la respuesta de la vegetación (Ogle y Reynolds, 2004). En la generalidad de los casos la estacionalidad y división de recursos (modelo de dos capas) y los eventos de precipitaciones de importancia biológica (modelo de pulso-reserva) fueron los argumentos para la comprensión de las respuestas de las plantas a las precipitaciones en zonas áridas. Ambos paradigmas tienen limitaciones significativas, al no tener en cuenta la plasticidad en los hábitos de enraizamiento de las plantas leñosas, el potencial retraso de la respuesta de las plantas a las lluvias, el umbral de precipitaciones y los eventos fenológicos de las plantas. Alternativamente, el modelo simple de «umbral-retraso» integra las ideas de umbral de precipitaciones, retraso de las plantas, reparto de recursos y las estrategias de los tipos funcionales de plantas. En este contexto se puede interpretar más adecuadamente la respuesta de las plantas leñosas a la variabilidad de las precipitaciones tanto estacionales, interanuales como espaciales en los tipos de vegetación de las tres Reservas de las regiones del Chaco Árido y Monte.

Fenológicamente, los árboles y arbustos caducifolios, reaccionan con las primeras precipitaciones de la estación lluviosa, provocando la aparición de las primeras hojas, mientras que la pérdida de hojas responde más lentamente a la disminución de las lluvias. Por otro lado, Huxman *et al.* (2004) en su estudio sobre los pulsos de precipitación y los flujos de C en regiones áridas y semiáridas, recalca el papel que desempeña el momento y la magnitud del pulso en el balance de C en los ecosistemas áridos. Los grandes pulsos (mayores a 5 mm), o una serie continua de pequeños pulsos, se infiltran en profundidad y aumentan la actividad fotosintética de las plantas. Estos autores resaltan que si bien las plantas con sistemas radiculares profundos, en general, experimentan menos estrés hídrico durante los períodos estacionales de sequía (meses donde las precipitaciones son nulas), por su capacidad de recurrir a reservas de agua subterráneas, también puede responder de manera más lenta y menos extensa a los pulsos de precipitación actual que

aquellas especies que presentan raíces superficiales. Por ejemplo en zonas áridas del hemisferio norte, *Prosopis glandulosa*, con raíces profundas, responde más lentamente a las precipitaciones que *Larrea tridentata* que presenta raíces más superficiales (Bassiri-Rad *et al.*, 1999, citado por Huxman *et al.*, 2004). Esta coexistencia de distintas estrategias foliares y radiculares explicaría los valores de vegetación activa de todo el año en las tres Reservas y el retraso de los picos de NDVI con respecto a los picos de acumulación de precipitaciones mensuales.

Además, el hecho que las correlaciones cruzadas con las series crudas con un año de retraso de la respuesta de la vegetación con respecto al NDVI presenten valores positivos de coeficientes de correlación, sugiere que posiblemente las condiciones hídricas de años anteriores que exceden la media anual (años húmedos con precipitaciones 20% superiores a la media anual) atenúan el efecto de estrés de la vegetación en años secos siguientes (precipitación 20% menores a la media anual), evidenciando en estos años valores de NDVI medios y Σ -NDVI similares a los presentados en años húmedos (Reynolds *et al.*, 2004). Para verificar este supuesto se deberá contar con una serie temporal mayor a la analizada en este trabajo.

REFERENCIAS

- ADEGOKE, J. O., & CARLETON, A. M. 2002. Relations between soil moisture and satellite vegetation indices in the U.S. Corn Belt. *American Meteorological Society*, 3: 395-405.
- AL-BAKRI, J. T., & TAYLOR, J. C. 2003. Application of NOAA AVHRR for monitoring vegetation conditions and biomass in Jordan. *Journal of Arid Environments*, 54: 579-593.
- ALCARAZ-SEGURA, D. 2006. Caracterización del funcionamiento de los ecosistemas ibéricos mediante teledetección. *Ecosistemas*, 2006/1.
- ALCARAZ-SEGURA, D., BALDI G., DURANTE, P., & GARBULSKY, M. F. 2008. Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Ecosistemas*, 17(3): 108-117.
- ÁLVAREZ, J. A., VILLAGRA, P. E., CONY, M. A., CESCO, E., & BONINSEGNA, J. A. 2006. Estructura y estado de conservación de los bosques de *Prosopis flexuosa* D.C. en el Noreste de Mendoza, Argentina. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79: 75-87.

- BALLESTER, J. Y. 2000. Serie Multi-Temporal NDVI 87m. Respuesta Espacio-Temporal de las Cubiertas en Castilla y León. *Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá*, 2000: 273-289.
- BARROS, V. 2006. El Cambio climático Global. 2ª edición. Ed. Libros del Zorzal, Buenos Aires, Argentina, 175 pp.
- CABELLO, J., ALCARAZ-SEGURA, D., ALTESOR, A., DELIBES, M., BAEZA, S., & LIRAS, E. 2008. Funcionamiento ecosistémico y evaluación de prioridades geográficas en conservación. *Ecosistemas*, 17(3): 53-63.
- CARRANZA, M. L., CABIDO, M. R., ACOSTA, A., & PÁEZ, S. A. 1992. Las comunidades vegetales del Parque Natural Provincial y Reserva Forestal Natural Chancaní, Provincia de Córdoba. *Lilloa*, 38: 75-92.
- CABIDO, M., GONZÁLEZ, C., ACOSTA, A., & DÍAZ, S. 1993. Vegetation changes along a precipitation gradient in Central Argentina. *Vegetatio* 109: 5-14.
- CHACÓN, E. 1999. Patrones fenológicos de vegetación de los Llanos del Orinoco, Venezuela, a través de análisis de series de tiempo de imágenes NOAA. Memorias del VII Conferencia Iberoamericana sobre Sistemas de Información Geográfica, Mérida, CD-ROM.
- CHEBEZ, J. C. 2007. Zona Centro: Guía de las Reservas Naturales De La Argentina. Plaza Edición. Buenos Aires, pp. 98-99.
- CHUVIECO, E., RIAÑO, D., AGUADO, I., & COCERO, D. 2002. Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of Landsat Thematic Mapper reflectance data: applications in fire danger assessment. *Int. J. Remote Sensing*, 23: 2145-2162.
- DE LA CASA, A., & OVANDO, G. 2006. Relación entre la precipitación e índices de vegetación durante el comienzo del ciclo anual de lluvias en la provincia de Córdoba, Argentina. *RIA*, 35(1): 67-85.
- DEL VITTO, L. A., PETENATTI, E. M., NELLAR, M. M., & PETENATTI, M. E. 1994. Las Áreas Naturales Protegidas de San Luis, Argentina. *Multequina*, 3: 141-156.
- DURO, D. C., COOPS, N. C., WULDER, M. A., & HAN, T. 2007. Development of a large area biodiversity monitoring system driven by remote sensing. *Progress in Physical Geography*, 31(3): 235-260.
- EASTMAN, J. R. 2006. Idrisi 15.0 The Andes Edition. Clark University-Worcester, MA.
- ESTRELLA, H. A., HERAS, V. A., & GUZZETA, V. A. 1979. Registro de elementos climáticos en áreas críticas de la provincia de Mendoza. Instituto Argentino de Investigaciones en Zonas Áridas (Argentina). *Cuaderno Técnico*, 1-79: 49-71.
- GARCÍA GARCÍA, M. 2004. Respuesta de la vegetación a variaciones climáticas en las praderas y sistemas adherados mediterráneos. Metodología de análisis utilizado utilizando datos hiperspectrales y multispectrales. *Ecosistemas*, 13(2): 103-107.
- GASPARRI, N. I., PARMUCHI, M. G., BONO, J., KARSZENBAUM, H., & MONTENEGRO, C. L. 2007. Utilidad de imágenes Landsat 7 ETM+ de diferentes fechas para la estimación de biomasa aérea en bosques subtropicales secos de Argentina. En XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. 19-21 de septiembre de 2007.
- GASPARRI, N. I., PARMUCHI, M. G., BONO, J., KARSZENBAUM, H., & MONTENEGRO, C. L. 2010. Assessing multi-temporal Landsat 7 ETM+ images for estimating above-ground biomass in subtropical dry forests of Argentina. *Journal of Arid Environments*, 74: 1262-1270.
- GONZÁLEZ LOYARTE, M. M. 1992. Reserva faunística y florística Telteca. Las Áreas Protegidas de la Provincia de Mendoza. Instituto Argentino de Investigaciones en Zonas Áridas (IADIZA), Mendoza, Argentina. 175 pp.
- GURGEL, H. C., FERREIRA, N. J., & LUIZ, A. J. B. 2003. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil, utilizando-se a análise de agrupamentos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(1): 85-90.
- HALL, F. G., BOTKIN, D. B., STREBEL, D. E., WOODS, K. D., & GOETZ, S. J. 1991. Large-scale patterns of forest succession as determined by remote sensing. *Ecology*, 72: 628-640.
- HILL, M. J., & DONALD, G. E. 2003. Estimating spatio-temporal patterns of agricultural productivity in fragmented landscapes using AVHRR NDVI time series. *Remote Sens. Environ.*, 84: 367-384.
- HUGHES, J. B., IVES, A. R., & NORBERG, J. 2002. Do species interactions buffer environmental variation (in theory)? En: Biodiversity and ecosystem functioning. Loreau M., Naeem S. and Inchausti P. (eds.), Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 92-101.
- HUXMAN, T., SMITH, P., KNAPP, A., SHAW, M., et al., 2004. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. *Nature*, 429: 651-654.
- IGLESIAS, M. R. 2010. Evaluación de la vegetación leñosa como depósito de carbono en un gradiente Árido-semiárido argentino. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. 133 pp.
- ILLERA, P., DELGADO, J. A., FERNÁNDEZ-MANSO, A. A., & FERNÁNDEZ-UNZUELA, A. 1998. Sistema de información geográfica agrometeorológica para el seguimiento de la vegetación en Castilla y León: diseño y primeras aplicaciones. *Revista de teledetección*, 10: 1-12.
- INFOSTAT. 2007. Software estadístico. Grupo InfoStat. Facultad de Ciencias. Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba. Argentina.

- INFOSTAT. 2008. Manual del usuario. Grupo Infostat. Primera Edición. Editorial Brujas Argentinas. FCA. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. 334 pp.
- JOBÁGY, E. G., SALA, O. E., & PARUELO, J. M. 2002. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach. *Ecology*, 83(2): 307-319.
- MCR HOLM, A., CRIDLAND, S. W., & RODERICK, M. L. 2003. The use of time-integrated NOAA NDVI data and rainfall to assess landscape degradation in the arid shrubland of Western Australia. *Remote Sensing of Environment*, 85: 145-158.
- NAGAI, S., ICHII K., & MORIMOTO, H. 2005. Identification of the climate control factors on carbon cycle variations of tropical forests combined analysis of ground and satellite observations. The 11th CERES International Symposium on Remote Sensing. Disponible en: http://www2.cr.chiba-u.jp/symp2005/documents/Postersession/p013_ShinNagai_paper.pdf. Julio 2010.
- NOY-MEIR, I. 1973. Desert ecosystem: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 5: 25-51.
- OGLE, K., & REYNOLDS, J. F. 2004. Plant responses to precipitation in desert ecosystems: integrating functional types, pulses, thresholds, and delays. *Oecologia*, 141: 282-294.
- PARMIGGIANI, F., QUARTA, G., MARRA G. P., & and CONTE, D. 2006. NDVI fluctuations from 1995 to 2006 in South Italy and North Africa: a search for a climate change indicator. Proceedings-Spie The International Society For Optical Engineering Vol. 6359, pp. 635909.
- PARUELO, J. M., & LAUENROTH W. K. 1998. Inter-annual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography*, 25: 721-733.
- PARUELO, J. M., PIÑEIRO, G., OYONARTE, C., ALCARAZ, D., CABELLO, J., & ESCRIBANO, P. 2005. Temporal and spatial patterns of ecosystem functioning in protected arid areas in southeastern Spain. *Applied Vegetation Science*, 8: 93-102.
- QUEVEDO, E. R., PEIXOTO FILHO, G. E. C., OLIVEIRA, P. T. S., & PARANHOS FILHO, A.C. 2007. Estudo da Variabilidade do NDVI dos Bairros da Bacia Hidrográfica do Prosa - Campo Grande - MS como suporte para avaliação da qualidade ambiental. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste. Cuiabá. A busca pelo usos sustentável do recursos hídricos das regiões do Norte e Centro-Oeste. pp. 1-11.
- REEVES, M. C., ZHAO, M., & RUNNING, S. W. 2006. Applying improved estimates of MODIS productivity to characterize grassland vegetation dynamics. *Rangeland Ecology and Management*, 59: 1-10.
- REYNOLDS, J. F., KEMP, P. R., OGLE, K., & FERNÁNDEZ, R. J. 2004. Modifying the «Pulse-Reserve» paradigm for deserts of North America: precipitation pulses, soil water and plant responses. *Oecologia*, 41: 194-210.
- REYNOLDS, J. F., MAESTRE, F. T., HUBER-SANNWALD, E., HERRICK, J., & KEMP, P. R. 2005. Aspectos socioeconómicos y biofísicos de la desertificación. *Ecosistemas*, 14: 3-21.
- ROJAS, J., ECHE, J. C., DE BRAS, T., CASANOVA, J. L., & PÉREZ, C. 2003. La variabilidad de la vegetación en la costa norte de Perú a partir de las imágenes de satélite. *Teledetección y desarrollo regional. X Congreso de Teledetección. Cáceres, España*, 2003, 27-30.
- SCANLON, T. M., CAYLOR, K. K., MANFREDA, S., LEVIN S. A., & RODRIGUEZ-ITURBE, I. 2005. Dynamic response of grass cover to rainfall variability: implications for the function and persistence of savanna ecosystems. *Advances in Water Resources*, 28: 291-302.
- SCHMIDT, H., & KARNIELI, A. 2002. Analysis of the temporal and spatial vegetation patterns in semi-arid environment observed by NOAA AVHRR imagery and spectral ground measurements. *Int. J. Remote Sensing*, 23(19): 391-399.
- SEBEGO, R. J. G., ARNBERG, W., & RINGROSE, S. 2002. Relation Between cold cloud data, NDVI and Mopane in Eastern Botswana. *The international Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34: Part 6.
- VERÓN, S. R., PARUELO, J. M., & OESTERHELD, M. 2006. Assessing desertification. *Journal of Arid Environments*, 66: 751-763.
- VILLAGRA, P. E., CONY, M. A., MANTOVÁN, N. G., ROSSI, B. E., GONZÁLEZ LOYARTE, M. M., VILLALBA, R., & MARONE, L. 2004. Ecología y Manejo de los algarrobales de la Provincia Fito geográfica del Monte. En: Arturi M. F., Frangi J. L., and Goya J. F., (ed). *Ecología y Manejo de Bosques Nativos de Argentina*. Editorial. Universidad Nacional de La Plata.
- WANG X., XIE, H., GUAN, H., & ZHOU, X. 2007. Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions. *Journal of Hydrology*, 340(1-2): 12-24.
- WIEGAND, T. Y., & JELTSCH, F. 2000. Long-term dynamics in arid and semiarid ecosystems-synthesis of a workshop. *Plant Ecology*, 150: 3-6.
- YOUNIS, M. T., GILABERT, M. A., & MÉLIA, J. 1999. La dinámica de la vegetación como indicador de la desertificación en la cuenca del Guadalupe, SE España. *Revista de Teledetección*, 12: 1-4.