

Contribución de series temporales de NDVI NOAA/AVHRR al análisis funcional en humedales.

María Laura Zoffoli
Nora Madanes
Patricia Kandus

Universidad de Buenos Aires Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN), Dpto. de Ecología, Genética y Evolución, Laboratorio de Ecología Regional, Grupo de Investigaciones sobre Ecología de Humedales,
Ciudad Universitaria, Pab. II, (1428) Buenos Aires, República Argentina,
pato@ege.fcen.uba.ar

Abstract. The aim of the work was to explore the potential of the last two decades of Normalized Vegetation Index (NDVI) time series of NOAA-AVHRR satellite systems to analyze wetland functioning in the Paraná River Delta Region (PRD). The PRD region stretches through the final 300 km of the Paraná basin. It covers approximately 17,500 km², close to the Buenos Aires city in Argentina and due to its natural heterogeneity at least ten wetland landscape units (WLUs) are identified. Time series was analyzed through autocorrelation models. All WLUs show similar NDVI mean annual maximum, minimum and general trends which follow annual vegetative cycle, but show differences in inter-annual behaviour. Southernmost WLUs present a cyclic behaviour describing annual vegetative periods along the whole time series. Upstream WLUs show a strong interannual variability since they are more affected by the ENSO events. Nevertheless, the ENSO occurred in 1982-83 was the only one that seems to have a significant impact, particularly on WLUs unconnected with the main streams. In spite of low spatial resolution NDVI NOAA-AVHRR time series demonstrated to be a useful tool for wetland monitoring at regional scale.

Palavras-chave: NDVI time series, wetlands, ecosystem functioning, series temporais de NDVI, terras húmidas, função de ecossistemas.

1. Introducción

Una de las características sobresalientes en Sudamérica es la enorme extensión que ocupan los humedales asociados a planicies fluviales de los grandes ríos como el Orinoco, el Amazonas o el Paraná. La superficie de estos ecosistemas y su permanencia depende fundamentalmente de la entrada de agua superficial (lluvias o descargas de los ríos) y de las características de los ciclos de inundación-estiaje (Neiff y Malvárez, 2004).

De acuerdo a Neiff (2004) los grandes humedales de Sudamérica son *macroecosistemas* de extensión subregional en los cuales la variabilidad espacial y temporal en los niveles de agua condicionan los ciclos biogeoquímicos y flujos, promueven el desarrollo de suelos con fuertes características hidromórficas y soportan una biota particular y sumamente rica adaptada a un amplio rango de disponibilidad de agua e hidroperíodos.

El uso de datos satelitales para el monitoreo de ecosistemas se ha difundido ampliamente en los últimos años. Particularmente los datos de Índice Verde Normalizado (NDVI, Tucker, 1979) correspondientes a la serie de tiempo del sistema NOAA/AVHRR han realizado múltiples aportes en áreas de ecosistemas terrestres a escala global o regional (Lloyd 1990, Da Costa Gurgel, 2000; Diouf y Lambin, 2001; Paruelo *et al*, 2004; Anyambaa y Tucker, 2005). En el caso de humedales, la mayor experiencia en el relevamiento y monitoreo de los mismos corresponde al uso de sistemas de alta o media resolución espacial debido a la alta fragmentación natural que presentan estos ecosistemas y a la escasa expresión areal que muestran en los países centrales.

Dada la expresión espacial de los humedales sudamericanos, en el presente trabajo el objetivo es evaluar la señal de una serie temporal de NDVI del sistema NOAA/AVHRR como

indicador del funcionamiento del paisaje en áreas de la Región del Delta del Río Paraná, en Argentina.

Área de estudio

La región del Delta del Río Paraná es un extenso mosaico de humedales (Malvárez, 1997) que cubre 17.000km² a lo largo de 300km, desde la Ciudad de Diamante hasta el estuario del Plata en la porción terminal de la cuenca homónima (**Fig. 1**). Esta región constituye una compleja planicie inundable, con características biogeográficas y ecológicas únicas en la Argentina. Por una parte, especies de linaje subtropical, que penetran a través de los ríos Paraná y Uruguay, coexisten aquí con otras de clima templado. Por otra parte, la gran heterogeneidad ambiental determina la yuxtaposición de diferentes comunidades de flora y fauna que resultan en una alta diversidad ecológica.

Su heterogeneidad se debe, en primer término, a la existencia de patrones geomórficos derivados de procesos marinos ocurridos en el Holoceno medio (5000 años AP) y procesos fluviales actuales y pasados. En segundo término, está condicionada por un complejo régimen hidrológico determinado por la interacción de las crecientes de los ríos (principalmente del Paraná y el Uruguay), las lluvias locales y las mareas del estuario. De esta manera es posible diferenciar en la región distintas unidades de paisaje caracterizadas por su estructura y dinámica (Malvárez, 1997). La **tabla 1** presenta una breve descripción del patrón de paisaje, vegetación y régimen hidrológico de las unidades de paisaje analizadas en este trabajo.

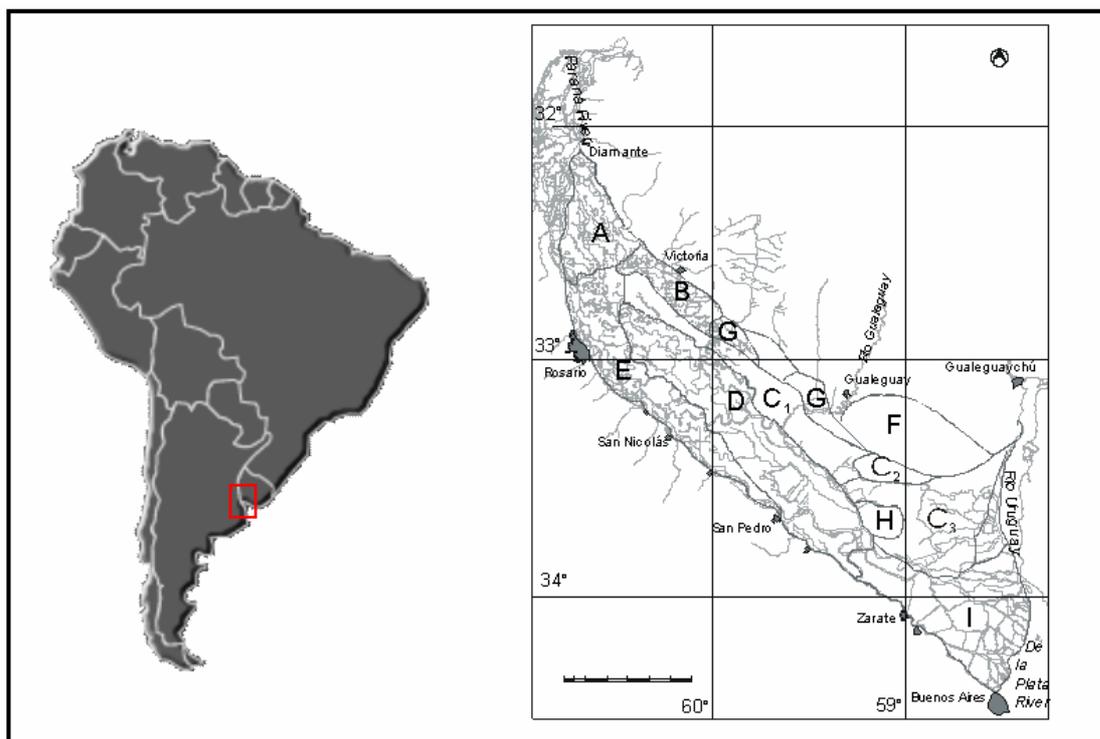


Figura 1: Mapa de Sudamérica, con el área de estudio localizada en el recuadro (izq.). Mapa de unidades de paisaje del Delta del Río Paraná (Malvárez, 1997) (der.)

Tabla 1: Síntesis de las principales características (patrones de paisaje, régimen hidrológico y vegetación) de las unidades de paisaje del Delta del Paraná.

Unidad de paisaje	Patrón de paisaje	Régimen hidrológico	Vegetación
A	Lagunas no vegetadas y un patrón de espiras de meandro. Albardones altos en tramos del Paraná.	Río Paraná. Inundación estacional	Albardones y espiras: bosque. Media loma: praderas herbáceas altas. Bajos: praderas herbáceas acuáticas
D	Alternancia de cordones arenosos y depresiones anegables, no presenta lagunas permanentes y los cauces son escasos.	Río Paraná y hacia el sur Uruguay. Los tiempos de permanencia son intermedios	Cordones: comunidades herbáceo-arbustivas con espinillo, seibo y tala. Depresiones anegables: composición variable según las condiciones hidrológicas.
E	Conformado por secuencias de altos y depresiones.	Río Paraná. Tiempos breves de permanencia de agua.	Altos: bosques. Zonas deprimidas: comunidades de herbáceas latifoliadas o de herbáceas graminiformes flotantes
F	Correspondiente a la antigua albufera. Se encuentra a mayor altura y se separa del resto de la región por la barrera del cordón litoral.	Precipitaciones locales.	Pradera de herbáceas graminiformes bajas sobre la que se encuentran y ejemplares de especies arbóreas.
I	Patrón de islas y cauces de distinta magnitud. Islas: conformadas por albardones perimetrales que rodean áreas deprimidas.	Ríos Paraná y Uruguay, mareas del estuario del Plata y sudestadas. Permanencia de agua breve.	Albardones: bosque. Áreas deprimidas: praderas de herbáceas altas: pajonales o juncales.

2. Metodología

Se utilizó una serie de imágenes mensuales de NDVI NOAA/AVHRR de 20 años (desde julio de 1981 hasta diciembre de 2000), con una resolución espacial de 8km de píxel, de libre distribución (ftp://disc1.gsfc.nasa.gov/data/avhrr/global_8km/). El NDVI fue calculado según:

$$NDVI = (\rho_{\text{Canal 2}} - \rho_{\text{Canal 1}}) / (\rho_{\text{Canal 2}} + \rho_{\text{Canal 1}}) \quad \text{Ec. 1}$$

siendo ρ reflectancia de los canales 2 (725-1100nm) y 1 (580-680 nm), respectivamente.

La **figura 2** muestra el mapa del unidades de la región, superpuesto a una imagen SAC-C, con una resolución de 130m de píxel y a una imagen NOAA/AVHRR de 8km de píxel. Se puede observar que en la imagen NOAA no pueden ser identificados los elementos de paisaje y la imagen resulta un compuesto de todos los elementos presentes en cada píxel.

La base de datos está constituida por el valor más alto de NDVI que se obtuvo durante cada mes, de manera de minimizar el efecto producido por las nubes y seleccionar los píxeles más cercanos al nadir. Dentro de la serie temporal faltaron las imágenes entre mayo-diciembre/1994 y junio/2000.

Se realizó una composición de las imágenes mensuales, generando una nueva imagen multitemporal de NDVI. De dicha imagen, se extrajeron muestras representativas de píxeles de cada una unidad de paisaje utilizando el programa Erdas Imagine 8.4. Para cada muestra de píxeles se calculó el valor promedio para cada mes, con los cuales se realizó el análisis de datos.

En cada unidad se calcularon los valores promedio mensuales de NDVI, de los 20 años, y su desvío estándar.

Se realizaron correlaciones simples entre las muestras de series temporales de NDVI obtenidas de las distintas unidades ambientales.

A fin de obtener un modelo simplificado que resuma el comportamiento de los datos en el tiempo, se realizó un análisis de autocorrelación. Los modelos de autocorrelación se basan en la proposición de que si los datos de una variable son colectados a lo largo del tiempo, puede

haber correlación entre las observaciones sucesivas de esa variable (Box y Jenkins, 1976). Esta correlación (ρ) puede expresarse como:

$$\rho(k) = \frac{\gamma(k)}{\gamma(0)} = \frac{\gamma(k)}{\sigma_x^2} \quad \text{Ec. 2}$$

donde $\gamma(k)$ a su vez, corresponde a la función de autocovarianza para un lag k , (en este caso, retraso k) que se expresa según:

$$\gamma(k) = E(x_t - \mu)(x_{t+k} - \mu) \quad \text{Ec. 3}$$

considerando x_t la serie de tiempo estacionaria con una media μ y una varianza σ_x^2 y $\gamma(0)$ corresponde a la función de autocovarianza para un lag de 0. Los análisis se realizaron tomando una cantidad máxima de 36 retrasos y en el caso de las unidades de influencia mareal, además del período completo, se consideraron los períodos comprendidos julio/1984-diciembre/1991 y enero/1992-diciembre/2000. Se consideraron valores significativos de la función de autocorrelación a aquellos valores mayores a un desvío estándar de la función. Los datos faltantes fueron reemplazados por el valor promedio de NDVI de la unidad correspondiente, para cada uno de los meses.

Fueron comparados los patrones temporales entre los grupos obtenidos a partir de los análisis de correlación entre unidades. Para esto, los valores de NDVI y los promedios mensuales calculados fueron graficados considerando como rango de variación promedio la media \pm el desvío estándar.

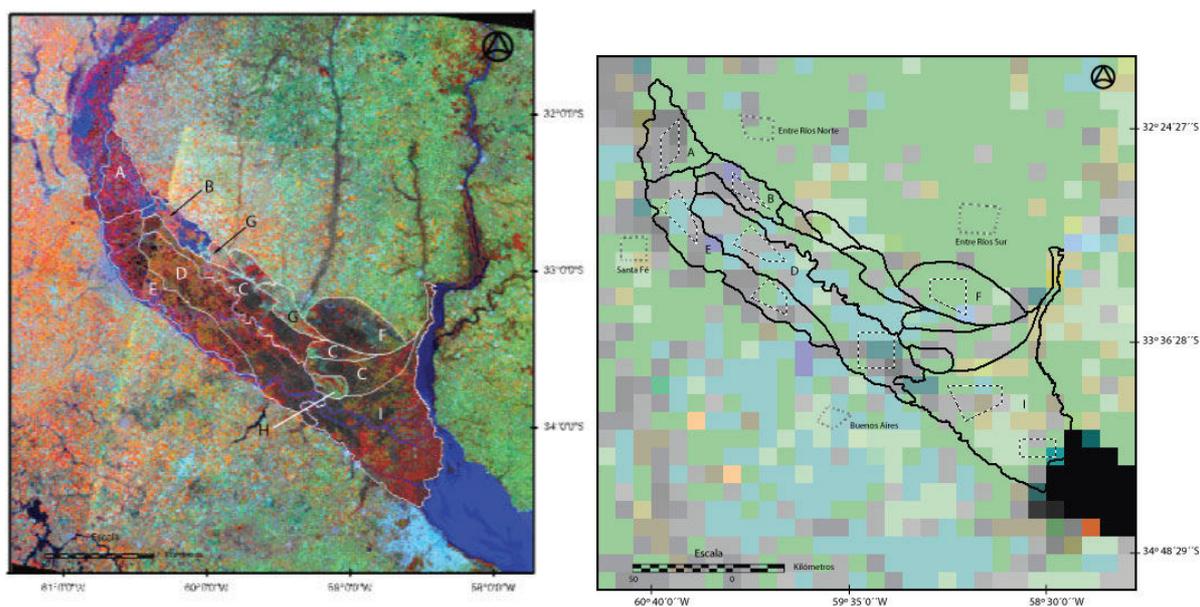


Figura 2: Mapa digital de unidades de paisaje propuesto por Malvárez (1997) superpuesto a la composición de imágenes SAC-C, obtenidas en enero de 2002. La imagen SAC-C se presenta en falso color compuesto (izq.). Imagen de NDVI NOAA-AVHRR, de 8 km de píxel sobre el que se superpuso el mapa de ambientes (der.).

3. Resultados y discusión

En la **figura 3** se observa que el patrón estacional que presenta el NDVI, en términos de valores promedio anual, es semejante para todas las unidades. El rango de variación oscila entre 0,7-0,4 y los valores menores se presentan en invierno. Esto sugiere que el comportamiento general del NDVI/NOAA-AVHRR de todas las unidades responde principalmente a la variación estacional de la vegetación, como se observa en ambientes terrestres (Ej: Nemani *et al.*, 2003). En caso de existir alguna distorsión causada por el agua,

como se esperaría en ambientes de humedal, quedó encubierta en el promedio de los 20 años y porque se trata de una composición de los máximos de NDVI registrados en intervalos de tiempo. Sin embargo, los desvíos estándar en el año varían entre las distintas unidades. Así los mayores desvíos estándar se observan en las unidades que se encuentran más al norte y disminuyen en las unidades que se encuentran en el sur. Es decir que los valores de NDVI dentro de las unidades presentan una variabilidad interanual diferencial.

La **tabla 2** presenta la matriz obtenida en las correlaciones entre las unidades de paisaje. Todos los valores de correlación fueron significativos ($p < 0,01$) pero sólo las unidades A, D y E presentaron índices mayores a 0,7 entre ellas. Estas unidades se diferencian de las demás debido a que tienen un régimen hidrológico netamente fluvial.

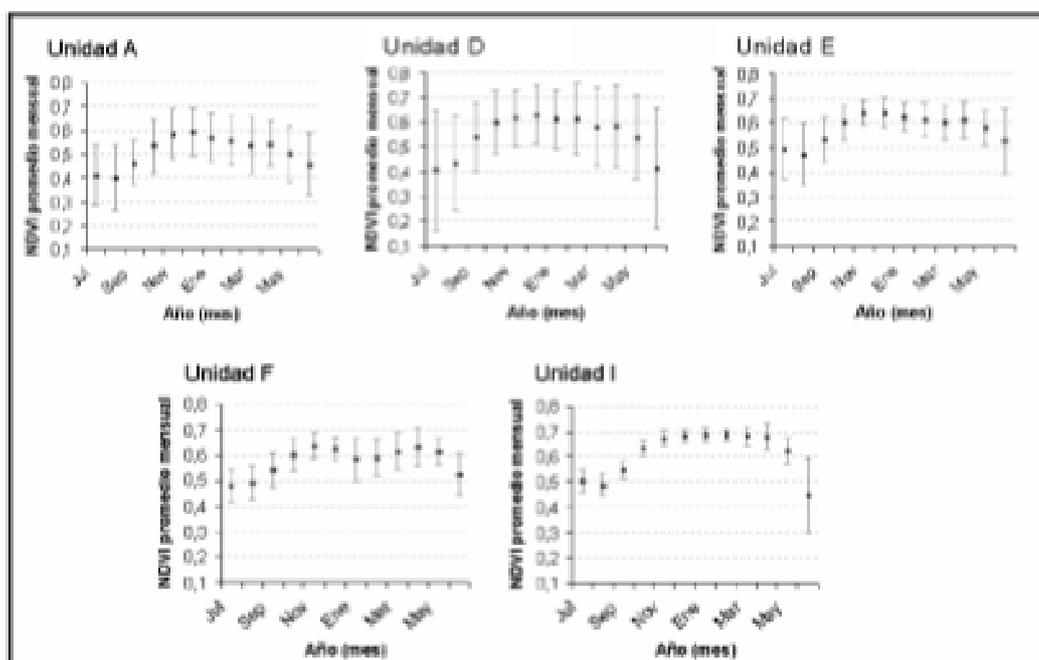


Figura 3: Promedio de NDVI y el desvío estándar en el tiempo.

Tabla 2: Función de correlación para cada par de unidades

Unidad	A	D	E	F	I
A	1,00	0,77	0,87	0,41	0,52
D		1,00	0,82	0,35	0,41
E			1,00	0,54	0,61
F				1,00	0,65
I					1,00

A la luz de esta diferenciación, se interpretaron los resultados de los análisis de autocorrelación y las curvas de NDVI en el tiempo. Los autocorrelogramas muestran diferencias según la unidad que se trate (**Fig. 4**). Así, la unidad I con influencia mareal, presentó un patrón temporal anual en los correlogramas, donde se identifican los ciclos anuales de la vegetación (**Fig. 6 i**). La unidad F, con régimen pluvial, mostró una función autocorrelación similar a la anterior, pero con menor significancia. La **figura 6 ii** muestra el comportamiento del NDVI en el tiempo para la unidad F, donde se puede apreciar un patrón regular bimodal anual. En cambio, las unidades con régimen fluvial dominante (A, D y E) no

presentaron un patrón estacional cuando se analiza el período completo 1981-2000 (**Fig. 4 y 6 iii**). En este caso las inundaciones producidas por el evento ENOS 1982-83 parecen introducir una fuerte distorsión en el comportamiento de la función de autocorrelación.

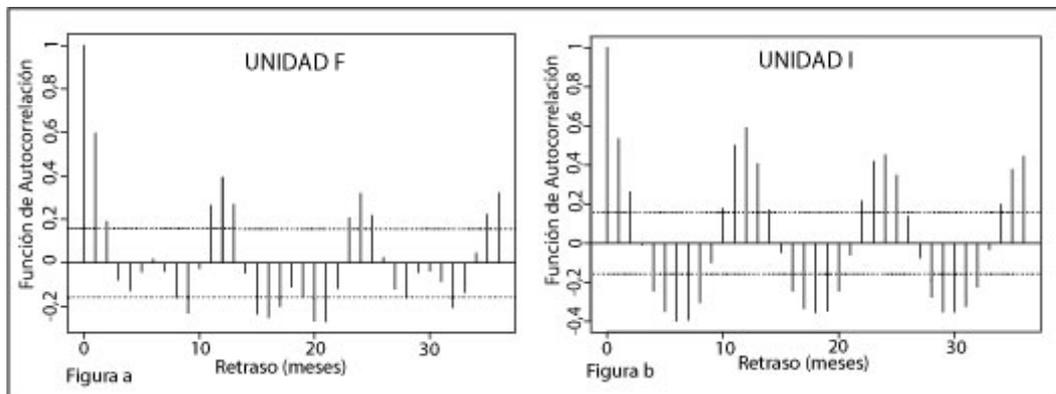


Figura 4: Valor de la función de autocorrelación en función del retraso (en meses) para las unidades F (a) e I (b).

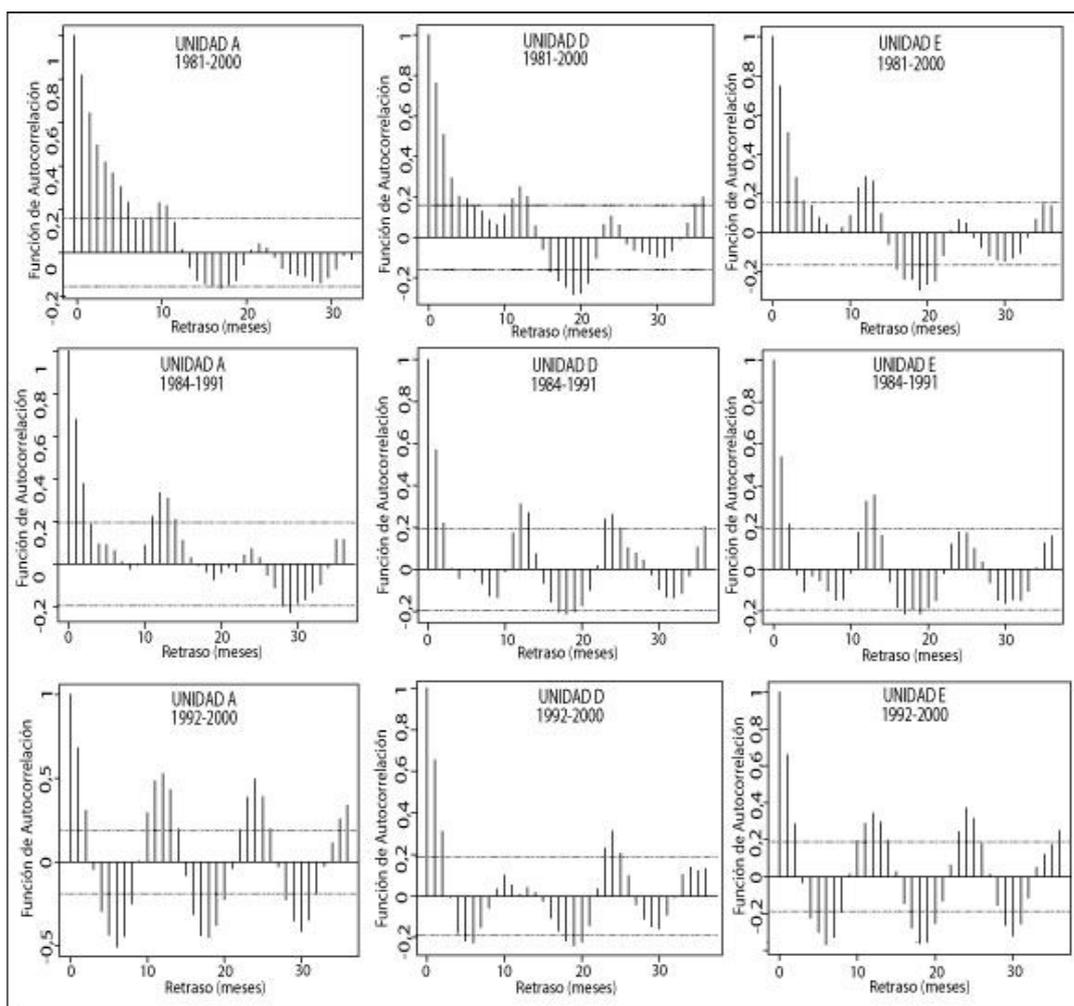


Figura 5: Valor de la función de autocorrelación en función del retraso (en meses) para las unidades A, D y E para los períodos 1981-2000, 1984-1991 y 1992-2000.

Al sustraer del análisis los datos correspondientes a las fechas durante El Niño 1982-83 la función de autocorrelación muestra nuevamente un comportamiento estacional para estas unidades, tanto para la primer década posterior al avento como para la segunda (**Fig. 5**). En este último caso sin embargo la estacionalidad es más marcada. Esto se cumple en la unidad A y mas notoriamente en la Unidad E. En el caso de la Unidad D, sin embargo este patrón estacional no es significativo. Esta variabilidad en la función de autocorrelación entre las unidades con regimen fluvial, podría ser explicada por las diferencias en el tipo de conexión con el curso principal del río Paraná, y así, la unidad E que tiene una conexión con el Paraná presenta tiempos cortos de inundación, lo cual no se observa en la unidad D, desconectada en forma directa del Paraná. Aparte del evento 82-83, ninguno de los otros eventos ENSO ocurridos durante el período estudiado mostraron influencia sobre las funciones de autocorrelación. Los resultados obtenidos en los modelos de autocorrelación sugieren que los pulsos extraordinarios originados por estos eventos podrían acoplarse con los pulsos regulares del sistema según la magnitud del evento y la resiliencia del sistema. Este sería el caso de la unidad E, que presenta una rápida recuperación (en términos del patrón de NDVI) de los eventos de inundación extraordinarios. En cambio las unidades de influencia mareal y pluvial no son afectadas por eventos ENSO.

Los resultados presentados en este trabajo muestran que a pesar de la baja resolución espacial, los datos de indice verde pertenecientes a la serie NOAA AVHRR aportan información valiosa acerca de la dinámica de los ecosistemas de humedal dada la extensión que presentan los mismos en el continente sudamericano.

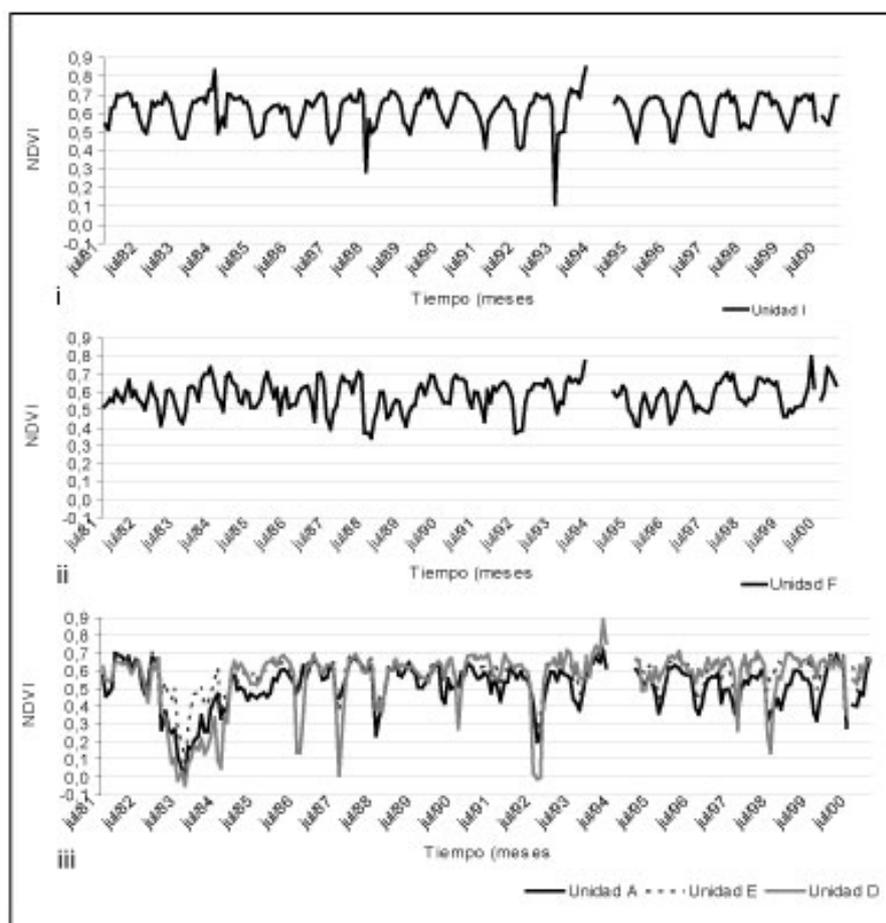


Figura 6: NDVI mensual en función del tiempo. i: unidad I; ii: unidad F y iii: unidades A, D y E.

4. Referencias bibliográficas

- Anyamba, A.; Tucker, C.J. *Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003*. *Journal of Arid Environments* 63: 596-614. 2005.
- Box, G. E. P.; Jenkins, G. **Time Series Analysis: Forecasting and Control**. San Francisco, CA Holden-Day. 575p. 1976.
- Da Costa Gurgel, H. **Variabilidade espacial e temporal do NDVI sobre o Brasil e suas conexões com o clima**. Tesis de Maestría INPE. 2000.
- Diouf A; Lambin E.F. Monitoring land-cover changes in semi-arid regions: remote sensing data and field observations in the Ferlo, Senegal. **Journal of Arid Environments**. 48(2). pp.129-148. 2001.
- Lloyd D. A phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery. **Int J Remote Sensing** 11:2269–79. 1990
- Malvárez, A. I. **Las comunidades vegetales del Delta del río Paraná. Su relación con factores ambientales y patrones de paisaje**. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires. Argentina. 1997
- Neiff, J. J. y A. I. Malvárez, **Grandes humedales fluviales**, en: Malvárez, A. I. y R. F. Bó (comp.), Documentos del Curso Taller Bases ecológicas para la clasificación e inventario de humedales en Argentina, Buenos Aires, 2004.
- Neiff, J. J. **El Iberá... ¿en peligro?** Fundación Vida Silvestre de Argentina, 2004, 136 pp.
- Nemani, R.R. et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. **Science** 300, 1560–1563. 2003.
- Paruelo, J. M; Garbulsky, M.F; Guerschman, J.P; Jobba, E.G. Two decades of Normalized Difference Vegetation Index changes in South America: identifying the imprint of global change **INT. J. Remote Sensing**, 20, VOL. 25, NO. 14, 2793–2806. 2004.
- Tucker, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment** 8, 127–150. 1979.