

## Evolución temporal del NDVI en el Uruguay, mediante imágenes SPOT en el período 1998-2012

Mauricio Ceroni<sup>1</sup>

Marcel Achkar<sup>2</sup>

Inés Gazzano<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad de la República -Centro Interdisciplinario Respuesta al Cambio y la Variabilidad Climática. Código Postal 11200- Montevideo, Uruguay  
mceroni@ei.udelar.edu.uy

<sup>2</sup> Universidad de la República - Facultad de Ciencias- IECA-LDSGAT  
Código Postal 11400- Montevideo, Uruguay  
achkar@fcien.edu.uy

<sup>3</sup> Universidad de la República - Facultad de Agronomía- Unidad de Sistemas Ambientales.  
Código Postal 12400- Montevideo, Uruguay  
igazzano@fagro.edu.uy

**Abstract.** The agricultural processes in Uruguay have had a steady intensification during the last decade, specially in the fields of crops, forestation and cattle. This new stage has been powered by the aggro-business model, having a great impact on the Aerial Net Primary Productivity (PPNA). In order to be able to assess these transformations nationwide, the work was focused on the analysis of the Normalized difference Vegetation Index (NDVI) for Uruguay during the period April 1998 - March 2012, using SPOT 4-5 images. Thus, a series of remote sensing techniques were used, as well as the Geographical Information System (SIG). All this has allowed the systematization and precessing of the information. The main results have showed a general tendency towards the lowering of the NDVI for the whole of the country. The seasonal differences are considerable; Spring has the greater values with a very homogeneous distribution over the territory, followed by autumn with a considerable division of territories; then comes summer with a very abrupt transition from west to east. Finally we have winter with the lowest and most homogeneous values. This work generated the first nationwide NDVI with SPOT images, offering data that can be used directly to evaluate the PPNA. It is necessary to continue monitoring the PPNA to be able to interpret longer time period processes.

**Palabras-chave:** Uruguay, NDVI, image processing, SPOT. Uruguay, NDVI, procesamiento de imágenes, SPOT.

### 1. Introducción

Los territorios de la cuenca del Río de la Plata vienen atravesando una serie de transformaciones de la cobertura vegetal durante las últimas décadas, impulsado por un fuerte proceso de intensificación agraria (IAI, 2011). Este proceso afecta el comportamiento espacio-temporal de la vegetación, la aplicación de Geotecnologías, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección, constituyen las principales herramientas que permiten evaluar estos cambios. (Guerschman *et al.* 2002; Seyler *et al.* 2002; Zhang *et al.* 2007).

Durante los últimos años existe un aumento sostenido en la utilización de imágenes satelitales de baja resolución para el monitoreo de la variación anual de la productividad de la vegetación en escalas pequeñas de análisis, las bajas resoluciones espaciales son contrarrestadas por altas resoluciones temporales (Carreiras *et al.* 2002; Guissard, *et al.* 2004; Tarwasky *et al.* 2008;). El seguimiento de la productividad, el desempeño temporal y espacial de la vegetación es uno de los principales desafíos en la investigación a partir de técnicas de teledetección, (Moulin *et al.* 2003; Chiesi *et al.* 2005; Lermite *et al.* 2008).

En este contexto, los índices de vegetación se han convertido en las principales fuentes de información para el monitoreo y espacialización de la vegetación y sus variaciones. El más utilizado es el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) que representa una función de bandas espectrales correspondientes al rojo e infrarrojo cercano  $NDVI = (PIR-R) / (PIR+R)$ . La diferencia entre estas bandas es un indicador fuerte de la cantidad de biomasa verde fotosintéticamente activa (Tucker, 1977, Tucker 1979, Sellers 1985) y se encuentra fuertemente correlacionada con la productividad primaria neta aérea (Prince 1991; Paruelo *et al.* 1997). Este índice es ampliamente utilizado a diversas escalas: locales (INIA-GRAS<sup>1</sup>), regionales (Paruelo *et al.* 2004; Paruelo, 2008) continentales y globales (Zhao, 2010; Samanta, 2011). El estudio de la vegetación con imágenes de alta y baja resolución, permite realizar cartografía de la distribución espacial y temporal de la cobertura vegetal, con altos niveles de precisión (Xiao *et al.* 2002; Soegaard *et al.* 2003; Cihlar *et al.* 2003). Esta metodología de trabajo permite interpretar la heterogeneidad espacial de la información contenida en las imágenes NDVI (Chirici *et al.* 2007).

Existen varios sensores remotos que permiten trabajar series temporales del NDVI, uno de ellos es el instrumento Vegetation de SPOT del Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia en cooperación con la Agencia Espacial Europea. Los satélites SPOT 4 y 5 disponen de un “INSTRUMENTO VEGETATION” (<http://www.spotimage.com>). Son imágenes de baja resolución espacial que registra información en cuatro bandas espectrales (azul, rojo, IR cercano e IR medio) y permite disponer para cada día de imágenes de 1000 m de resolución para casi la totalidad de la superficie terrestre del planeta. Creado para ofrecer una fuente de información permanente que permite realizar el monitoreo de la vegetación a nivel global y continental (GMES, 2008), a nivel regional (Telesca y Lasaponara, 2006; Carreiras *et al.* 2002) y a nivel nacional (Achkar 2005; Faccio, 2010). El objetivo de este trabajo fue analizar la evolución mensual del NDVI para Uruguay durante el período Abril 1998-Marzo 2012, elaborada a partir de imágenes SPOT-VEGETATION.

## 2. Metodología de Trabajo

### 2.1 Área de Estudio

Uruguay se localiza en la región sur de Sudamérica entre los paralelos 30° y 35° latitud sur y los meridianos 53° y 58° de longitud oeste. Se encuentra dentro del bioma pampa siendo el pastizal el ecosistema dominante caracterizado principalmente por gramíneas y leguminosas. Presenta una densa y amplia red hidrográfica constituida por diversos ríos, arroyos y cañadas favorecido por el tipo de relieve ondulado a suave con pendientes que oscilan entre 2 y 6 % (MGAP, 2005). A nivel climático la temperatura media anual es de unos 17,7 °C, variando desde 19,8 °C en la zona norte, a 16,6 °C en la costa sureste del país. Los valores medios de precipitación acumulada anual se sitúan entre 1200 y 1600 mm. con los menores valores situados al suroeste y los máximos al noreste (INIA, 2011). Estos factores asociados a la evolución del paisaje y al manejo de las actividades agropecuarias determinan que Uruguay presente una diversidad productiva importante.

### 2.2 Imágenes SPOT/NDVI

Los productos del sistema SPOT – VGT están disponibles a partir de 1/4/1998, cada 10 días. Para cumplir un ciclo completo de 14 años de obtuvieron imágenes del 1 de Abril del 1998 hasta el 31 de marzo del 2012, totalizando un conjunto de 504 imágenes.

Las imágenes NDVI de SPOT-VGT contienen la información en valores (DN) con una amplitud de 256 (0 a 255), valores que corresponden a una función lineal del NDVI.

---

1 Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria - Grupo de Riego Agricultura Satelital.

$$\text{NDVI} = (a * \text{DN}) + b \quad (1)$$

siendo:  $a = 0.004$  y  $b = -0.1$

Se aplicaron una serie de técnicas en base a los trabajos realizados por Achkar (2005) y Faccio (2010), mediante los Software ENVI 4.7 y Arc Gis 10.0.

#### **-Corrección Geométrica:**

En primera instancia se realizó para cada imagen la conversión del formato *Hierarchical Data Format* (HDF), al formato IMAGE, utilizable en el software Arc Gis 10.0 para realizar la georreferenciación. En segunda instancia se elaboró una máscara de extracción para el Uruguay. La tercera etapa fue la georreferenciación utilizando el sistema de proyecciones Universal Transversal Mercator (UTM), zona 21 Sur con elipsoide de referencia el WGS-84.

#### **-Transformación de los sistemas de datos:**

Se realizó una grilla de 1000 x 1000 metros en formato vectorial y posteriormente se pasaron los datos de cada imagen a la base de datos de la cobertura. Transformado los datos del formato raster al formato vectorial. La capa de información se fue completando cada vez que se realiza este procedimiento, obteniendo, por ejemplo, una capa por año en donde cada columna representaba una imagen, hasta completar las 36 imágenes del año...

#### **-Sistematización de la base de datos:**

Luego de procesar las 504 imágenes, se reunió toda la base de datos obteniéndose más de 100 millones de registros. Este valor se basa en la cantidad de píxeles (214.871) por imagen (504). Para poder operativizar la base de datos se reunió la información en 14 planillas donde cada una representa un año calendario. Posteriormente se resumió la base de datos en una sola tabla de medias mensuales, aplicando la media aritmética.

#### **-Elaboración Cartográfica.**

Mediante la función *Merge* se unieron las 14 capas en una única cobertura, siendo esta última la utilizada para generar los diferentes mapas.

#### **-Análisis Estadístico.**

Se analizan las tendencias de la productividad vegetal anual y estacional de las series temporales elaboradas para el territorio uruguayo, mediante regresiones lineales.

### **3. Resultados y Discusión.**

En la figura 1, se muestran los resultados del NDVI para el periodo analizado, integrando la media anual con su tendencia y el comportamiento estacional; Otoño (Marzo-Abril, Mayo), Invierno (Junio, Julio, Agosto), Primavera (septiembre, octubre, noviembre), Verano (diciembre, enero, febrero). Se observa para la totalidad de la serie la existencia de una tendencia significativa a la baja del NDVI (Tabla 1). Esta baja del NDVI es coincidente con los estudios realizados por Zhao (2010) y Samanta (2011) en donde sitúan al bioma pampa como las regiones del planeta donde se registran descensos en la productividad en los últimos años. Los factores que pueden producir esta disminución son, a) el cambio de cobertura de suelo, coincidente con lo reportado por PNUMA, 2008 y Arbeleche, et al. 2010; y b) el aumento de la variabilidad climática, evidenciada por la recurrencia de los eventos extremos (sequías e inundaciones) (PNUMA, 2007).

El comportamiento anual presenta una tendencia significativa de descenso de productividad en un periodo de 14 años, que integra los últimos 8 años de aumento de la intensificación

agraria (García Prechac et al, 2010). A nivel estacional la situación es diferencial, la primavera es la estación con el promedio más elevado presentando la mayor cantidad de valores por encima de la media y mayor estabilidad representada por el menor Coeficiente de Variación (CV) y una tendencia fuerte de disminución. El invierno presenta menor promedio, observándose la curva por debajo de la media anual, y una cierta estabilidad en el periodo. El verano tiene en promedio un comportamiento similar a la media anual, marcando significativamente la disminución de la productividad a partir del año 2006. El otoño es la estación que presenta mayor CV acentuándose a partir de 2006, donde se representa el efecto del contexto creciente de veranización de la agricultura.

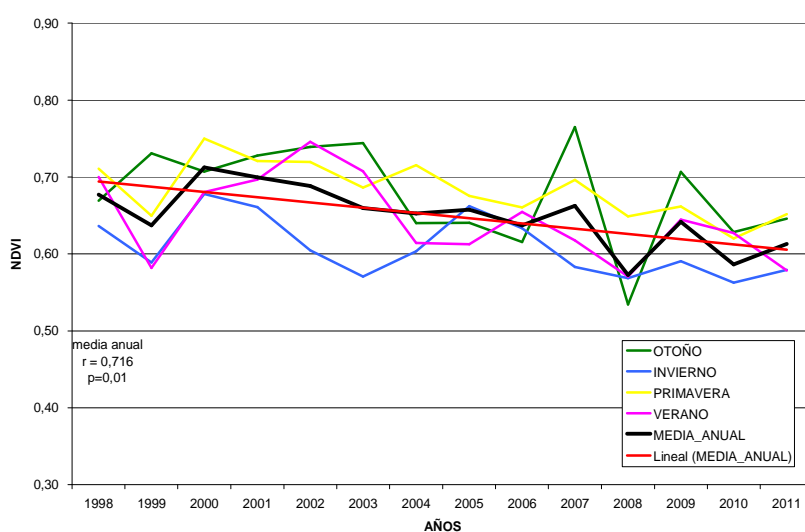


Figura 1: Curvas anuales de NDVI anual y estacional período Abril 1998-Marzo 2012.

Las diferencias en las tendencias estacionales son la resultante de la variabilidad intraanual de la cantidad de radiación solar disponible y la precipitación. Tanto la radiación como la precipitación presentan los menores registros durante el invierno, mientras que para la primavera existe un aumento sostenido de la radiación y la precipitación (DNM, 2011). Estos incrementos presionan al aumento al NDVI de invierno a primavera. Durante el verano y el otoño existe relación pero la reducción en la disponibilidad de agua por evapotranspiración, tiende a la disminución del NDVI. Pero estos factores no explican la variación interanual y las tendencias registradas en el mediano plazo.

Tabla 1: Resumen estadístico estacional y anual.

| MESES    | OTOÑO  | INVIERNO | PRIMAVERA | VERANO | MEDIA ANUAL |
|----------|--------|----------|-----------|--------|-------------|
| DESVIO   | 0,064  | 0,038    | 0,037     | 0,054  | 0,040       |
| PROMEDIO | 0,637  | 0,571    | 0,640     | 0,606  | 0,609       |
| CV       | 10,071 | 6,742    | 5,733     | 8,942  | 6,539       |
| r        | 0,436  | 0,555    | 0,657     | 0,523  | 0,716       |
| p        | 0,050  | 0,025    | 0,010     | 0,025  | 0,010       |

La distribución espacial del NDVI presenta diferencias marcadas a lo largo del país (figura 2). Los mayores valores ( $>0.76$ ) se localizan, al noreste y sureste del país, producto de la mayor concentración de plantaciones forestales (pinos y eucaliptos). La primera asociada a suelos profundos de texturas livianas y la segunda sobre suelos superficiales de texturas medias con

pendientes fuertes. Los valores intermedios ( $>0.66$ , y  $<0.75$ ) ocupan las mayores áreas del país principalmente en la zona centro sur y centro oeste, área de predominio de la ganadería extensiva asociada a la presencia de praderas naturales. Los menores valores ( $<0.65$ ) se concentran en el centro norte asociados a los suelos superficiales con poca retención de agua y muy vulnerables a las sequías, y en la zona este sobre el área de influencia de la laguna Merín asociada a la producción de arroz, área que gran parte del año permanecen bajo inundación.

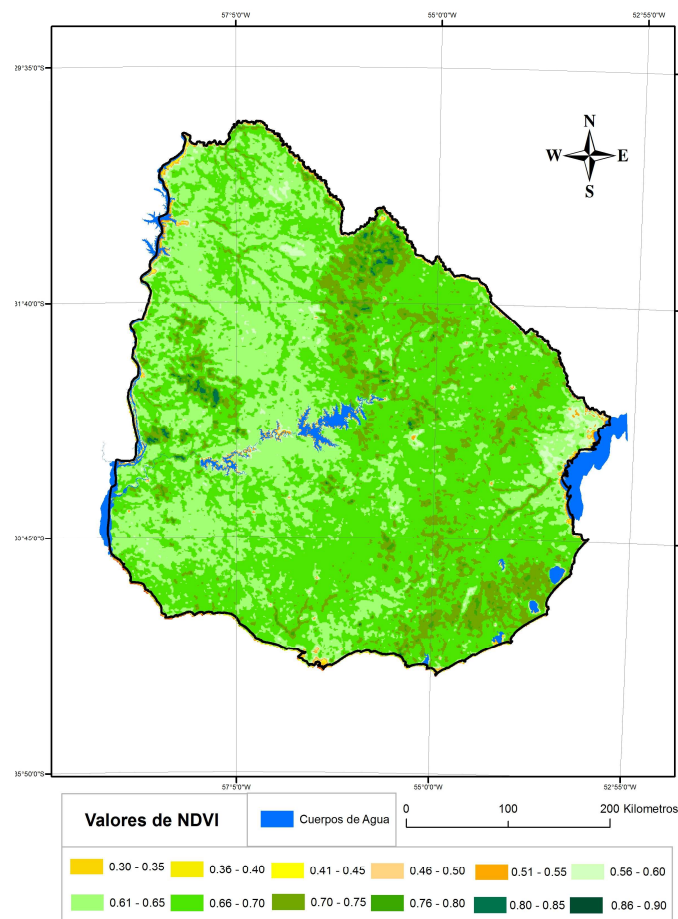


Figura 2: Valores medios anuales del NDVI período Abril 1998-Marzo 2012

En la figura 3, se muestran los resultados del NDVI para cada estación, como se puede observar, las diferencias entre las estaciones presentan un patrón espacial bien definido, siendo la primavera y el invierno las estaciones más espacialmente homogéneas en el país, variando en sus magnitudes, la primavera con los mayores registros de productividad y el invierno con los menores. En el invierno se destaca que la zona suroeste, presenta los registros más bajos, producto del aumento de la veranización de la agricultura, lo que genera que durante el invierno muchas chacras queden sin cobertura o con los rastrojos del cultivo de verano, principalmente el cultivo de soja. Para el otoño y el verano se observa una clara diferencia entre el este y oeste, destacando la zona oeste con los menores valores y la zona este con los mayores registros. En ambas estaciones se manifiesta una transición abrupta en pocos kilómetros, principalmente en la zona norte, debido a un cambio litológico, se pasa de la cuesta basáltica noroeste a la cuenca sedimentaria del noreste. Lo que es coincidente con la distribución de las provincias biogeográficas y geomorfológicas en el país (Chebataroff, 1951, Panario, 1987). También se observa que durante el verano la zona de influencia de la laguna



Merín presenta los mayores valores debido a que el cultivo de arroz y las praderas bajas se encuentran en la etapa de mayor crecimiento.

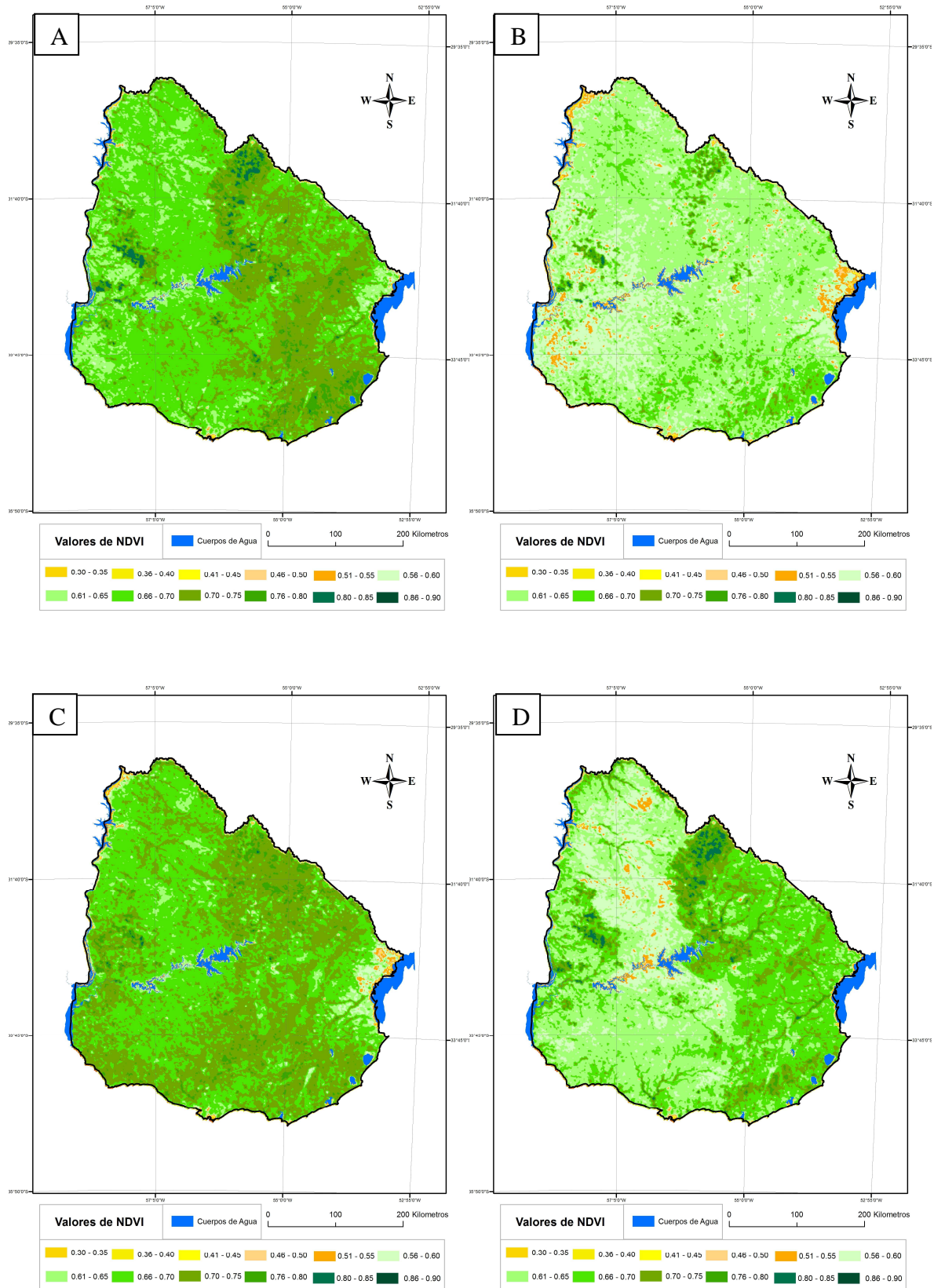


Figura 3: Valores Medios estacionales de NDVI período Abril 1998-Marzo 2012.

**A:** Otoño, **B:** Invierno, **C:** Primavera, **D:** Verano.

#### 4. Conclusiones.

El presente trabajo evidencia que existe una diferenciación clara del NDVI a nivel estacional, en su expresión tanto espacial como temporal, durante los últimos 14 años en el Uruguay, y una tendencia clara en el periodo de descenso de la productividad. Estos resultados parecen reflejar los cambios sostenidos en la cobertura vegetal que ocurren en el territorio uruguayo, en el periodo de desarrollo de la forestación y la agricultura.

A su vez, el estudio generó un primer insumo actualizado sobre el NDVI a escala país mediante imágenes SPOT, permitiendo confirmar las diferencias existentes en el espacio agrario uruguayo. Resulta importante continuar monitoreando el comportamiento de la productividad primaria del país en series temporales de mayor duración, de esta forma se podrá mejorar la interpretación de la tendencias registradas o bien como un proceso de descenso consolidado y que debe ser estudiado en profundidad o bien si se trata de un bucle en un ciclo de mayor duración temporal.

#### Agradecimientos

A Maria Laura Vidal Brasil por la traducción del resumen y a la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) por el apoyo de beca de posgrado.

#### 5. Referencias

- Achkar, M. **Evaluación de la distribución de la materia orgánica del horizonte superficial del suelo mediante el uso de imágenes satelitales, aplicación de metodología SIG**. 2005. 162 p. Tesis (Doctorado en Ciencias Agronómicas). ENSAT. Francia - Facultad de Ciencias. Montevideo.
- Arbeletche, P; Ernst, O; Hoffman, E. 2010 La agricultura en Uruguay y su Evolución. En: García Préchac et al. (Org). **Intensificación agrícola oportunidades y amenazas para un país productivo y natural**. CSIC. Montevideo. cap. 1, p. 13-28.
- Carreiras, J; Shimabukuro, Y; Pereira, J. Fraction images derived from SPOT-4 VEGETATION data to assess land-cover change over the State of Mato Grosso, Brazil. **Int. J. Remote Sensing**, 23(23):4979-83, 2002.
- Chebataroff, J. 1951. Regiones naturales del Uruguay y de Río Grande do Sul. *Revista Uruguaya de Geografía*, 2(4): 5-40.
- Chiesi, M; Maselli, F; Bindi, M; Fibbi, L; Cherubini, P; Arlotta, E; Tirone, G; Matteucci, G; Seufert, G. Modelling carbon budget of Mediterranean forests using ground and remote sensing measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, 135:22-34, 2005.
- Chirici, G; Barbati, A; Maselli, F. Modelling of Italian forest net primary productivity by the integration of remotely sensed and GIS data. **Forest Ecology and Management**, 246:285-95, 2007.
- Cihlar, J; Latifovic, R; Beaubien, J; Guindon, B; Palmer, M. Thematic Mapper (TM) based accuracy assessment of land cover product for Canada derived from SPOT4/VGT data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 29(2):154-70, 2003.
- Dirección Nacional de Meteorología (DNM). Características estacionales del clima. Disponible en: <<http://www.meteorologia.gub.uy/index.php/caracteristicas-estacionales-del-clima>>. Acceso: 20 Octubre 2012.
- Faccio, C. **Evaluación de la variación espacio temporal de la producción de biomasa en humedales mediante el uso de sensores remotos Santa Teresa – Rocha-Uruguay**. 2010. 78 p. Tesis (Licenciatura en Geografía) – Facultad de Ciencias, Universidad de la Republica, Montevideo.
- García Préchac, F; Ernst, O; Arbeletche, P; Bidegain, M.P; Pritsch, C; Ferenczi, A; Rivas, M. 2010. Intensificación agrícola: Oportunidades y Amenazas para un país productivo y natural. CSIC, 128 p.
- Guerschman, J., Paruelo, J., Di Bella, C., Giallorenzi, M., Pacin, F. Land cover classification in the Argentine Pampas using multi-temporal Landsat TM data. **Int. J. Remote Sensing**, 24(17):3381-402, 2002.
- Guissard, V. Defourny, P. Ledent, J. Crop specific information extraction based on coarse resolution pixel sampling. En: **International Users Conference**. Electronic format on the web the 2nd. June 2004. Antwerp, Belgium.
- Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Disponible en: <<http://www.gmes.info/pages-principales/services/land-monitoring/>> Acceso: 2 de Abril del 2012.
- Inter-American Institute for Global Change Research (IAI), **Newsletter**. V.2: 2011, 32 p.

- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). **Caracterización Agroclimática del Uruguay 1980-2009**. Montevideo. Serie Técnica N° 193, 2011. 35 p.
- Lhermitte, S; Verbesselt, J; Jonckheere, I; Nackaerts, K; Van Aardt, J.A.N; Verstraeten, W.W; Coppin, P. Hierarchical image segmentation based on similarity of NDVI time series. **Remote Sensing of Environment**, 112:506-521, 2008.
- Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP). **Plan de acción nacional de lucha contra la desertificación y la sequía**. Montevideo. Ed. MGAP Edición especial, 2005. p 168.
- Moulin, S; Zurita, R; Guérif, M; Baret, F. 2003. Characterizing the spatial and temporal variability of biophysical variables of a wheat crop using hyper-spectral measurements. En: **International Geoscience and remote sensing Symposium**, July 2003. Toulouse, Francia.
- Panario, D. 1988. *Geomorfología del Uruguay, Propuesta de un marco estructural y un esquema de evolución del modelado del relieve uruguayo*. Departamento Publicaciones - Facultad de Humanidades y Ciencias, UdelAR, Montevideo. 32 p.
- Paruelo, J., Epstein, H, Lauenroth, W., Burke, I. ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the US. **Ecology**, 78:953-58, 1997.
- Paruelo, J.M; Garbulsky, M.F; Guerschman, J.P; Jobbágy, E.G. Two decades of Normalized Difference Vegetation Index changes in South America: identifying the imprint of global change. **International Journal of Remote Sensing** 25:2793- 2806, 2004.
- Paruelo, J. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. **Ecosistemas. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente**, 17(3):4-22, 2008.
- Prince, S.D. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, 12:1313-1330, 1991.
- Programa de las naciones unidas para el desarrollo (PNUD). **Geo Uruguay: Informe del estado del ambiente**. Montevideo. 2008, 349 p.
- \_\_\_\_\_. (PNUD). **Uruguay: El cambio climático aquí y ahora**. Montevideo, 2007. 36 p
- Samanta, A; Costa, M. H; Nunes, E.L; Vieira, S.A; Xu, L; Myneni, R.B. Comment on "Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 200 Through 2009". **Science**, 333:1093-1094, 2011.
- Sellers, P.J. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. **International Journal of Remote Sensing**, 6:1335-1372, 1985.
- Seyler, F., Chaplot, V., Muller, F., Cerri, C. E. P., Bernoux, M., Ballester, V., Feller, C., Cerri, C. Pasture mapping by classification of Landsat TM images. Analysis of the spectral behaviour of the pasture class in a real medium-scale environment: the case of the Piracicaba Catchment (12 400 km<sup>2</sup>, Brazil). **Int. J. Remote Sensing**, 23(23):4985-5004, 2002.
- Soegaard, H; Jensen, N. O; Boegh, E; Hasager, C. B; Schelde, K; Thomsen, A. Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modelling. **Agricultural and Forest Meteorology**, 114:153-73, 2003.
- Tarnavsky, E.; Garrigues, S.; Brown, M.E. Multiscale geostatistical analysis of AVHRR, SPOT-VGT, and MODIS global NDVI products. **Remote Sensing of Environment**, 112:535-49, 2008.
- Telesca, L; Lasaponara, R. Quantifying intra-annual persistent behaviour in SPOT-VEGETATION NDVI data for Mediterranean ecosystems of southern Italy. **Remote Sensing of Environment**, 101: 95-103, 2006.
- Tucker, C. Resolution of grass canopy biomass classes. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 43:1059-67, 1977.
- Tucker, C. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, 8:127-50, 1979.
- Xiao, X; Boles, S; Liu, J; Zhuang, D; Liu, M. Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 Vegetation sensor data. **Remote Sensing of Environment**, 82:335-48, 2002.
- Zhang, C; Jordan, C; Higgins, A. Using neighbourhood statistics and GIS to quantify and visualize spatial variation in geochemical variables: An example using Ni concentrations in the topsoils of Northern Ireland. **Geoderma**, 13:466-476, 2007.
- Zhao, M., Running, S.W. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 200 Through **Science**. 329:940-942, 2009.