

Utilización del EVI e Índice de Área Foliar en el análisis de tendencias de rendimiento en girasol

Farrell, Mauricio ¹; Raúl Rivas ²

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA. Ruta 5, km 580, Anguil, 6326, provincia de La Pampa, Argentina.

² Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo J. Usunoff” (UNCPBA – CIC – Municipalidad de Azul), Sede Tandil, Pinto 399, B7000GHG Tandil, provincia de Buenos Aires, Argentina.

Correos electrónicos: mfarrell@anguil.inta.gov.ar

1. Introducción

La estimación de rendimiento de cereales y oleaginosas es considerada prioridad en muchos centros de investigación debido a la relevancia que presenta la producción de granos como alimentos y bioenergía. El uso de sensores remotos para caracterizar tipos, distribución y producción de cultivos ha sido una herramienta valiosa para organismos de diferentes procedencias (Allen *et al.*, 2002), donde en la actualidad, el estudio de la dinámica en la fenología de la vegetación ha cobrado un papel importante (Mineny *et al.*, 2002; Reed *et al.*, 1994).

La modelación de una variable, que utiliza datos de sensores remotos establece una relación numérica entre éste y determinados parámetros vegetales, cuya técnica de ajuste es la regresión en sus diversas variantes (Ahern *et al.*, 1991; Alonso *et al.*, 1996), aunque también hay ejemplos de ajustes mediante redes neuronales (Baret, 1995).

Uno de los parámetros vegetales más usados en la estimación de la productividad es el Índice de Área Foliar (LAI, en inglés Leaf Area Index), que en la aplicación de datos de sensores remotos involucra una transformación en la reflectancia espectral llamado índices de vegetación (Rouse *et al.*, 1974). Soria *et al.* (2000) reconocen la aptitud del Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) en la etapa de máximo LAI en maíz para estimar el rendimiento con datos captados por el sensor Thematic Mapper. (TM).

Los índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes captadas por el sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) proveen mejoras en las medidas de la condición vegetal (Tuckers *et al.*, 2005). La mejora se logra a partir de la aplicación del Enhanced Vegetation Index (EVI), que a diferencia del NDVI, incorpora coeficientes de corrección atmosférica.

En comparación con el NDVI, en el EVI se ha encontrado una relación directa y consistente con el LAI en áreas con cultivo (Boeght *et al.*, 2002) productividad primaria neta (PPN) (Baret y Guyot, 1991), biomasa, cobertura de la canopia y la radiación fotosintéticamente activa, siendo provechosa su utilización para monitoreo estacional e interanual, a la vez de analizar los cambios estructurales de la vegetación (Huete *et al.*, 2002), menor saturación en coberturas vegetales con alta tasa de crecimiento (Huete *et al.*, 2006; Xiao *et al.*, 2004) y mínima sensibilidad a la contaminación de residuos de aerosoles (Miura *et al.*, 1998; Xiao *et al.*, 2003). Estas relaciones permiten aplicar modelos que explican la dinámica del medioambiente a diferentes escalas (Milner *et al.*, 1996).

Por otra parte, en cultivos de girasol, el máximo valor de área foliar (AF) es alcanzado cuando el cultivo se encuentra entre el estado fenológico de principio de antesis (PA) y antesis de flores centrales (UA), que coincide con el 50% de la floración.

Sin embargo las condiciones ambientales determinan que se manifieste o no la capacidad potencial de producción de AF. Las altas correlaciones encontradas entre rendimiento (R) y AF explica la dependencia de éste con el porcentaje de radiación interceptada por el cultivo.

El objetivo de este trabajo es analizar la relación existente entre los valores de Enhanced Vegetation Index y el rendimiento en cultivos de girasol ubicados en la planicie con tosca de la Región Semiárida Pampeana (RSP) del centro de la provincia de La Pampa, Argentina.

1.1. Parámetros vegetales del cultivo de girasol

En girasol, el AF depende del número de hojas y del área que alcance cada una de ellas. Durante la etapa de emergencia del botón floral (EBF) el número de hojas se encuentra definido, sin embargo, la expansión foliar del cultivo es relativamente pequeña. Las condiciones del ambiente imperantes (precipitación y tipo de suelo entre otras) pueden modificar tanto el número de hojas como la tasa de expansión final.

Por su parte el crecimiento del 95 % del LAI en girasol ocurre desde el periodo que se extiende desde el estado fenológico de PA hasta UA (Figura 1).

La fecha de siembra y la cantidad de plantas (pl) por ha son factores que determinan los momentos de aparición de los estados fenológicos.

Las altas correlaciones encontradas entre el rendimiento y el LAI explican porque en girasol el R es principalmente dependiente del porcentaje de radiación interceptada por el cultivo (Figura 2).

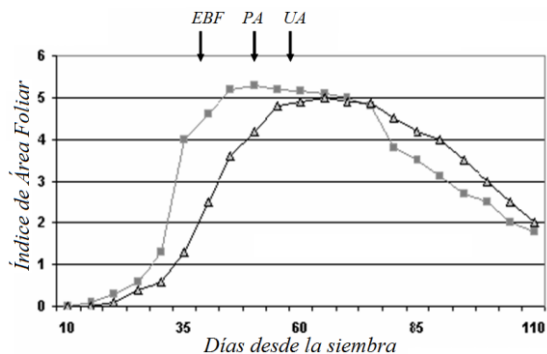


Figura 1. Evolución del LAI en girasol durante el ciclo del cultivo a dos diferentes densidades de siembra: 5,6 pl m⁻² (triángulos) y 16,6 pl m⁻² (cuadrados) (Tomado de Hernandez y Orioli, 1982).

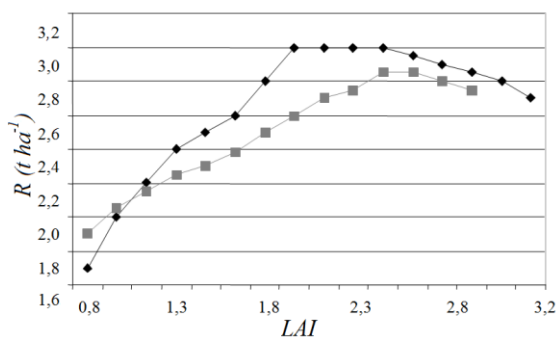


Figura 2. Evolución del rendimiento por unidad de superficie en relación al índice de área foliar. Línea negra cultivar ciclo corto, Línea gris cultivar de ciclo largo (Tomado de Cardinali *et al.*, 1985).

1.2. El Enhanced Vegetation Index

El principio en que se apoyan la mayor parte de los índices de vegetación, surgen de la combinación de la banda roja e infrarrojo cercano del espectro electromagnético, cuyo empleo de los cocientes se utiliza para discriminar masas vegetales que se deriva del comportamiento espectral de la vegetación.

Entre ellos se cita al NDVI que se genera a partir de la diferencia normalizada entre las reflectividades de las bandas visible e infrarroja del espectro electromagnético (Rouse *et al.*, 1974).

A diferencia del NDVI, el EVI incorpora la banda azul en adición a la banda roja e infrarroja del espectro. El EVI obtiene respuesta de las variaciones estructurales del dosel vegetal incluyendo el LAI, tipo y arquitectura del dosel y fisonomía de la planta, siendo desarrollado para optimizar la señal de la vegetación con sensibilidad mejorada para alta densidad de biomasa, logrado a partir de la separación de la señal proveniente de la vegetación y la influencia de la atmósfera. La expresión de cálculo del índice EVI se muestra en la Ecuación 1: (Huete *et al.*, 2002):

$$EVI = \frac{A(\rho_{nir} - \rho_r)}{(1 + \rho_{nir} + B.\rho_r - C.\rho_b)} \quad 1)$$

donde ρ_{nir} es la reflectividad en el infrarrojo cercano, ρ_r es la reflectividad en el rojo, ρ_b reflectividad en el azul, A es el factor de ganancia, B es el coeficiente de corrección atmosférica para la banda roja y C es el coeficiente de corrección atmosférica para la banda azul.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio e información utilizada

El presente trabajo se realizó durante la campaña agrícola 2007-2008 en donde se relevaron 41 lotes con girasol ubicados en un ambiente de la planicie con tosca (PT) entre las coordenadas 35, 21° Sur; 64,26° Oeste; y 36,08° Sur; 63,71° Oeste (Figura 3).

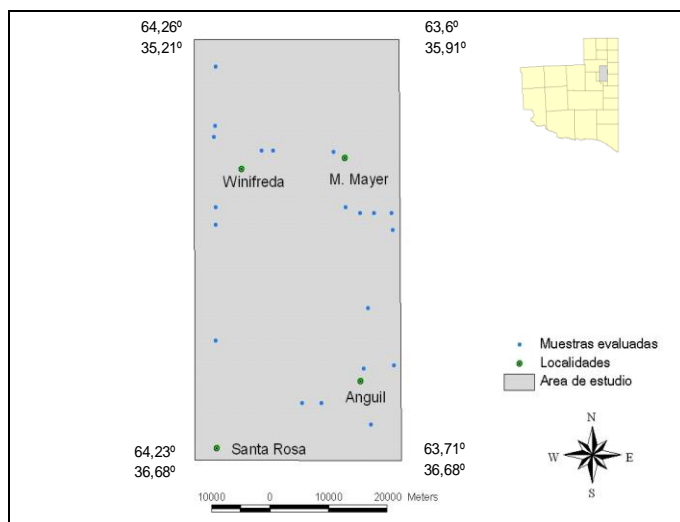


Figura 3. Localización del área de estudio, lotes evaluados y localidades con estaciones pluviométricas.

Los suelos del área de estudio, en general, poseen textura franca-arenosa y franco-limosa con una limitante en la profundidad del perfil por la presencia de un manto de tosca que se localiza entre 0,3 m y 1,5 m.

Las precipitaciones registradas en el periodo desde agosto a febrero fueron variables. Los meses de agosto y diciembre presentaron menores precipitaciones en relación al registro histórico (1921-2006), en comparación con los meses de enero y febrero donde los registros observados fueron superiores al promedio histórico. En la Figura 4 se muestra el comportamiento de las precipitaciones (totales mensuales) y los promedios históricos (1921-2006) para las estaciones pluviométricas incluidas en el área de estudio.

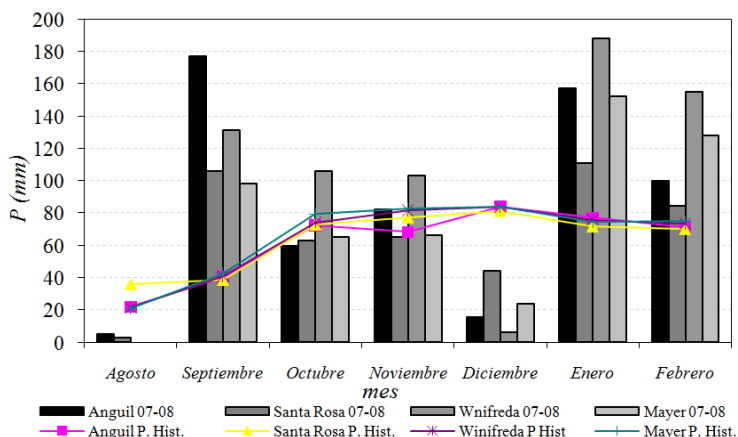


Figura 4. Distribución mensual de la P (totales mensuales) comparados con el valor promedio histórico desde agosto a febrero para todas las estaciones pluviométricas.

Del total de los lotes relevados, se utilizaron 20 en los cuales se procedió a medir el LAI según el método que utiliza como dato de entrada el ancho y largo de la hoja, multiplicado por un coeficiente 0,69 (Aston, 1967). Las mediciones de LAI se realizaron durante la segunda quincena del mes de diciembre y enero, coincidente con el estado fenológico de iniciación de EBF y PA-UA respectivamente.

Con la identificación previa de los lotes se procedió a analizar la condición del cultivo con el uso de productos EVI de la quincena anterior. Esta situación permitió establecer sitios homogéneos de muestreo. La medición del LAI se realizó con 3 repeticiones de 15 plantas cada uno dentro de cada sitio determinado.

Con el resto de los lotes (21), en los que se conoce el R al momento de la cosecha, fue utilizado para evaluar la precisión del algoritmo hallado.

En el trabajo se utilizaron datos del sensor MODIS (a bordo de la plataforma TERRA) correspondientes al mismo periodo de determinación del LAI a campo. Las imágenes son distribuidas por Land Processes Distributed Active Archive Center (LPDAAC).

La información corresponde a un compilado de 16 bandas llamado MODIS TERRA Vegetation Index L16 day L3 global 250 m SIN GRID V 005- (EOS, 2004) entre los cuales se encuentran los productos NDVI, EVI y las correspondientes a la reflectividad en el rojo e infrarrojo del espectro electromagnético (Huete, 2002). La resolución espacial del producto es de 250 m por 250 m (6,25 ha en el terreno). Para este estudio se utilizó la banda EVI. Posteriormente todas las imágenes fueron reproyectadas a faja 4 Gauss Krugger (WGS84).

Por último se realizó la extracción de la información espectral de cada imagen y para cada lote y se analizó estadísticamente la información generada.

3. Resultados

En la Tabla 1 se presentan los resultados del LAI y EVI para la segunda quincena de diciembre y enero y R (valores promedio) del conjunto de lotes.

En la Figura 5-a se muestran las correlaciones entre EVI y LAI cuando los cultivos se encontraban en la fase de EBF. En la Figura 5-b se muestran las correlaciones entre los valores EVI y LAI cuando los cultivos se encontraban en la etapa de IA - UA.

Tabla 1. Variación de los datos de EVI y LAI y R (Kg ha⁻¹) de girasol para el grupo de lotes evaluados.

	<i>EBF</i>		<i>IA -UA</i>		<i>R</i>
	LAI	EVI	LAI	EVI	
Máximo	1,55	0,56	2,35	0,59	2300
Mínimo	0,42	0,29	0,93	0,33	800
Promedio	1,24	0,40	1,57	0,43	1466
Desviación	0,7	0,08	0,42	0,06	440

Durante el mes de diciembre los cultivos se encontraban en la etapa de EBF que coincide con el final de la etapa vegetativa y el inicio de la etapa reproductiva. En esta etapa se observaron lotes con altos valores de EVI y bajos de LAI, lo que generó baja correlación (r^2 0,34). Los altos valores de EVI observados en algunos lotes durante este periodo se debieron a la alta densidad de malezas en el entresurco.

En el análisis de los datos que corresponden al mes de enero se observó una correlación más alta (r^2 0,82) debido a que la mayoría de los lotes evaluados se

encontraron en el estado fenológico de PA y UA, coincidiendo con el máximo LAI.

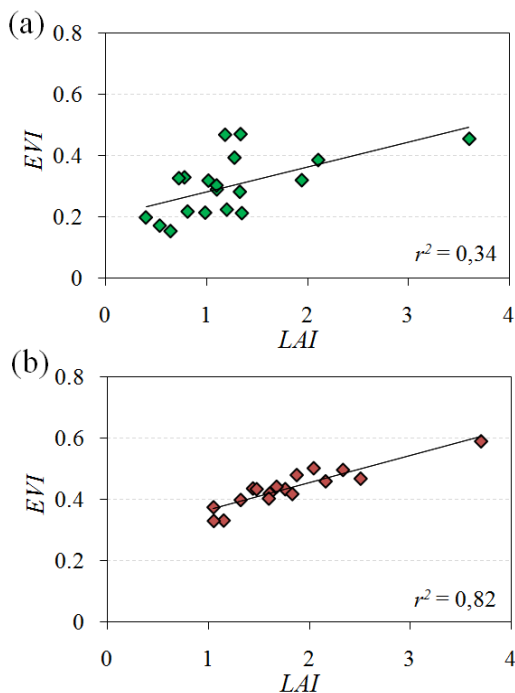


Figura 5. Relación entre EVI y LAI para los meses de diciembre (a) y enero (b).

La Figura 6 muestra la dispersión de puntos y la recta ajustada a partir de los datos de EVI correspondiente a la segunda quincena del mes de enero y R (Kg ha^{-1}) para el conjunto de lotes analizados (Ecuación 2).

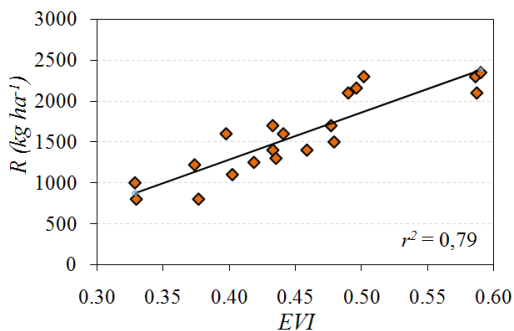


Figura 6. Relación entre rendimiento y el índice EVI.

El análisis de la varianza para el conjunto de datos arrojó una relación lineal entre R y EVI ($p < 0,01$). Tomando la información sobre los coeficientes de regresión se puede escribir la ecuación del modelo de rendimiento ajustado por medio de:

$$R(\text{Kg ha}^{-1}) = 5776 \cdot \text{EVI} - 1026 \quad (2)$$

El modelo hallado muestra que en la estimación del R para lotes de bajo R observado ($387 - 800 \text{ kg ha}^{-1}$) se hallan las mayores sobreestimaciones (30 y 50%). La razón es debida al alto valor del EVI durante la etapa de PA -UA (LAI alto) y la probable ocurrencia de un estrés hídrico en etapas fenológicas posteriores al de floración puede provocar una merma importante en el rendimiento observado.

En la Tabla 2 puede observarse el comportamiento de las diferencias (Kg ha^{-1}) entre R observado y estimado con el modelo ajustado en los 21 lotes prueba correspondiente al área de estudio.

Tabla 2. Diferencias entre R observado y estimado a través de la Ecuación 2.

<i>Lote n°</i>	<i>R observado (Kg ha⁻¹)</i>	<i>R estimado (Kg ha⁻¹)</i>	<i>Diferencia (kg ha⁻¹)</i>
1	1430	1288	-142
2	1496	1863	367
3	2300	1996	-304
4	1880	2280	400
5	700	923	223
6	500	728	228
7	1931	1573	-358
8	540	829	289
9	999	606	-393
10	387	585	198
11	1179	1007	-172
12	1814	1423	-391
13	1748	2029	281
14	1800	2203	403
15	1457	1458	1
16	2461	2769	308
17	2300	2492	192
18	820	1128	308
19	1711	1512	-199
20	1800	1699	-101
21	846	707	-139

En la Figura 7 se muestra el diagrama de comparación entre valores observados y estimados para los 21 lotes considerados en el análisis. Es posible

notar que los valores no se alejan de la función identidad y a la vez se evidencia la sobreestimación para rendimientos altos.

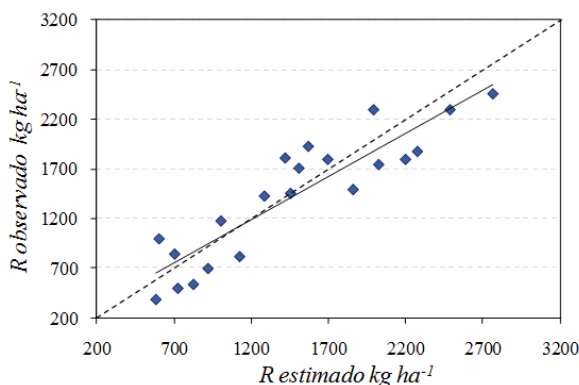


Figura 7. Dispersión entre R observado y estimado (la línea punteada indica la recta 1:1).

4. Conclusiones

Los resultados indican una relación lineal y consistente entre datos de índice de vegetación obtenidos desde Enhanced Vegetation Index proveniente del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) y el rendimiento de girasol para lotes ubicados en la Planicie con tosca en la provincia de La Pampa. Esta relación se observa durante la etapa fenológica principio de antesis y antesis de flores centrales, que coincide con el 50% de la floración de los cultivos.

El modelo validado a través de las muestras prueba arrojó un error relativo de estimación de 4,2 % con tendencia a sobreestimar para rendimientos bajos del orden de los 278 Kg ha⁻¹.

La relación entre productos Enhanced Vegetation Index derivados de imágenes TERRA como el utilizado para el presente trabajo y determinados parámetros vegetales como el LAI lo hacen viable para estimaciones de tendencias de rendimiento a escala regional. Sin embargo queda por analizar en el futuro el uso de otros sensores (misiones SPOT, DEIMOS, LANDSAT, CBERS, SAC-C) o combinación de diferentes resoluciones (IKONOS-SPOT por ejemplo) a fin de introducir mejoras en el análisis de rendimiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) por los fondos otorgados para el desarrollo del trabajo y al Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) por facilitar los sensores de terreno para la realización de

las experiencias. Además, agradecemos a los ayudantes técnicos O. De Ponga y J. Fraile por su incondicional apoyo en las tareas de campo.

Referencias

1. Allen, R.; Hanuschak, G.; Craig, M. History of remote sensing for crop acreage in USDA National Agricultural Statistic Service. 2002.
2. Alonso, M.; Camarasa, A.; Chuvieco, E.; Cocero, D.; Kyung, I. Estimating temporal dynamics of fuel moisture content of Mediterranean species from NOAA - AVHRR data. *EARSEL Advances in Remote Sensing* 1996, 4, 9–24.
3. Ahern, F.; Erdle, T.; Maclean, D.; Knepeck, I. A quantitative relationship between forest growth rates and Thematic Mapper reflectance measurements. *International journal of Remote Sensing* 1991, 387–400.
4. Aston, J. The relationship between transpirations and water uptake of sunflower (*Helianthus Annus*) var Advance in relation to some environmental factor. Ph. D Thesis, University of California. Davis. 1967.
5. Baret, F.; Guyot, G. Potentials and limits of vegetations indices for LAI and APAR assesment. *Remote Sensing Environment* 1991, 46, 213-222.
6. Baret, F. Use of spectral reflectance variation to retrieve canopy biophysical characteristic. En *Advances in Environmental Remote Sensing 1995* (F.M. Danson and S. E. Plummer, Eds) John Wiley & Sons. Chichester, 33 – 51.
7. Boegh, E.; Soegaard, H.; Broge, N.; Hasager, C.; Jensen, N. Airbone multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment* 2002, 81, 273-285.
8. Cardinali, F.; Orioli, G. Comportamiento de dos híbridos de girasol a bajas densidades de siembra. *Rev. Fac de Agronomia* 6: 1985b, 131–139.
9. EOS. 2004. NASA Earth Obserbing System data gateway. Available at: [http://:edcimswww.cr.usgs/pub/imswelcome](http://edcimswww.cr.usgs/pub/imswelcome).
10. Hernandez, L.F.; Orioli, G.A. Growth analysis og irrigated sunflower at two plant populations. X International Sunflower Conference Proceedings, 1982a Surfers Paradise, Australia, 18-21
11. Huete, A.; Didan, K.; Ratana, P.; Shimabukuru, Y.; Saleska, C.; Hutyra, L. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical research Letters* 2006, p 33.
12. Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E.; Gao, X.; Ferreira, L. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetations indices. *Remote Sensing of Environment* 2002, 83, 195-213.
13. Miura, T; Huete, A; Van Leeuwen, W. Vegetation detection through smoke-filled abrís images. An assesment using MODIS bans passes. *Journal of Geophysical Research* 1998, 103, 32001-32011.

14. Milner, K.; Urng, S.; Coble, D. A biophysical soil-site model for estimation potential productivity of forested landscape. *Can J. For. Res.* 1996, 26, 1174–1186.
15. Myneni, R.; Hoffman, S.; Knyazikkin, Y.; Privette, J. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 2002, 83, 214-231.
16. Reed, B.; Brown, J.; Vanderzee, D.; Loveland, T.; Merchant, J. Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science* 1994, 5, 703-714.
17. Rouse, J.; Haas, R.; Schell, J.; Deering, D. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC. Final report, 1974. Greenbelt. 371 pp.
18. Soria, R.; Ortiz, C.; Islas, G.; Volke, H. Sensores remotos: Principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales. Experiencias en México. Primera edición. Publicación especial n° 7. 1998. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.
19. Tuckers, J.; Pinzon, E.; Brown, E.; Slayback, A. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing* 2005, 26, 4485-4498.
20. Xiao, X.; Hollinger, D.; Aber, J.; Goltz, M.; Davinson, E.; Zhang, Q. Satellite based modelling of gross primary production in an evergreen needle leaf forest. *Remote Sensing of Environment* 2004, 89, 519-534.
21. Xiao, X.; Braswell, B.; Zhang, Q.; Boles, S.; Froking, S.; Moore, B. Sensitivity of vegetation indices to atmospheric aerosols: Continental scale observations in North en Asia. *Remote Sensing of Environment* 2003, 103, 465-473.