

Seguimiento de áreas anegadas en llanuras mediante sensores remotos

Evelyn Figueroa Schibber^{1,2}, Alfredo N. Campos^{1,3}, Carlos M. Di Bella^{1,2}

- (1) Instituto de Clima y Agua - Instituto de Nacional Tecnología Agropecuaria (CIRN-INTA Castelar), Hurlingham, Buenos Aires, Argentina.
- (2) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Argentina.
- (3) Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires (UTN-FRBA), CABA, Argentina.
acampos@cnia.inta.gov.ar

Resumen:

El anegamiento es la respuesta con la cual una llanura amortigua los excedentes de agua. En la provincia de Buenos Aires (BsAs) los anegamientos impactan fuertemente en la actividad económica y social, siendo determinante el estudio de su ocurrencia. En las últimas décadas la teledetección ha estudiado la ocurrencia de las áreas anegadas mediante imágenes LANDSAT. En este trabajo se propone la utilización de imágenes MODIS para estudiar la evolución de las aguas alojadas en superficie en ocho partidos del noroeste de la provincia de BsAs. Se generó cartografía que da cuenta de la recurrencia de anegamiento, y se obtuvieron series temporales que muestren la dinámica del área anegada en cada partido. Las imágenes MODIS demostraron su capacidad para el seguimiento de las variaciones de zonas anegadas debido a su alta periodicidad temporal, siendo el único aspecto desfavorable su resolución espacial, la cual no permite detectar pequeños anegamientos.

Palabras claves: Anegamiento, árbol de decisión, Llanura Pampeana

1 Introducción

Las planicies sedimentarias subhúmedas presentan desafíos hidrológicos únicos. En las hiper-llanuras las redes de evacuación de agua en sentido horizontal son incipientes y de muy escasa pendiente, con lo cual las mayores pérdidas de agua son en sentido vertical por evaporación de agua (1). Cambios relativamente pequeños en el balance hídrico dados por cambios de precipitación (i.e. input) o cambios de cobertura vegetal (i.e. partición vapor/líquido) pueden producir efectos desproporcionadamente mayores en el sistema hidrológico, afectando el rendimiento hídrico y las tasas de recarga freática. Es por ello que estos sistemas son capaces de traducir fácilmente los excesos hídricos en pro-

cesos de anegamiento (1; 2). En la llanura del noroeste de la provincia de Buenos Aires estos aspectos se ven acrecentados ya que la zona presenta la particularidad de no poseer estructuras de escurrimiento lineal organizadas o jerarquizadas que posibiliten el drenaje de agua. Por lo tanto, este sistema amortigua los excesos hídricos mediante la acumulación superficial de agua en las depresiones existentes, y resuelve los déficits hídricos estacionales utilizando, e incluso mermando, el agua subterránea que ha sido almacenada en períodos anteriores. Esta llanura en particular ha estado sujeta a eventos de sequías e inundaciones cuyo impacto económico y social se aprecia durante los últimos tres siglos (3), ya que las planicies de la Pampa albergan algunos de los suelos más fértiles y sistemas agrícolas más productivos de Sudamérica (~70 Millones de toneladas de granos por año) y es el cinturón agrícola más económicamente activo y poblado de Argentina.

Una alternativa a la medición de variables hidro-meteorológicas se basa en el uso de sensores remotos (4). Actualmente estos sensores ofrecen la oportunidad de estudiar regiones espacialmente amplias mediante información objetiva, periódica, económicamente viables y con poca dispersión. Además, las mediciones remotas pueden ser representadas en el espacio, mostrando patrones que se mantienen ocultos cuando los datos se encuentran en tablas (5). Usualmente el desafío de los sensores remotos consiste en relacionar la información captada por los distintos sensores espectrales y las variables a estudiar, teniendo en cuenta una periodicidad temporal y una resolución espacial que resulten adecuadas.

La detección de superficies cubiertas por agua es uno de los temas clásicos de la teledetección (6), y esta información presenta la particularidad de proveer mediciones consistentes, lo que posibilita la detección de cambios tanto abruptos como graduales (7). Para la detección de zonas anegadas existe una multiplicidad de técnicas como ser: fotointerpretación (8), utilización de imágenes de radar (9; 10; 11), imágenes multiespectrales (6; 8; 12., 13; 14). En todos estos casos las imágenes LANDSAT son tomadas como fuente de referencia para la detección de áreas anegadas.

En este trabajo se propone la utilización de imágenes provenientes de la plataforma TERRA para estudiar la evolución de los cuerpos de agua alojados en superficie en ocho partidos del noroeste de la provincia de BsAs. Para ello se generará cartografía que dé cuenta de la recurrencia de anegamiento, y se obtendrán series temporales que muestren la dinámica del área anegada en cada partido

2 Materiales y Métodos

2.1 Área De Estudio

El área de estudio comprende los departamentos Florentino Ameghino (FA), Gral. Arenales (GA), Leandro N. Alem (LA), General Pinto (GP), Pehuajó (Pe), Trenque Lauquen (TLa), Tres Lomas (TLo) e Hipólito Yrigoyen (HY) (Fig. 1). Forman parte de la Llanura Pampeana, específicamente de la Pampa Interior, y a su vez esta forma parte de los pastizales del Río de La Plata, cuya extensión suma 70 millones de hectáreas entre Argentina, Brasil y Uruguay (15). Originalmente fue ocupada por pastizales naturales (16), pero actualmente es ocupada por cultivos anuales y pasturas, representando una de las áreas más productivas del país (17; 18). El clima es templado con una temperatura media de 16 C° y una precipitación media anual de 980 mm (19; 20). Las lluvias se concentran en el verano y al principio del otoño, disminuyendo considerablemente en el invierno. Los suelos son en su mayoría Molisoles de textura arenosa, y el nivel de la napa freática está cercana a la superficie en todo el territorio (menos de 5 metros) (21). La combinación del clima húmedo a subhúmedo y la topografía extremadamente plana hacen a esta región muy vulnerable a sufrir eventos de inundación (17; 20; 22). Es un paisaje con lagunas temporales y permanentes. Las lagunas permanentes varían en tamaño, dependiendo del nivel de la napa freática, la cual es regulada principalmente por el balance hídrico.

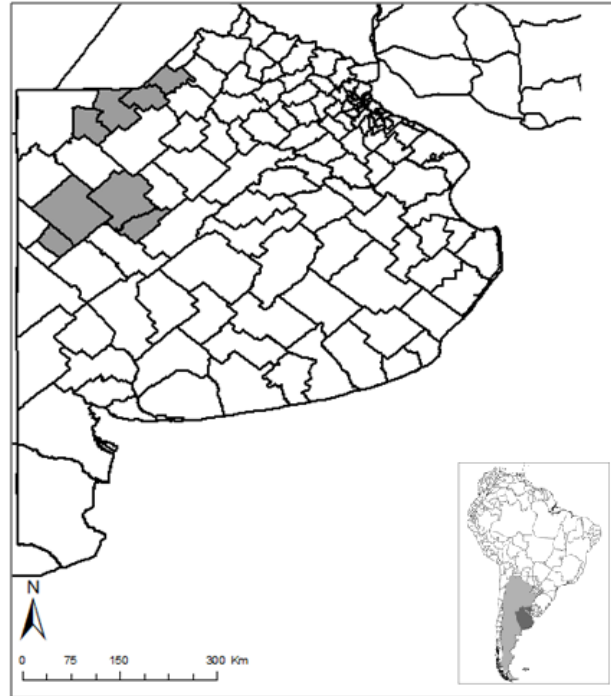


Fig. 1. Área de estudio. En gris los partidos en los cuales se realiza el estudio.

2.2 Información Satelital

Se utilizaron imágenes satelitales provenientes de dos plataformas, TERRA y LANDSAT5. Las imágenes tomadas por el sensor MODIS (MODerate resolution Spectroradiometer) sobre la plataforma TERRA brindan información en 36 bandas del espectro, con una resolución espacial entre 250m y 1km. Esta plataforma fue puesta en órbita en el año 2000. MODIS provee una amplia variedad de productos, entre los cuales se encuentra MOD09A1. Con la finalidad de reducir el efecto negativo que tiene la aparición de nubes y aerosoles sobre las imágenes, las mismas se encuentran en compuestos donde el valor del píxel corresponde al valor de mejor calidad del período. Este producto brinda información cada 8 días de reflectancia en 7 bandas espectrales, con una resolución espacial de 500m. Las imágenes provenientes de la plataforma LANDSAT (sensor Thematic Mapper) poseen 7 bandas del espectro electromagnético. La resolución espacial de estas imágenes es de 30m y la resolución temporal original es de 16 días, pero se ve fuertemente afectada por la aparición de nubosidad. Para disponer de información satelital de toda el área de estudio, se utili-

zaron las escenas MODIS h12-v13 y h12-v12 y las escenas LANDSAT 227-84 y 227-85 para el período comprendido entre el año 2000-2011. Se descargaron las imágenes MODIS y LANDSAT del U.S Geological Survey (<https://lpdaac.usgs.gov>). Las imágenes LANDSAT fueron corregidas radiométrica y geoméricamente y utilizadas como fuente de referencia de zonas anegadas (23).

2.3 Algoritmo de Clasificación

Para la clasificación de las imágenes satelitales se realizó un árbol de decisión (Aragón et al., 2010; Campos, 2013). En el diseño de aplicaciones informáticas, un árbol de decisión indica las acciones a realizar en función del valor de una o más variables.

La multiplicidad de información espectral que brindan las imágenes elegidas para este estudio permite el cálculo de índices espectrales, es decir, combinar las distintas bandas del espectro electromagnético para la generación de nueva información de síntesis que enfatiza las propiedades del agua. Para la clasificación en agua y no-agua se utilizaron dos índices espectrales que resaltan el comportamiento de absorción y reflexión del agua: i) el Índice de Vegetación Normalizado o NDVI (del inglés *Normalized Differences Vegetation Index*) y ii) el Índice de Agua Normalizado o NDWI (del inglés *Normalized Difference Water Index*).

El NDVI combina datos espectrales de la franja visible del espectro electromagnético en el rojo (R, longitud de onda: 620-670 nanómetros) y en el infrarrojo cercano (NIR, longitud de onda: 800-2500 nm), quedando definido como:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R}) \quad (1)$$

Este índice ha sido ampliamente utilizado para caracterizar la capacidad fotosintética de la vegetación. Sin embargo es muy útil para la detección de agua gracias a la gran capacidad de absorción de energía electromagnética en la porción del infrarrojo por parte del agua, y la gran reflexión del visible. Es decir, donde la superficie terrestre se encuentra cubierta de agua el NDVI es menor a 0, y donde la superficie se encuentra con vegetación el NDVI es mayor a 0.

El NDWI se utiliza como una medida de la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo. Este índice

combina datos espectrales de la franja del espectro electromagnético en el infrarrojo cercano (NIR, longitud de onda: 620-670 nanómetros) y en el infrarrojo medio (SWIR, longitud de onda: 2500-50000 nanómetros), quedando definido como:

$$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad (2)$$

En este caso, donde la superficie terrestre se encuentra cubierta de agua el NDWI es mayor a 0, y donde la superficie se encuentra con vegetación el NDWI es menor a 0.

3 Resultados y Discusión

3.1 Frecuencia de Inundación

A partir de las imágenes clasificadas en agua-no agua fue posible realizar mapas de frecuencia de anegamiento a partir de LANDSAT (Fig. 2A) y MODIS (Fig. 2B). En los mapas de recurrencia de inundación se observa que los departamentos del norte poseen menor recurrencia de anegamiento que los departamentos del sur. A su vez, es posible observar que los niveles de recurrencia en los partidos del norte son espacialmente más homogéneos que en el sur. Además, es posible apreciar la existencia de los cuerpos de agua permanentes “Florentino Ameghino” y “Pehuajó”. En ambos casos (norte y sur) para las imágenes LANDSAT, es posible ver un mayor número de zonas anegadas de escasa superficie y poca recurrencia.

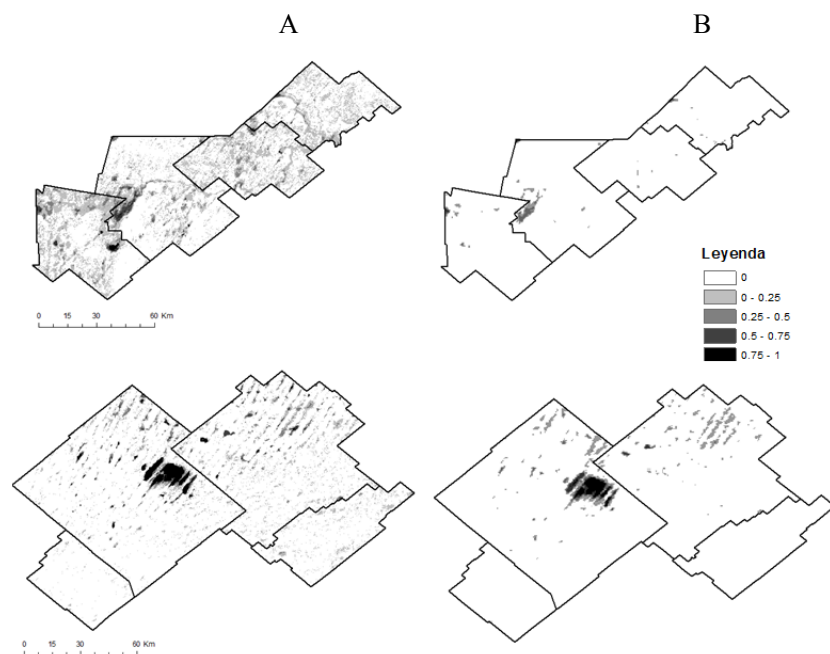


Fig. 2. Frecuencia de inundación para A) LANDSAT y B) MODIS. Arriba, de izquierda a derecha: Florentino Ameghino; Leandro N. Alem; Gral. Pinto; General Arenales. Abajo, de izquierda a derecha: Tres Lomas, Trenque Lauquen; Pehuajó; Hipólito Yrigoyen.

Al analizar la oportunidad que ofrecen las imágenes LANDSAT y MODIS para la generación de mapas de recurrencia de anegamiento, es posible encontrar virtudes y defectos en cada uno de los análisis. Las imágenes LANDSAT poseen una mayor resolución espacial que las imágenes MODIS, lo cual le permite detectar zonas anegadas de menor superficie. Las imágenes LANDSAT también permiten la identificación de cuerpos de agua transitorios (unos pocos días) que las imágenes MODIS no pueden detectar al tratarse de productos compuestos de 8 días (i.e. para que una imagen MODIS clasifique una zona como anegada, la misma deberá estar cubierta por agua al menos 8 días). Sin embargo, la cartografía de recurrencia generada con imágenes MODIS realiza una descripción temporal más real ya que la proporción de eventos de anegamiento que informa se calcula sobre un total de imágenes que se encuentran tomadas a intervalos regulares y más frecuentes. Con LANDSAT, en cambio, esto no ocurre ya que el intervalo entre dos imágenes sin cobertura nubosa es irregular.

En las series de tiempo logradas (Fig. 3) se observa que los departamentos ubicados al sur poseen un mayor volumen de anegamiento que los departamentos del norte. Esto se debe a que en los departamentos del sur se encuentran cuer-

pos lagunares permanentes de mayor superficie y que además las zonas intermédanos también son de mayor tamaño, permitiendo mayor almacenamiento superficial de agua. En todos los departamentos existe una tendencia a la disminución de las zonas anegadas, relacionadas con las grandes precipitaciones a principio del período de estudio (1998-2002) y con las sequías que siguieron luego, identificándose también picos locales de anegamiento asociado a períodos de mayor precipitación (e.g. el incremento de área anegada por las precipitaciones en 2007).

En cuanto a la capacidad de las imágenes obtenidas de ambas plataformas es posible apreciar que en general las imágenes MODIS entregan un menor porcentaje de área anegada que las imágenes LANDSAT, siendo la razón de esto la diferencia de resolución espacial. Sin embargo las series MODIS muestran mayor aptitud para identificar variaciones a diferentes escalas (e.g. intra-estacionales, estacionales e interanuales) debido a la resolución temporal de 8 días.

3.2 Series temporales de anegamiento

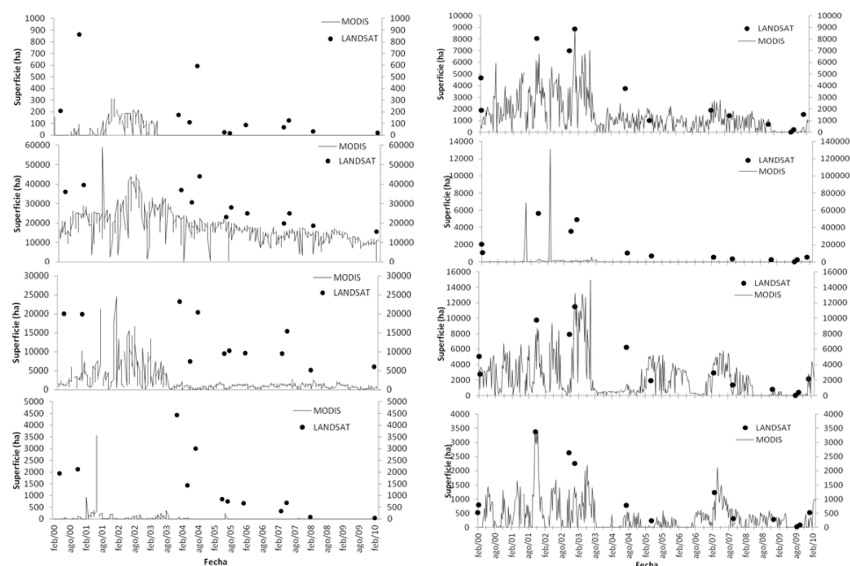


Fig. 3. A) Florentino Ameghino; B) Leandro N. Alem; C) Gral. Pinto; D) Gral. Arenales; E) Tres Lomas; F) Trenque Lauquen; G) Pehuajó; H) Hipólito Yrigoyen.

4 **Conclusión**

Si bien existe una vasta bibliografía donde se toma a las imágenes LANDSAT como fuente de referencia para el estudio de zonas anegadas, la periodicidad con las cuales las mismas son tomadas y la fuerte incidencia que tiene la cobertura nubosa en la resolución temporal, hacen que estas imágenes no resulten adecuadas para describir de forma dinámica y continua las variaciones de zonas anegadas en forma de cartografía de recurrencia de anegamiento o en forma de series de datos temporales. A estos problemas es posible adicionar que: i) para una correcta utilización de las imágenes es mandatorio realizar un pre-procesamiento que incluya corrección radiométrica de los valores de cada píxel y una corrección geométrica, y que ii) las imágenes LANDSAT más actuales poseen datos faltantes debido a problemas técnicos.

Por otro lado, se plantea que la disponibilidad de los productos MODIS - los cuales se encuentran geométrica, radiométrica, y temporalmente corregidos - constituye una oportunidad para el seguimiento de variaciones en cuerpos de agua superficiales. Esto además es una ventaja por sobre las imágenes de radar las cuales no son sencillas de adquirir y procesar. En cuanto al uso de imágenes MODIS, es necesario remarcar que su resolución de 500 metros impacta negativamente en la detección de superficies anegadas de pequeño tamaño.

Finalmente, se plantea como trabajo a futuro, la posibilidad de incrementar la resolución espacial de las imágenes MODIS mediante técnicas de sub-píxel y mejorar la resolución espacial mediante el uso de imágenes diarias.

5 **Bibliografía**

1. Jobbágy, E.G., Noretto, M.D., Santoni, C., Baldi, G., 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología Austral* 18, 305-322.
2. Noretto, M. D., Jobbágy, E. G., Brizuela, A. B., & Jackson, R. B. 2011. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. —Agriculture, Ecosystems and Environment, 1-10. doi:10.1016/j.agee.2011.01.008
3. Moncaut, CA. 2001. Inundaciones y Sequías en la Pampa Bonaerense: 1576-2001. Editorial El Aljibe, City Bell (Argentina). Pp. 102.

4. Campos, A.N. "Estudio de la dinámica hidrológica de una región arrea del noroeste de la provincia de Buenos aires, Argentina". Tesis de Maestría. Universidad Nacional de La Plata. 2013.
5. Bastiaanssen WGM, Bos MG. 1999. "Irrigation Performance Indicators Based on Remotely Sensed Data: a Review of Literature." *Irrigation and Drainage Systems* 13 (4), pp. 291-311.
6. Sakamoto T, Van Nguyen N, Kotera A, Ohno H, Ishitsuka N, Yokozawa M. 2007. "Detecting temporal changes in the extent of annual flooding within the Cambodia and the Vietnamese Mekong Delta from MODIS time-series imagery". *Remote Sensing of Environment* 109, 295-313.
7. Kennedy RE, Townsend PA, Gross JE, Cohen WB, Bolstad P, Wang YQ, Adams P. 2009. "Remote sensing change detection tools for natural resource managers: Understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects". *Remote Sensing of Environment* 113, 1382-1396.
8. Losada García JA, Montesinos Aranda S, Omedas Margelí M, García Vera MA, Galván Plaza R. 2004. "Cartografía de las inundaciones del río Ebro en febrero de 2003: trabajos de fotointerpretación, teledetección y análisis SIG en el GIS-Ebro". XI Congreso de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección, en Murcia 20 al 23 de septiembre de 2004.
9. Hirose K, Maruyama Y, Quy DV, Tsukada M, Shiokawa Y. 2001. "Visualization of flood monitoring in the lower reaches of the Mekong River". 22nd Asian Conference on Remote Sensing. November 5–9 2001, Singapore, vol. 1, pp. 314–319.
10. Heremans R, Willekens A, Borghys D, Verbeeck B, Valckenborgh J, Ache-roy M. 2005. "Automatic detection of flooded areas on ENVISAT/ASAR images using an object-oriented classification technique and active contour algorithm". *Proceedings of the 31st International Symposium on Remote Sensing of the Environment*. June 20–24, 2005 St. Petersburg, Russia.
11. Skakun S. 2010. "A neural network approach to flood mapping using satellite imagery". *Computing and Informatics*, 29, pp. 1013–1024
12. Xiao X, Boles S, Liu J, Zuang D, Froking S, Li C. 2005. "Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images". *Remote Sensing of Environment*, 95, 480–492.
13. Xiao X, Boles S, Froking S, Li C, Bau JY, Salas W. 2006. "Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images". *Remote Sensing of Environment*, 100, 95–113.
14. Aragón R, Jobbágy EG, Viglizzo EF. 2010. "Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina)". *Ecohydrology*. Published online in Wiley InterScience.
15. León, R.J.C., 1991. Geographic limits of the region. *Geomorphology and geology. Regional subdivisions*, pp. 369–376. Floristic aspects. Description of

- the vegetation. In: Soriano, A. (Ed.), Rio de la Plata Grasslands. Elsevier, Amsterdam, pp. 380–387.
16. Soriano A, Leon RJC, Sala OE, Lavado RS, Deregibus VA, Cahuepe M, Scaglia OA, Velazquez CA, Lemcoff JH. 1991. Rio de la Plata Grasslands. In Natural Grasslands: Introduction and Western Hemisphere. Ecosystems of the World, Coupland RT (ed). Amsterdam: Elsevier; 367–407.
17. Viglizzo EF, Frank FC. 2006. Ecological interactions, feedbacks, thresholds and collapses in the Argentine Pampas in response to climate and farming during the last century. *Quaternary International* 158(1): 122–126.
18. Baldi, G., & J. M. Paruelo. 2008. Land-use and land cover dynamics in South American temperate grasslands. *Ecology and Society* 13(2): 6. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art6/>
19. Diaz-Zorita M, Pepi M, Grosso G. 1998. Estudio de las precipitaciones en el oeste bonaerense. EEA INTA: Buenos Aires, INTA, Villegas, Argentina; 15 p.
20. Viglizzo EF, Jobbágy EG, Carreño LV, Frank FC, Aragón R, Oro LD, Salvador VS. 2009. The dynamics of cultivation and floods in arable lands of central Argentina. *Hydrology and Earth System Sciences* 13: 491–502.
21. Aradas RD, Lloyd J, Wicks J, Palmer J. 2002. Groundwater problems in low elevation regional plains: The Buenos Aires Province example. In *Groundwater and Human Development*, Bocanegra E, Martinez D, Massone H (eds). Taylor & Francis: London; 613–623.
22. Viglizzo EF, Roberto ZE, L'ertora FA, Gay EL, Bernardos J. 1997. Climate and land-use change in field crop ecosystems of Argentina. *Agricultural, Ecosystems and Environment* 66: 61–70.
23. Liang, S., Fang, H., Chen, M., Shuey, C.J., Walthall, C., Daughtry, C., Morisette, J., Schaaf, C., Strahler, A., 2002. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: methods and preliminary results. *Remote Sensing of Environment* 83, 149–162.