

Evaluación de la información satelital para el estudio de la dinámica hidrológica de la Llanura Pampeana

Alfredo N. Campos^{1, 2}, Evelyn Figueroa Schibber^{1, 3}, Alfredo G. García^{1, 3}

¹ Instituto de Clima y Agua - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

² Departamento de Electrónica - Facultad Regional Buenos Aires - Universidad Tecnológica Nacional (UTN)

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Email: campos.alfredo@inta.gob.ar / schibber.evelyn@inta.gob.ar / aggarcia@agro.uba.ar.

RESUMEN: La llanura del noroeste de Buenos Aires es una región de relevante importancia productiva y alta susceptibilidad hídrica. El estudio y modelado de la dinámica hidrológica requiere una detallada descripción de las variables involucradas. Frente a la baja densidad de las estaciones meteorológicas y la discontinuidad de las mediciones, la información satelital brinda datos periódicos y espacialmente homogéneos. En este trabajo se evaluó la aptitud de la información satelital para el seguimiento hidrológico del área de estudio. Se validó la precipitación estimada con imágenes TRMM; se contrastó la evapotranspiración de campo versus cuatro algoritmos (MOD16, Di Bella, Turc y Makkink); y utilizando imágenes MODIS y LANDSAT se estudió la presencia de cuerpos de agua y su impacto en la vegetación. La precipitación mensual TRMM presentó un ajuste de $r^2=0,78$ con respecto a estaciones terrestres, respetando las variaciones espaciales e identificando variaciones abruptas. El algoritmo Di Bella de evapotranspiración resultó el más adecuado por considerar la vegetación y haberse desarrollado para la región. Para la detección de zonas anegadas, las imágenes MODIS permitieron un buen seguimiento temporal, mientras que las LANDSAT se destacaron por la precisión espacial. Del análisis temporal de los anegamientos se infiere que la mayoría de ellos son de baja extensión, alta intensidad y baja frecuencia. Se obtuvieron altos índices de correlación que indican proporcionalidad inversa entre las variables de la vegetación y el aumento de extensión-intensidad-frecuencia de los cuerpos de agua, es decir que los eventos de anegamiento de mayor envergadura disminuyen la capacidad transpirativa y fotosintética de la vegetación. La información satelital ha demostrado gran capacidad para el seguimiento de la precipitación, la evapotranspiración y la ocurrencia de anegamiento, brindando información gratuita y confiable de llanuras extensas ofreciendo continuidad espacial y temporal.

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 (Jobbagy *et al.*, 2008). Cambios relativamente pequeños en el balance hídrico dados por cambios de precipitación 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 procesos de anegamiento (Jobbagy *et al.*, 2008; Noretto *et al.*, 2011). 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 (Moncaut, 2001), 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 de Argentina.

Una alternativa a la medición de variables hidro-meteorológicas se basa en el uso de sensores remotos (Campos, 2013). Actualmente estos sensores ofrecen la oportunidad de estudiar regiones espacialmente amplias mediante información objetiva, periódica, económicamente viable y precisa (Bastiaanssen & Bos, 1999). Además, las mediciones remotas pueden ser representadas en el espacio, mostrando patrones que se mantienen ocultos cuando los datos se encuentran en tablas (Bastiaanssen & Bos, 1999). 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.

En los estudios hidrológicos las imágenes tomadas por sensores remotos han demostrado ser capaces de describir la evolución temporal de las principales variables en juego. Para el caso de la precipitación se puede mencionar GPI (*Goes Precipitation Index*) y las imágenes TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) (Campos, 2013). En el seguimiento de la evapotranspiración existen dos enfoques: los empíricos (Di Bella *et al.*, 2000; Della Chiessa, 2011) y los basados en el balance energético de la superficie (Nosetto *et al.*, 2005; Mu *et al.*, 2011). La detección de superficies cubiertas por agua es uno de los temas clásicos de la teledetección (Sakamoto *et al.*, 2007), y esta información presenta la particularidad de proveer mediciones consistentes, lo que posibilita la detección de cambios tanto abruptos como graduales (Kennedy *et al.*, 2009). Para la detección de zonas anegadas existe una multiplicidad de técnicas como ser: fotointerpretación (Losada *et al.*, 2004), utilización de imágenes de radar (Skakum, 2010), imágenes multiespectrales (Losada *et al.*, 2004; Aragón *et al.*, 2010). En todos estos casos las imágenes LANDSAT son tomadas como fuente de referencia para la detección de áreas anegadas.

En este trabajo se estudió y se caracterizó mediante sensores remotos las principales variables hidrológicas en la llanura de noroeste de Buenos Aires: precipitación, evapotranspiración, presencia de agua superficial. Además, se describió ecológicamente los sitios anegados mediante información remota con la finalidad de estudiar la relación recíproca agua-vegetación.

MATERIALES

Mediciones puntuales

Se contó con información de ocho estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio y sus alrededores (Figura 1). Estas estaciones ofrecen, entre otros datos, valores de temperatura máxima y mínima diaria, precipitación acumulada diaria. Si bien la disponibilidad temporal de los datos de cada estación es variable, se ha logrado unificar las fechas con datos entre el 01/01/1998 y el 31/12/2011.

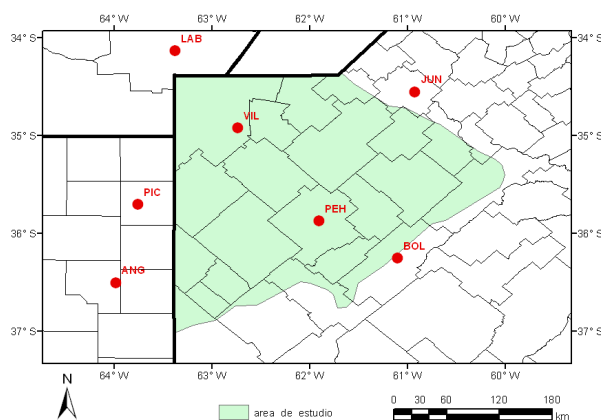


Figura 1. Estaciones meteorológicas utilizadas. LAB: Laboulaye, VIL: Gral Villegas, JUN: Junín, BOL: Bolívar, PEH, Pehuajó, ANG: Anguil y PIC: Gral. Pico.

Para el cálculo de la evapotranspiración se usaron los datos calculados con la técnica eddy covariance (EC) a partir de observaciones micrometeorológicas realizadas en tres puestos fijos de observación (Tabla 1). Las tres estaciones EC están equipadas con un anemómetro sónico 3-D y un analizador infrarrojo de gases atmosférico (IRGA). La ET se calculó utilizando el software EVEDDY, desarrollado por INTA (2009).

Tabla 1. Ubicación, ecorregión según Olson *et al.* (2008), tipo de uso de suelo y período de adquisición de datos de las estaciones EC utilizadas.

Sitio	Ubicación	Ecorregión (Olson <i>et al.</i> 2008)	Tipo de uso del suelo	Período de adquisición de datos
EC1 San Luis, San Luis	33°27'50.8"S; 66°27'34.5"O	Chaco seco	Ganadero	12/2009 - 03/2011
EC2 Mercedes, Buenos Aires	34°38'29.7"S; 59°28'31.7"O	Pampa húmeda	Agrícola	09/2009 - 03/2011
EC3 Virasoro, Corrientes	28°14'22.2"S; 56°11'19"O	Sabana mesopotámica	Forestal	12/2009 - 01/2012

Sensores Remotos

La misión TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) fue lanzada en 1997 y tiene como objetivo el monitoreo la precipitación del trópico y subtropical, y la estimación del calor latente asociado. TRMM incluye varios sensores activos y pasivos, para mayor detalle de los sensores se recomienda el artículo de

Kummerow *et al.* (1998). TRMM provee el producto 3B43, el cual se encuentra disponible desde el 01-01-1998 hasta la fecha y cubre todo el globo entre los $\pm 50^\circ$ de latitud, con una resolución temporal mensual y una resolución espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Este producto combina las estimaciones generadas por TRMM y otros satélites, con mediciones pluviométricas obtenidas de CAMS (*Climate Anomaly Monitoring System*) del centro de predicción del clima de NOAA y/o mediciones de GPCC (*Global Precipitation Climatology Center*) (Collischonn *et al.*, 2008). El producto 3B43 fue descargado de la página oficial de TRMM (<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>) para las fechas comprendidas entre enero de 1998 y abril de 2011.

Las imágenes provenientes de la plataforma LANDSAT (sensor *Thematic Mapper* - escena 227/85) poseen 7 bandas del espectro electromagnético. La resolución espacial de estas imágenes es de 60 *metros* para las imágenes del intervalo de años [1980-1983], y de 30 *metros* para el intervalo [1984-2010]. La resolución temporal original es de 16 días, pero la misma se ve fuertemente afectada por la aparición de nubosidad. Estas imágenes fueron descargadas del sitio GLOVIS (<http://glovis.usgs.gov/>).

El sensor MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*) montado sobre las plataformas Terra y Aqua capturan al menos 4 imágenes diarias con una resolución espectral de 36 bandas y con resoluciones espaciales que llegan a los 250 *metros*. La NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) procesa la información de las imágenes obtenidas con el fin de obtener productos específicos para diferentes aplicaciones y posibilita su descarga totalmente gratuita a través del sitio NASA - REVERB (<http://reverb.echo.nasa.gov/>). Para este trabajo se descargaron las escenas h12v12 y h13v12 para el período 2000-2010 de los siguientes productos: i) MOD13Q1: Contiene índices de vegetación y reflectancia de las bandas azul, roja, infrarroja cercana e infrarroja media, en un compuesto de 16 días con resolución de 250 *metros* donde se minimiza la incidencia de nubes, efectos atmosféricos y efectos angulares sol-superficie-tierra y otros efectos que puedan afectar la calidad de imagen; ii) MOD16, el cual ofrece datos de ET con una resolución temporal de 8 días y una resolución de 1 km^2 , usando el algoritmo mejorado de Mu *et al.* (2011), el cual se basa en la ecuación de Penman-Monteith; iii) MOD11A2, el cual ofrece datos de temperatura de superficie (diurna y nocturna) a un intervalo de 8 días, con una resolución de 1 km ; iv) MOD09A1, el cual brinda datos de reflectancia con 500 *metros* de resolución espacial cada 8 días.

Las imágenes tomadas por el sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) sobre la plataforma NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) brindan información en 5 bandas del espectro, con una resolución espacial de 1 km^2 desde 1982. Estas imágenes fueron obtenidas de la base de datos del Instituto de Clima y Agua – INTA. Con la finalidad de reducir el efecto negativo que tiene la aparición de nubes y aerosoles sobre las imágenes, las mismas se encuentran en compuesto de 15 días, donde el valor del píxel corresponde al valor de mejor calidad del período. Para este trabajo se utilizaron los compuestos de la serie FASIR (*Fourier-Adjustment, Solar zenith angle corrected, Interpolated Reconstructed*) cuya resolución espacial es de 8 *km*.

Índices espectrales

Los índices espectrales utilizados en este trabajo fueron el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI, del inglés *Normalized Differences Vegetation Index*) (Rouse *et al.*, 1973), el Índice de Agua Normalizado (NDWI, del inglés *Normalized Difference Water Index*) (Gao, 1996) y el Índice de Vegetación Mejorado (EVI, del inglés *Enhanced Vegetation Index*) (Huete *et al.*, 2002). El NDVI combina datos espectrales de la franja visible del espectro electromagnético en el rojo (R, $\lambda = [620,670] \text{ nm}$) y en el infrarrojo cercano (NIR, $\lambda = [800,2500] \text{ nm}$), quedando definido por:

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

Este índice ha sido ampliamente utilizado para detectar vegetación. Es un indicador indirecto de la transpiración 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 NIR por parte del agua, y la gran reflexión en la franja del R. 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 del suelo. Este índice combina la franja del espectro electromagnético en el NIR y el infrarrojo de onda corta (SWIR, $\lambda = [2500,50000] \text{ nm}$), siendo calculado mediante la ecuación 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.

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

El EVI es un buen complemento al NDVI, puesto que si este último es esencialmente sensible a las variaciones de la banda roja, este índice es más sensible a la banda infrarroja cercana, lo que lo hace diferenciar de mejor forma las variaciones estructurales del dosel vegetal se calcula como:

$$EVI = \frac{G \cdot (NIR - RED)}{(NIR + C1 \cdot RED - C2 \cdot Blue + L)} \quad (3)$$

siendo ρ la reflectividad en superficie de las bandas del infrarrojo cercano (NIR), roja (R) y azul (B), L el coeficiente de ajuste de entorno (suelo), C1 y C2 los coeficientes de corrección atmosférica para bandas R y B respectivamente y G el factor de ganancia.

MÉTODOS

Precipitación

Para comparar los datos de PP de las estaciones meteorológicas y el producto TRMM, se eligió la unidad temporal mensual, de manera que se debió llevar los datos de PP diaria de las estaciones meteorológicas a PP mensual acumulada, tomando a los valores sin dato como fechas donde no hubo precipitación. Una vez que ambas fuentes de datos se encuentran en la misma escala temporal se extrajeron de las imágenes TRMM las series temporales de PP para las coordenadas de cada estación. Se efectuó una regresión lineal para todas las estaciones a escala anual y a escala mensual con el objetivo de obtener valores de regresión generales para el área de estudio, y regresiones lineales para cada estación meteorológica y para cada mes.

Evapotranspiración

Para la validación de la evapotranspiración se tomó como referencia los datos obtenidos con la torre de *Eddy covariance* y se los contrastó con los siguientes métodos: i) ET MODIS: El producto global de ET MOD16A2 es desarrollado a partir de información derivada de los sensores MODIS. El algoritmo utilizado para calcular la ET ha sido propuesto por Mu *et al.* (2011), y se basa en la ecuación Penman-Monteith (Monteith 1965); ii) ET DI BELLA: Se trata de un algoritmo de base empírica que relaciona variables biofísicas derivadas de sensores remotos con la ET estimada a partir de información meteorológica. Específicamente, Di Bella *et al.* (2000) proponen utilizar una regresión múltiple utilizando el NDVI y la temperatura de superficie (T_s) para estimar la ET diaria (mm/d). Este algoritmo fue aplicado utilizando información derivada del sensor MODIS/Terra para las mismas ventanas temporales en que se disponía de datos EC. Los valores de T_s se extrajeron del producto MOD11A2, mientras que el NDVI se extrajo del MOD13Q1; adicionalmente se calculó la evapotranspiración potencial (ETP)¹ mediante dos métodos basados en el uso de información meteorológica. Estas metodologías tienen la ventaja de requerir menor cantidad de datos que el método Penman-Monteith (Monteith, 1965), los cuales muchas veces son registrados en las estaciones meteorológicas. La información necesaria en cada caso fue capturada por el instrumental instalado en las estaciones EC. Los métodos utilizados son: iii) Método Turc (1961) y iv) Makkink (1957). Finalmente se analizó la correlación existente entre la ET medida en las estaciones EC con los datos de ET extraídos de los productos satelitales y los valores de ETP estimados mediante información meteorológica.

Anegamiento

Con la finalidad de comparar la capacidad de las imágenes LANDSAT y MOD09A1 para detectar agua en superficie se realizaron series temporales de anegamiento. Para la clasificación de las imágenes satelitales se realizó un árbol de decisión (Aragón *et al.*, 2010; Campos, 2013). En el árbol de decisión aplicado se clasifica como agua aquellos píxeles que cumplen conjuntamente la condición de que su valor de NDVI sea

¹ La evapotranspiración potencial (ETP) se define como la evaporación directa desde el suelo más la transpiración realizada por los vegetales cuando no existen restricciones hídricas (Penman 1948).

menor a cero y que su valor de NDWI sea mayor a 0. Estos valores se corresponden con la respuesta espectral del agua, donde la reflectancia va decreciendo a medida que se aumenta la longitud de onda. Aquellos píxeles que no cumplan con esta condición serán agrupados como píxeles sin anegamiento. Finalmente con el total de las imágenes se calculó el área total anegada para cada fecha y se realizó un mapa de recurrencia de inundaciones.

Relación anegamiento-vegetación

Para caracterizar las zonas anegadas se utilizaron las clasificaciones de anegamiento de las imágenes LANDSAT. A fin de referenciar espacialmente los datos y llevarlos a una unidad de análisis homogénea se superpuso sobre el área de estudio una grilla compuesta por celdas de 1 km de lado, en coincidencia con los píxeles MODIS. Para cada celda se obtuvo: el porcentaje de agua de la celda para cada fecha $e(t)$, el NDVI, el EVI y la ET DIBELLA.

Luego, Se realizó un muestreo aleatorio de 200 celdas para obtener una muestra representativa. Se descartaron 9 celdas por corresponder a cuerpos lagunares permanentes. Cada una de las 191 celdas fue clasificada según su serie temporal $e(t)$ en grupos de extensión-intensidad-frecuencia (EIF) (Figura 2):

- La extensión (E_m) es la mediana de la serie $e(t)$. Se formaron 4 grupos: i) E_m igual a cero, ii) E_m en el rango $[0; 9.65]$, iii) E_m entre $[9.65; 19.3]$, y iv) E_m entre $[19.3; 28.95]$.
- La frecuencia de anegamiento fue calculada como el número de veces que la extensión $e(t)$ superó la E_m . Se determinaron 3 grupos según el número de cambios que tuvo: i) frecuencia baja: de 1 a 5 veces, ii) frecuencia moderada: de 5 a 10 veces y iii) frecuencia alta, mayor a 10 veces.
- Como cada celda posee una E_m propia, se calculó la intensidad para evaluar la magnitud de los cambios de $e(t)$. Si la mayoría de los valores de $e(t)$ se encontraron: i) entre E_m y la media de $e(t)$ (\bar{e}) se clasificó como intensidad baja, ii) entre \bar{e} y $\bar{e} + 2\sigma$ se clasificó como intensidad media y, iii) por encima de dos desvíos estándar desde \bar{e} se clasificó como intensidad alta.

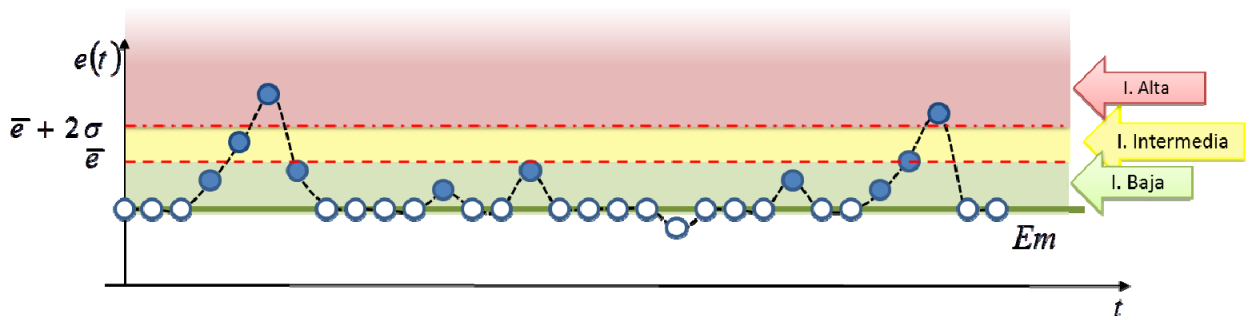


Figura 2. Determinación de EIF. En este gráfico, se tiene una extensión E_m . A partir de la media \bar{e} , y del desvío estándar σ de $e(t)$, se obtiene una frecuencia de 10 (cantidad de círculos azules), y una intensidad baja (la mayoría de los círculos se encuentran en el sector verde).

RESULTADOS

Precipitación

Las estimaciones de precipitación anual realizadas a partir de sensores remotos tuvieron un índice de correlación de 0,612 ($n=102$, $p<0,01$) con una sobrestimación de PP por parte de TRMM con respecto a los valores observados en las estaciones meteorológicas. Este índice de correlación se encuentra en el rango de $r^2=[0,57 ; 0,75]$ logrado por Javanmard *et al.* (2010). A escala mensual, el coeficiente de correlación entre las dos fuentes de información utilizadas aumentó a 0,782. (Figura 3). Este aumento puede ser explicado a través de la desagregación de la información a escala mensual, donde la existencia de meses con mayor error puede considerarse aisladamente sin afectar el valor de los otros meses. En este caso, al igual que en el caso de valores anuales, se puede observar que las imágenes TRMM sobrestiman levemente los valores de PP (Figura 3), lo cual concuerda con Li *et al.* (2012), quien menciona que si bien el radar y el sensor de microondas de TRMM muestran una tendencia a la sobreestimación, el producto compuesto 3B43 de TRMM presenta un excelente ajuste comparado con las estaciones. Según las pendientes de las regresiones lineales se deduce que la sobrestimación de la PP anual es mayor que la mensual, esto es de esperarse ya que la sobrestimación anual es la resultante de la sumatoria de las sobrestimaciones mensuales. En relación a trabajos similares realizados (Li *et al.*, 2012), los valores de sobrestimación mensuales en la zona de estudio son menores (*i.e.* la pendiente es más cercana a la unidad) y los coeficientes de regresión se encuentran en el rango obtenido en estos trabajos ($r^2=[0,57;0,89]$). Dado que los valores que mayor dispersión presentan son aquellos relacionados con valores de PP mensual más elevados, y asumiendo que los valores de PP más altos ocurren en el verano, es conveniente realizar un estudio aislando los valores de PP por mes.

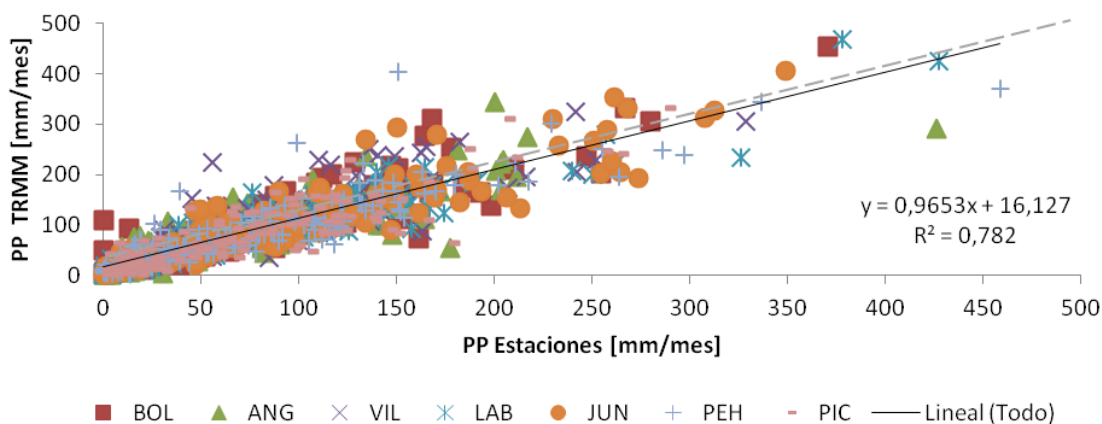


Figura 3. Regresión entre PP mensuales obtenidas con TRMM y estaciones.

Al analizar la correlación mensual de cada estación (Tabla 2) se observó que el rango de correlación varió entre 0,75306 y 0,8954, a excepción de la estación Villegas que presentó un ajuste de $r^2=0,67$. Si bien el valor de la estación Villegas se encuentra en el rango de valores encontrado en la bibliografía, se puede apreciar que es menor que el resto de las estaciones. Por otra parte se encontró que el mes de enero fue el que

mostró el menor ajuste. En cuanto al ajuste mensual se encontró que los meses de enero y noviembre fueron los de menor ajuste ($r^2=0,582$ y $r^2=0,549$), mientras que los meses de mayor ajuste fueron mayo y agosto ($r^2=0,813$ y $r^2=0,808$ respectivamente). Esta distribución del ajuste con respecto a los meses del año muestra que los meses de verano donde la PP es mayor el ajuste es menor y que en los meses de invierno donde la PP descende el ajuste es mayor. La sobreestimación en los meses de mayor PP puede ser explicada por varias razones: i) Eventos que no son registrados por las estaciones (Milewski et. al, 2009) o eventos con vientos elevados donde las mediciones realizadas por las estaciones son incorrectas (Franchito *et al.*, 2009), ii) Estimaciones por identificación incorrecta de nubes de lluvia (Bauer *et al.*, 2002), iii) Por el área de medición, donde la estación mide fenómenos locales, mientras que el pixel de TRMM cubre $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (Khalaf y Donoghue, 2012).

Tabla 2. Coeficientes de correlación (R^2) de la regresión mensual por estación entre PP obtenida con TRMM y la obtenida por estaciones. Resaltados los valores mayores a 0,7.

MES	BOL	ANG	VIL	OLA	LAB	JUN	PEH	PIC	TOTAL
1	0,856	0,728	0,315	0,641	0,607	0,634	0,557	0,518	0,582
2	0,588	0,813	0,676	0,661	0,834	0,771	0,758	0,338	0,672
3	0,808	0,701	0,401	0,703	0,941	0,89	0,908	0,766	0,717
4	0,728	0,906	0,537	0,859	0,745	0,65	0,702	0,506	0,68
5	0,59	0,584	0,895	0,679	0,872	0,932	0,848	0,67	0,813
6	0,77	0,271	0,437	0,859	0,736	0,59	0,674	0,528	0,679
7	0,492	0,918	0,686	0,653	0,785	0,848	0,768	0,881	0,76
8	0,942	0,614	0,842	0,952	0,713	0,927	0,673	0,478	0,808
9	0,774	0,513	0,559	0,828	0,951	0,907	0,421	0,569	0,612
10	0,867	0,802	0,613	0,635	0,954	0,847	0,9	0,654	0,735
11	0,786	0,661	0,214	0,884	0,82	0,595	0,632	0,344	0,549
12	0,564	0,507	0,845	0,791	0,875	0,865	0,74	0,759	0,784
TOTAL	0,8017	0,7634	0,67	0,7531	0,8954	0,8439	0,7737	0,7647	0,782

Evapotranspiración

Los coeficientes de correlación (r^2) de las regresiones lineales calculadas entre los valores de ET medidos en las estaciones EC y los derivados de los cuatro métodos analizados variaron entre 0.013 y 0.742 (Tabla 3). En cada uno de los sitios, los valores de ETP presentaron similar r^2 cuando se estimaron con los dos métodos (Turc y Makkink), siendo la pendiente de la curva de ajuste mayor a la unidad en todos los casos. Para estos métodos, los mayores r^2 se observaron en el sitio más húmedo (EC3, con una precipitación promedio anual de 1800 mm), mientras que menores se encontraron en el sitio más seco (EC1, con una precipitación promedio anual de 400 mm). Del análisis visual de las curvas temporales de la ETP (Figura 4) se observa que la dinámica temporal es similar a la ET medida (EC), siendo menores las diferencias observadas a bajos valores de ET. La ET derivada del producto satelital generado por la EOS/NASA (MOD16A2) mostró un ajuste similar en los tres sitios ($r^2 \sim 0.4$), sin embargo fue en la estación EC3 donde la ET estimada presentó

la menor dispersión y un valor de pendiente (m) cercana a uno. En los sitios EC1 y EC2, en general la ET estimada subestimó las mediciones realizadas a campo.

Por su parte, la ET calculada a partir del algoritmo propuesto por Di Bella et al. (2000) estimó la ET con un alto grado de ajuste en el sitio EC2 (Pampa húmeda, región para la cual el algoritmo fue desarrollado), con un m cercano a uno. Por el contrario, este producto satelital falló en la estimación de la ET en las estaciones EC1 y EC3.

Tabla 3. Pendiente (m), ordenada al origen (b) y coeficiente de correlación (r^2) correspondiente a la regresión lineal entre la ET calcula por las estaciones EC y los diferentes métodos de estimación.

EC vs	EC1			EC2			EC3		
	m	b	r^2	m	b	r^2	m	b	r^2
MOD16A2	0.487	0.173	0.416	0.742	1.762	0.444	0.927	0.645	0.492
Di Bella	0.559	2.525	0.361	0.809	1.891	0.709	0.051	6.227	0.013
Turc	1.58	1.989	0.382	1.44	2.435	0.62	2.03	1.44	0.742
Makkink	1.269	1.636	0.457	1.264	1.264	0.615	1.825	1.308	0.742

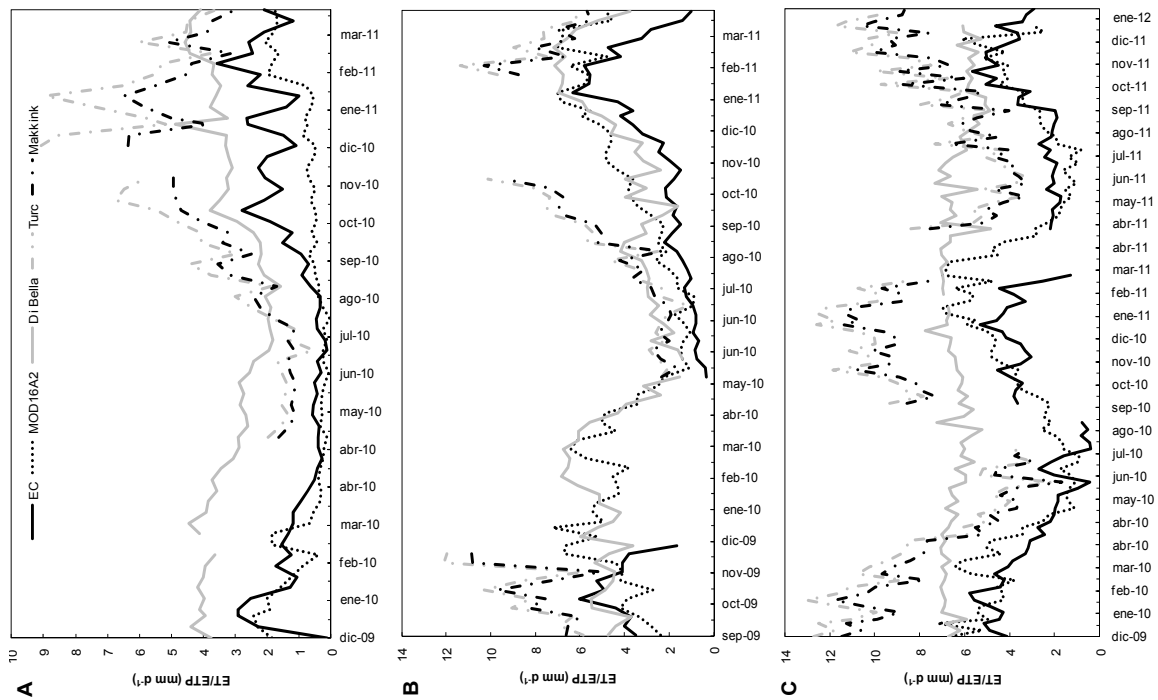


Figura 4. Comparación temporal entre la ET/ETP calculada con los diferentes métodos de estimación y la ET medida en las estaciones EC1 (A), EC2 (B) y EC3 (C).

Anegamiento

Al analizar la oportunidad que ofrecen las imágenes LANDSAT y MODIS para la generación de mapas de recurrencia de anegamiento (Figura 5), 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 durante los 8 días) (Powell *et al.*, 2014). 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.



Figura 5. Recurrencia 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.

En las series de tiempo logradas (Figura 6) se observa que los departamentos ubicados al sur poseen un mayor volumen de anegamiento que los departamentos del norte. 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.

Relación anegamiento-vegetación

La clasificación de píxeles con agua dio como resultado que la mayor cantidad de puntos corresponde a sitios donde la mediana de la extensión es baja, la intensidad es alta y la frecuencia es baja (Tabla 4). A medida que nos desplazamos a valores de mayor extensión, menor intensidad, o mayor frecuencia, la cantidad de

píxeles disminuye monótonamente. Este comportamiento puede ser causado por el microrelieve, el cual favorece el escurrimiento de agua superficial desde las zonas más elevadas hacia los sitios de depresión relativa, entre otros factores (Aragón et al., 2010).

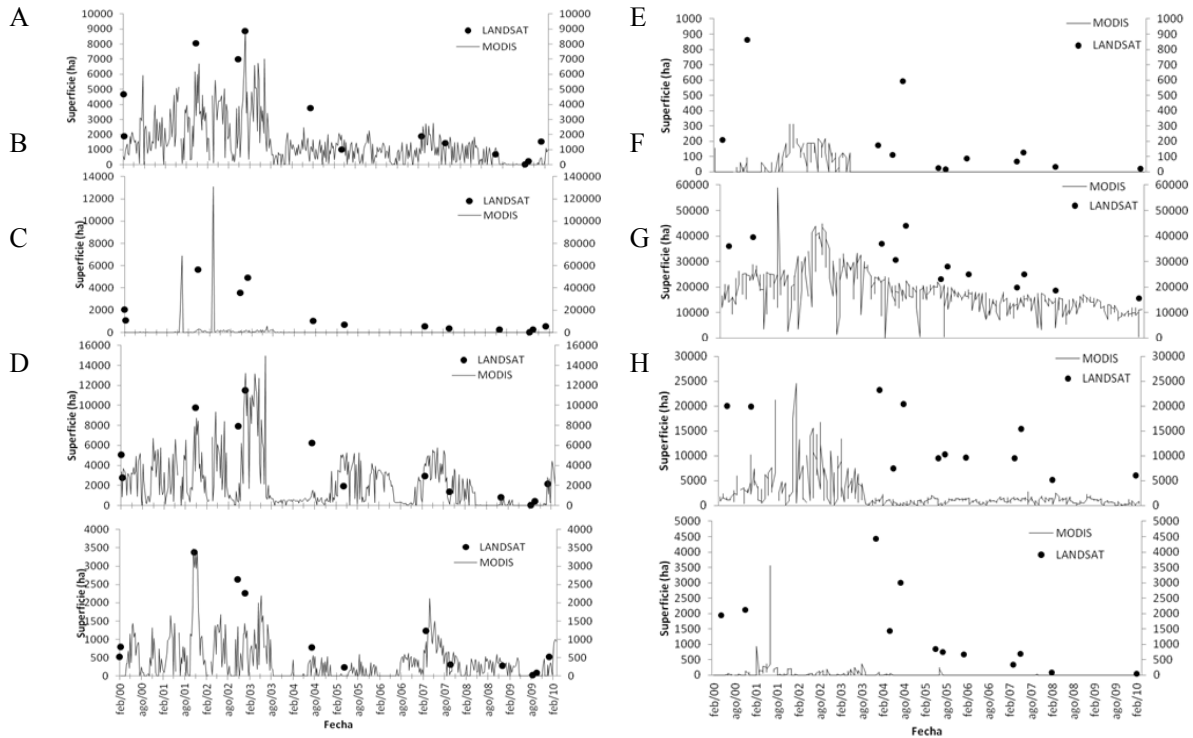


Figura 6. A) Florentino Ameghino; B) Leandro N. Alem; C) Gral. Pinto; D) Gral. Arenales; E) Tres Lomas; F) Trenque Lauquen; G) Pehuajó; H) Hipólito Yrigoyen

Tabla 4. Características hidrológicas y ecológicas de los grupos resultantes

Grupo (E-I-F)	Extensión (%)	Intensidad	Frecuencia	N	NDVI FASIR (1982-1999)	NDVI MODIS (2000-2010)	EVI (2000-2010)	ET promedio (2000-2010)
1-1-2	0	Baja	Moderada	5	0.60	0.58	0.38	3.84
1-1-3	0	Baja	Alta	5	0.61	0.57	0.37	3.79
1-2-1	0	Media	Baja	22	0.59	0.53	0.34	3.50
1-2-2	0	Media	Moderada	12	0.60	0.54	0.34	3.46
1-2-3	0	Media	Alta	6	0.60	0.53	0.34	3.59
1-3-1	0	Alta	Baja	50	0.60	0.54	0.34	3.59
1-3-2	0	Alta	Moderada	12	0.61	0.55	0.34	3.81
2-3-1	0 – 9.65	Alta	Baja	40	0.60	0.53	0.32	3.45
2-3-2	0 – 9.65	Alta	Moderada	23	0.60	0.53	0.32	3.60
3-3-1	9.65 – 19.3	Alta	Baja	2	0.59	0.51	0.26	2.84
3-3-2	9.65 – 19.3	Alta	Moderada	10	0.60	0.48	0.25	3.24
4-3-2	19.3 – 28.95	Alta	Moderada	4	0.60	0.48	0.25	3.05

En cuanto a la caracterización ecológica, se trataron al NDVI de la serie FASIR y MODIS como dos sets de datos independientes para evitar errores por diferencias atribuibles a la resolución espacial y a la obtención del NDVI en las distintas series. A partir de los resultados obtenidos de NDVI, tanto de la serie FASIR

(1982-1999) como de la serie MODIS (2000-2010), podemos inferir que el NDVI promedio disminuye con el aumento de la EIF ($r^2=0.37$ y 0.79 respectivamente) (Figura 7). Al igual que el NDVI, el EVI (Figura 7) también decrece con el aumento de la extensión, intensidad y frecuencia de anegamiento ($r^2=0.9$). Finalmente al evaluar la relación de la ET (Figura 7) con las variables hidrológicas se observó que también decrece con el aumento de la severidad de las mismas.

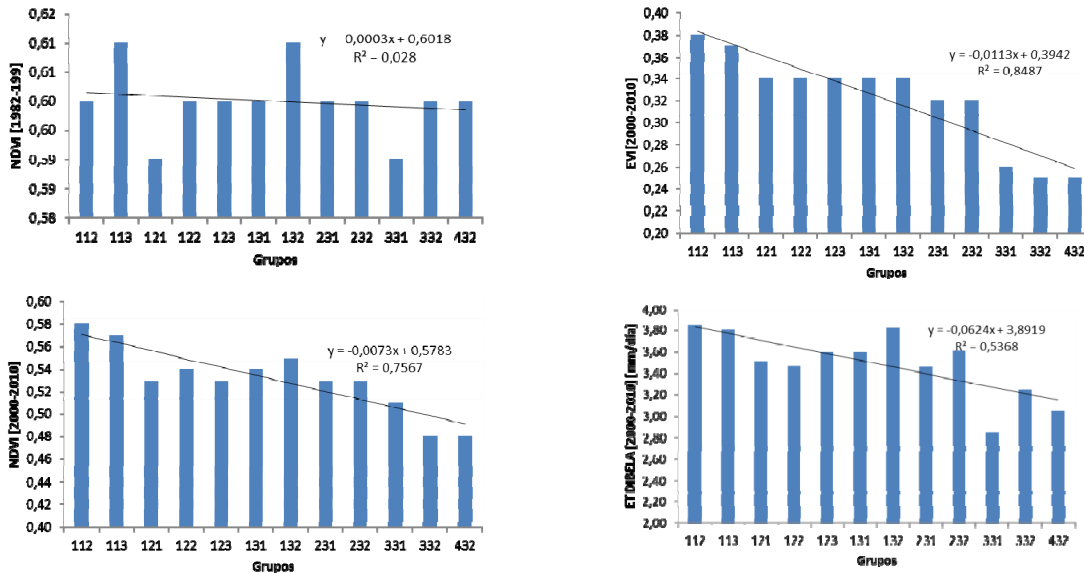


Figura 7. Índice de Vegetación Normalizado para el período 1982-1999 obtenido de la plataforma NOAA y Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), Índice de Vegetación Mejorado (EVI) y evapotranspiración (ET) para el período 2000-2010 obtenidos a partir de la plataforma TERRA.

Las clases 112, 113 y 132 son las clases que presentan mayor pérdida de agua en estado de vapor contrariamente al comportamiento que presentan las clases 331, 332 y 432. A partir de estos resultados podemos inferir que la transpiración decrece con el aumento de la extensión, intensidad o frecuencia.

CONCLUSIONES

Las mediciones de PP mediante imágenes TRMM han mostrado un buen ajuste a escala anual ($r^2=0,61$) y escala mensual ($r^2=0,78$) con respecto a los datos de estaciones terrestres, produciendo leve sobrestimaciones en ambos casos. La distribución mensual de las PP de TRMM ha mostrado buenos ajustes en todos los meses, siendo los más bajos los meses de enero y noviembre. El producto TRMM ha sido validado en varias locaciones alrededor del globo y nuestro análisis comparativo muestra que sus estimaciones de PP también son válidas para el noroeste de Buenos Aires. La ET es una variable costosa en su medición (tanto en esfuerzo humano como económico), siendo las verdades de terreno tomadas por lisímetros o torres *Eddy Covariance*. El producto de ET DiBella no sólo es atractivo por su ajuste, sino que además presenta la ventaja de que su cálculo requiere información sencilla de obtener. Si bien existe una vasta bibliografía donde se toma a las imágenes LANDSAT como referencia para el estudio de zonas anegadas, la

disponibilidad de los productos MODIS - los cuales se encuentran geométrica, radiométrica, y temporalmente corregidos - constituye una oportunidad para el seguimiento de cuerpos de agua superficiales. 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. Al analizar la relación agua-vegetación los resultados muestran que la mayoría de los eventos de anegamiento corresponden a casos donde la mediana de extensión es baja, la intensidad alta y la frecuencia baja, es decir, sitios que usualmente se encuentran libres de agua superficial y que sufren eventos de anegamiento de gran envergadura pero aislados en el tiempo. Se pudo observar que los eventos de anegamiento de mayor envergadura (ya sea por extensión, intensidad o frecuencia), disminuyen de manera considerable la capacidad transpirativa y la actividad fotosintética de la vegetación. Esto puede resultar en una realimentación donde la vegetación al perder menos agua por transpiración, aumenta la tasa de recarga freática subiendo el nivel de la napa, lo que puede traducirse en eventos de inundación. Según los resultados expuestos, los sitios ubicados en una posición topográfica más elevada son claves para la pérdida de agua en situaciones de anegamiento.

Los datos brindados por los diferentes sensores remotos que se han descrito, permiten representar la evolución de las principales variables hidrográficas permitiendo poseer mayor información para la toma de decisiones asociadas al deterioro ambiental, la disponibilidad de agua para consumo y riego, la atenuación de pérdidas por riesgos naturales y la planificación territorial, entre otras cuestiones.

Agradecimientos. Este trabajo se encuentra financiado por el INTA y por el CONICET.

REFERENCIAS

- Aragón, R., Jobbágy, E.G., Viglizzo, E.F., 2010. Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology*. Published online in Wiley InterScience.
- Bastiaanssen, W.G.M., Bos, M.G., 1999. Irrigation Performance Indicators Based on Remotely Sensed Data: a Review of Literature. *Irrigation and Drainage Systems* 13 (4), pp. 291-311.
- Bauer, P., Mahfouf, J.F., Olson, W.S., Marzano, F.S., Di Michele, S., Tassa, A., Mugnai, A.. 2002. Error analysis of TMI rainfall estimates over ocean for variational data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 128 (584), pp. 2129-2144.
- Campos, A.N., 2013. 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.
- Collischonn, B., Collischonn, W., Morelli Tucci, C.E., 2008. Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM Rainfall estimates. *Journal of Hydrology* 360, pp. 207-216.
- Della Chiesa, T., 2011. Estimación del balance de agua del suelo en la región pampeana utilizando datos provenientes de sensores remotos. Trabajo correspondiente al ciclo de intensificación para acceder al título de ingeniero agrónomo, Universidad de Buenos Aires.
- Di Bella, C.M., Rebella, C.M., Paruelo, J.M., 2000. Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina". *International Journal of Remote Sensing* 21, 4, pp. 791-797.
- Franchito, S.H., Rao, V.B., Vasques, A.C., Santo, C.M.E., Conforte, J.C., 2009. Validation of TRMM precipitation radar monthly rainfall estimates over Brazil. *J. Geophys.Res. – Atmos.*, pp. 114.
- Gao, B.C., 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266.

- Gao, F., Yu, Z., Duan, J., Ju, Q. 2003. Impact of Climate Change on Water Resources at Local Area in Anhui Province. *Procedia Engineering*, 28, pp. 319-325.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83, 195-213.
- Javanmard, S., Yagati, A., Nozdu, M.I., Bodagh Jamali, J., Kawamoro, H., 2010. Comparing high-resolution gridded precipitation data with satellite rainfall estimates of TRMM_3B42 over Iran. *Advanced Geoscience* (25), 119-125.
- 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.
- Kennedy, R.E., Townsend, P.A., Gross, J.E., Cohen, W.B., Bolstad, P., Wang Y.Q., 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.
- Khalaf, A., Donoghue, D., 2012. Estimation recharge distribution using remote sensing: a case of study from the West Bank. *Journal of Hydrology* 414-415, pp 354-363.
- Kummerow, C., Barnes, W., Kozu, T., Shiue, J., Simpson, J., 1998. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 15, 809-817.
- Li, X.H., Zhang, Q., Xu, C.Y., 2012. Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang catchment, Poyang lake basin. *Journal of Hydrology* 426-427, pp 28-38.
- Losada García, J.A., Montesinos Aranda, S., Omedas Margeli, M., García Vera, M.A., 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, Murcia 20 al 23 de septiembre de 2004.
- Makkink, G.F., 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inst. Of Water Eng.* 11:277-288.
- Milewski, A., Sultan, M., Yan, E., Becker, R., Abdeldayem, A., Soliman, F., Gelil, K.A., 2009. A remote sensing solution for estimating runoff and recharge in arid environments. *J. Hydrol.* 373 (1-2), pp. 1-14.
- Moncaut, C.A., 2001. Inundaciones y Sequías en la Pampa Bonaerense: 1576-2001. Editorial El Aljibe, City Bell (Argentina). Pp. 102.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. *Symposium of the society of experimental biology*, 19, 205-224.
- Mu, Q., Zhao M., Running, S.W., 2011. Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115, pp. 1781-1800. 2011.
- 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.
- Nossetto, M.D., Jobágy E.G., Paruelo J.M.. Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology* 11, pp. 1101-1117. 2005.
- Olson, D.M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E.D., Burgess, N.D., Powell, G.V.N., Underwood, E.C., D'amico, J.A., Itoua, I., Strand, H.E., Morrison, J.C., Loucks, C.J., Allnutt, T.F., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J.F., Wettengel, W.W., Hedao, P., Kassem, K.R., 2001. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience* 51(11):933-938.
- Powell S.J., Jakeman, A., Croke, B., 2014. Can NDVI response indicate the effective flood extent in macrophyte dominated floodplain wetlands?, *Ecological Indicators* 45, 486-493
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309-317.
- 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.
- Skakun, S., 2010. A neural network approach to flood mapping using satellite imagery. *Computing and Informatics*, 29, pp. 1013-1024
- Turc, L., 1961. Evaluation of besoins en eau d'irrigation, ET potentielle. *Ann. Agron.* 12:13-49.