

Comparación de índices de estrés hídrico, a partir de información captada por el sensor MODIS, en la región pampeana argentina

PATRICIA VAZQUEZ¹ ✉

Recibido: 01/04/2013 | Aceptado: 24/06/2013

Resumen

La Región Pampeana Argentina manifiesta una tenencia a la expansión agrícola que aumenta los riesgos económicos por su elevada dependencia de las condiciones meteorológicas. A fin de mejorar las predicciones sobre el comportamiento de los cultivos, en este trabajo se estudia la sensibilidad de diferentes índices de estrés hídrico a la disponibilidad de agua en el suelo (DAS), mediante el uso de imágenes satelitales en la mencionada región. Se analizaron tres índices a partir de datos de campañas de terreno en diferentes cultivos, conjuntamente con información satelital. Dos de ellos, Crop Water Stress Index (CWSI) y Water Deficit Index (WDI), combinan información de satélite con datos de estaciones meteorológicas. El tercero, Temperature-Vegetation Dryness Index (TDVI), utiliza solamente información de satélite. Se observó que el TDVI es el que mejor resultados arroja ($r^2 = 0,92$). Se concluye que este índice es el que permite generar diagnósticos adecuados por ser el más sensible a cambios en la DAS.

Palabras clave: nuevas tecnologías agrícolas, sensores remotos, infrarrojo térmico, disponibilidad de agua en el suelo.

Abstract

Water Stress Index Comparison from Information Captured by The Modis Sensor in The Argentinean Pampas Region

The Argentina Pampas Region exhibits a tendency to agricultural expansion that increases the economic risks because of its high dependence on weather conditions. In order to improve predictions on crop behavior, it will be studied in this paper the sensitivity of different water stress indices to soil water availability (SWA), by using satellite images in the aforementioned region. Three indices were analyzed from data gathered from field campaigns in different crops, together with satellite data. Two of these indices, Crop Water Stress Index (CWSI) and Water Deficit Index (WDI), combine satellite data with data from weather stations. The third index, Temperature-Vegetation Dryness Index (TDVI), uses satellite data only. It was observed that TDVI is the index that best results yields ($r^2 = 0,92$). It is concluded that this index is the one that can generate appropriate diagnostics for being the most sensitive to changes in the SWA.

Keywords: new agricultural technology, remote sensing, thermal infrared, soil water availability.

1. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA), Argentina. patriciavazquez11@gmail.com

Resumé

Comparaison des indices de stress hydrique, les informations collectées par le capteur MODIS PAMPA ARGENTINE dans la région

La Région Pampeana de l'Argentine, connaît une forte croissance agricole qui augmente les risques économiques à cause de la grande dépendance des conditions météorologiques. A fin d'améliorer les prédictions sur le comportement des cultures, dans ce travail, on étudie la sensibilité à la disponibilité de l'eau dans le sol, la DAS, des différents indices de stress hydrique, grâce à l'imagerie satellitaire de la région. Trois indices ont été analysés, obtenus lors de campagnes sur le terrain et par l'information des satellites. Deux d'entre eux combinant l'information par satellite et les données des stations météorologiques: Crop Water Stress Index –CWSI- et Water Deficit Index –WDI-. Le troisième, Indice de Température–Sécheresse de la Végétation –TDVI-, n'utilise que l'information satellitaire. Il en est résulté que le TDVI est l'indice qui produit les meilleurs résultats ($r^2 = 0,92$). On peut donc conclure que cet indice est celui qui peut générer les diagnostics les plus sensibles aux changements de la DAS.

Mots clés: nouvelles techniques agricoles, la télédétection, l'infrarouge thermique, disponibilité de l'eau dans le sol.

1. Introducción

A escala mundial, es conocida la necesidad de lograr una correcta metodología que permita de manera rápida y periódica inferir la determinación de la disponibilidad de agua (DAS) de una región. En este sentido, diversos autores han trabajado en el desarrollo de indicadores obtenidos con sensores activos y pasivos sobre diversas extensiones territoriales, ajustando los mismos a las características de interés de su región de estudio (Jackson et al., 1981; Idso, 1982; Price, 1990; Nemaní et al., 1993; Goward et al., 2002; Moran et al., 1994, Clarke, 1997, Prihodko y Goward, 1997; Goetz, 1997; Santholt et al., 2002; Luquet et al., 2004; Erdem et al., 2006, entre otros).

La mayoría de los métodos creados para construir el índice de estrés hídrico (EH) a partir de sensores remotos (SR) se basan en la temperatura de superficie (T_s). La interpretación de las condiciones de los cultivos a partir del infrarrojo térmico (IRT) como un indicador del estado del agua ha sido estudiada y documentada durante unos 20 años (Idso, 1982; Jackson, 1982; Jackson et al., 1981; Ceccato y Grobon, 2002; Fensholt y Sandholt, 2003; Basso et al., 2004; Schirmbeck y Rivas, 2007; Vazquez et al., 2008; Houspanossian et al., 2008; Venturini y Rivas, 2009, 2010). Esto ha llevado al desarrollo de numerosos índices de EH basados en el IRT expresando el nivel de EH del cultivo en un rango de valores que varían entre 0 y 1. Tales métodos se convierten, a través de sucesivas mejoras, en más eficientes (Moran, 2004) y han sido introducidos progresivamente en el manejo de cultivos de precisión (Moran et al., 1997).

En el caso particular de la actividad agropecuaria y de la hidrología, los SR son una buena alternativa para el conocimiento de la distribución espacial de variables de gran interés (como por ejemplo la evaporación y la transpiración, el porcentaje de cubierta vegetal y altura de los cultivos). Adquiere aun mayor interés la información obtenida desde satélite cuando se logra tener datos de la superficie con una buena resolución temporal (semana o día) (Sobrino, 2000; Rivas et al., 2002). Por ejemplo, los modelos hidrológicos de grandes cuencas requieren conocer una gran cantidad de variables en períodos cortos de tiempo (Rivas y Caselles, 2004). La heterogeneidad

de éstas, requiere modelos distribuidos de tal forma que permitan reproducir la distribución espacial de cada variable. Disponer de modelos distribuidos no es una tarea fácil, y menos aún lo es el costo que requiere el monitoreo continuo de las variables de interés. Entonces, es en estos casos que los SR son una atractiva herramienta ya que permiten obtener información de superficie con buena resolución espacial y temporal (Boegh et al., 2002).

La Región Pampeana Argentina (RPA), con características altamente productivas, ha sufrido intensas transformaciones en los últimos años, denominado este proceso de expansión agrícola como de “agriculturización”, y definido como el uso creciente y continuo de las tierras para cultivos agrícolas en lugar de usos ganaderos o mixtos (Manuel-Navarrete et al., 2005). Se asocia con cambios tecnológicos, intensificación ganadera, expansión de la frontera agropecuaria y desarrollo de producciones orientadas al monocultivo, principalmente soja, o a la combinación cereal-soja. Dicho proceso, surgido a principios de la década de los setenta, se profundiza a mediados de los noventa con la difusión de variedades transgénicas de soja, dando lugar a un consistente incremento en la intensidad de uso de los suelos (Viglizzo et al., 2002; Vazquez y Zulaica, 2011a, 2011b; Vazquez y Zulaica, 2012; Vazquez et al., 2012a; 2012b).

Ante esta situación, resulta relevante la incorporación de variables como la DAS. Fundamentalmente si consideramos además las condiciones climáticas de la RPA, la cual se rige por ciclos de sequía e inundaciones, que se presentan como un fenómeno meteorológico capaz de afectar el rendimiento, la supervivencia o la calidad de los cultivos, siendo uno de los mayores riesgos asociados a la producción agropecuaria. Este fenómeno posee una variabilidad interanual que impacta significativamente en los rendimientos de los cultivos y en la economía de la región. Por este motivo, puede considerarse a la información climática como un elemento clave para la toma de decisiones. La cuantificación de estos riesgos en la RPA, es hasta el momento, dificultosa e incompleta debido a la ausencia de homogeneidad en la toma de datos (Straschnoy et al., 2006).

En el presente trabajo, se utilizarán tres índices para la estimación del EH de cultivos, el Crop Water Stress Index (CWSI) propuesto por Jackson et al. (1981), el Water Deficit Index (WDI) aplicado por Luquet et al. (2004) y el Temperature-Vegetation Dryness Index, (TVDI) aplicado por Sandholt et al. (2002). Este estudio se desarrolla en unidades de producción seleccionadas en el sudeste pampeano, con monitoreo de diferentes cultivos, durante los ciclos 2006-2007. Teniendo en cuenta la potencialidad de utilizar imágenes de satélite (IS) del sensor remoto Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) a bordo del satélite TERRA desarrollado por la Earth Observation System/NASA de resolución espacial media (~1km²). Se validarán los índices de EH obtenidos desde información captada por satélite, con datos de terreno.

Surge entonces como objetivo determinar el índice de EH que se muestra más sensible para el cálculo de estrés, como consecuencia de una disminución de la DAS, mediante el uso de IS en la RPA.

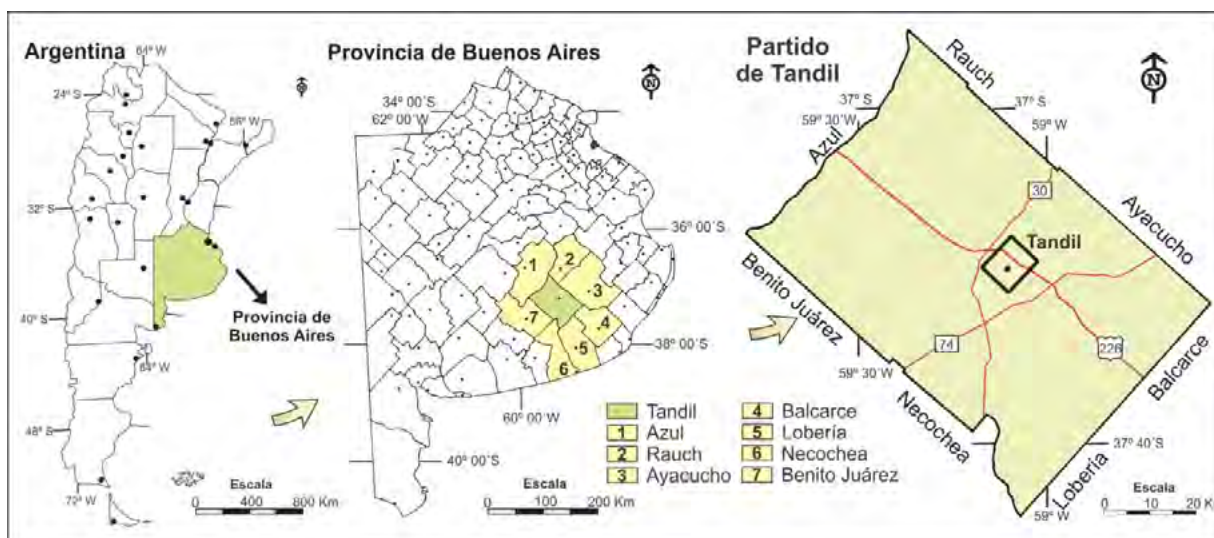
Así se pudieron llevar a cabo los objetivos específicos de este trabajo que fueron: (1) posicionar en el contexto regional y local las unidades de producción y los cultivos seleccionados; (2) describir y analizar los datos obtenidos a partir de sensores de terreno (ST) (Infrarrojo térmico y humedad del suelo); (3) describir y analizar los datos obtenidos a partir de SR aplicando los tres índices de EH propuestos para este trabajo; (4) Comparar los datos de humedad procesados a partir de ST con los índices de EH obtenidos a partir de satélite, mediante estadísticos, con la finalidad de obtener el índice que mejor se adapte a las características del área de aplicación.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

El trabajo se desarrolló en el partido de Tandil (Mapa 1), el cual se ubica dentro de la Pampa Austral o de Sierras y Llanuras Interserranas (Morello y Solbrig, 1997). Según la clasificación biogeográfica (Cabrera, 1976) se halla ubicado en el Distrito Pampeano Austral, donde la mayor parte de los pastizales nativos han sido modificados por las actividades agrícolas-ganaderas. El Orden predominante de suelos del partido de Tandil es el Molisol (99% según la clasificación del Atlas de Suelos de la República Argentina) (INTA, 1985). El clima corresponde a la zona templada serrana (Burgos, 1968). Según el trabajo realizado por Vazquez y Zulaica (2012), el partido de Tandil manifiesta una clara tendencia al “proceso de agriculturización”. En dicho trabajo se analizaron transformaciones agroproductivas del Partido durante dos períodos (1988-2002 y 2002-2010), y se examinaron algunas de sus consecuencias ambientales. Para ello se realizó una clasificación supervisada (ENVI 4.5) de imágenes satelitales (sensor TM, Landsat 5) y se efectuaron campañas de campo. En ambos períodos se evidencia el avance de la agricultura en desmedro de la ganadería. La tasa de agriculturización anual alcanzó el 1,65% y 1,66% en cada período, respectivamente. La tasa de crecimiento anual de las áreas ganaderas manifiesta una tendencia negativa más acentuada en el segundo período (1988-2002: -0,93; 2002-2010: -1,41).

Mapa 1. Localización del partido de Tandil.



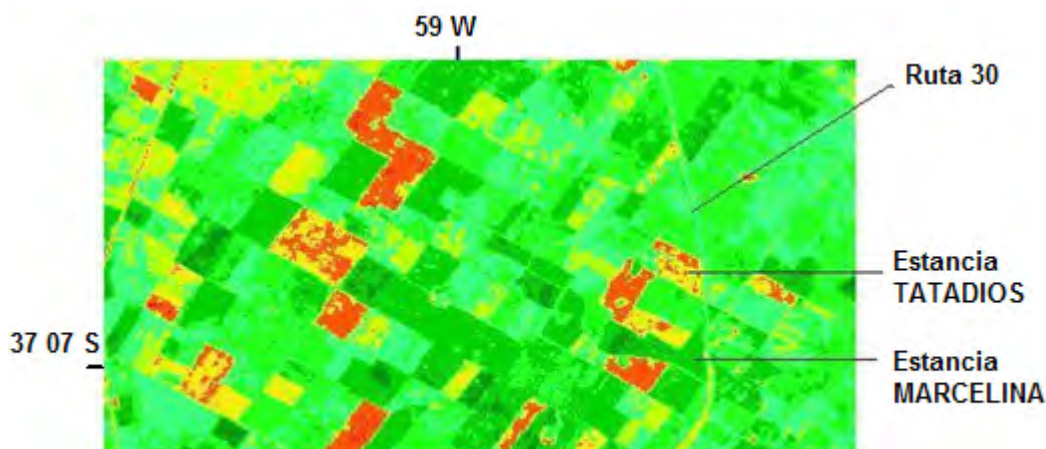
Fuente: Elaboración propia sobre la base de Vazquez y Zulaica (2012:9).

Luego, en este estudio, referido a los índices de estrés hídrico de la RPA, específicamente se tuvieron en cuenta dos unidades productivas. El acceso a los establecimientos es por la ruta provincial N° 30, en dirección a la ciudad de Rauch, al noreste de la ciudad de Tandil, provincia de Buenos Aires, Argentina.

La ubicación de las estancias (o unidades de producción) es la siguiente: “Tata Dios” (-37°07’29.5” -59°00’05.8”) en el cual se registraron datos de campo de un cultivo de trigo y “La Marcelina” (-37°08’28.9” -59°00’06.4”) en el que se obtuvieron datos del cultivo de girasol.

El Mapa 2 muestra un detalle de las parcelas seleccionadas en cada establecimiento, sobre un mapa de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

Mapa 2. Localización de las unidades de producción. Imagen Landsat 5 (2007).
 NDVI. Recorte Escena 225-86.



Fuente: Elaboración propia.

3. Análisis de datos obtenidos a partir de ST

3.1.1. Instrumental utilizado

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizó el siguiente instrumental: un Radiómetro de Infrarrojo Térmico (IRT) Portátil (marca Raytex) y un sensor de Humedad del suelo (Hs) (marca Campbell). En el Cuadro 1 se describen las características de cada uno de los sensores utilizados.

Cuadro 1. Instrumental utilizado, intervalo de medidas y error.

Equipo	Intervalo-unidad	Error
Radiómetro IRT. Modelo ST Pro Raytex.	0~50 °C	±0,82 °C
Sensor humedad. Modelo Hydrosense – Campbell.	0~100 %	±3,0 %
Fuente Calibrado. Modelo 1000 – Everest. Emisividad 0,98 ±0,01	0~60 °C	±0,1 °C

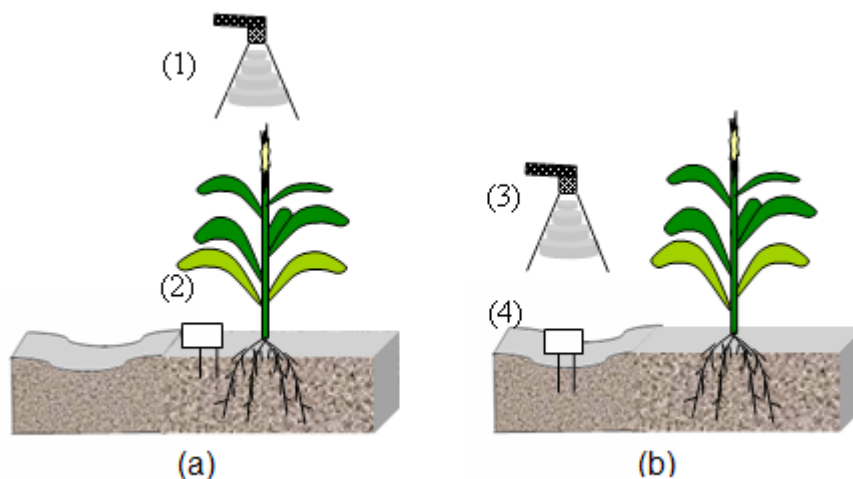
Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Medición en Campo

La RPA, presenta parcelas que se caracterizan por poseer un tamaño superior a 30 hectáreas. Las dos estancias seleccionadas (mencionadas anteriormente), donde se realizó el estudio, también presentaron estas características de tamaño. Las mismas están separadas entre sí por unos 5 km aproximadamente, se midió para cada fecha seleccionada (Cuadro 2), un conjunto de 22 transectos (es decir, 11 por parcela), los mismos poseían un recorrido de 30 m aproximadamente cada uno. Además se tenía en cuenta que en el momento de la medición de datos de terreno estuviese

realizándose la pasada del satélite, tomando dichas medidas en días despejados (sin nubes). Luego, por cada transecto se obtuvieron las variables de interés, sobre el surco y el entresurco, salvo en el caso que no fuese necesario, como lo es para el cultivo de trigo donde se toma en cuenta sólo la cubierta vegetal, debido a que no se distingue surco y entresurco. Los transectos siempre se realizaron lejos de los bordes del predio sembrado, para evitar efectos de contorno. Cabe destacar que los días en que se midió en diferentes establecimientos, la metodología fue ir primero a un campo y luego a otro, demorando no más de 30 minutos entre las medidas tomadas. De este modo, se buscó obtener mediciones en condiciones similares y posibilitar así su posterior comparación con los datos calculados a partir de IS. En cada transecto se midió la temperatura radiativa y la humedad volumétrica sobre el cultivo (T_c ($^{\circ}\text{C}$) y H_s (%)) en el caso del trigo, y en el caso del girasol además se midió en el entresurco (T_{es} ($^{\circ}\text{C}$) y H_{es} (%)). La T_c se registró a 30 cm por encima de la cubierta vegetal en dirección hacia abajo, asegurando que el área observada correspondiese únicamente a vegetación (Imagen 1 (a)-1). La H_s se midió siempre insertando el sensor de humedad en el suelo, a unos 10 cm del tallo de la planta (Imagen 1 (a)-2), usando electrodos de 12 cm de longitud. La T_{es} se midió en el entresurco del cultivo de manera tal que el sensor IRT siempre se encontrase observando suelo desnudo a unos 30 cm de la superficie (Imagen 1 (b)-3). Por último, la H_{es} se registró clavando el sensor de humedad en el entresurco (Imagen 1 (b)-4).

Imagen 1. Metodología de medición de Humedad del suelo y Temperatura radiométrica sobre el cultivo (a) y sobre el entresurco (b).



Fuente: Houspanossian et al. (2008:70).

Para la calibración de los radiómetros se usó la fuente de calibrado ya mencionada, la cual se llevó al campo en cada una de las salidas. Se ubicó la misma a la sombra de un árbol y se esperaban unos 10 minutos para que se estabilizase su temperatura. Luego el radiómetro IRT era apuntado hacia el objetivo negro de la Fuente de Calibrado, a aproximadamente 3 cm de la misma y se registraban las lecturas tanto del termómetro radiómetro IRT como las del visor de la fuente de calibrado. Esta práctica se realizó metodológicamente repetidas veces antes y después de realizar los transectos en el campo en cada salida con la finalidad de contar con una suficiente cantidad de puntos para lograr la función de intercalibrado. Así, una vez terminada la campaña todos estos registros fueron volcados en un gráfico de dispersión, a los cuales se ajustó una función, para construir la curva de calibración del sensor IRT utilizado.

3.1. Análisis de datos obtenidos a partir de SR

3.1.1. Características del sensor MODIS

Para este trabajo el cual plantea la comparación de indicadores de EH calculados a partir de IS con medidas de campo tomadas a lo largo del ciclo de un cultivo de trigo y girasol, fue importante contar con un satélite que tuviese una buena revisita (es decir una frecuencia de pasadas por el área de estudio relativamente alta) y que además posea un sensor a bordo con las bandas espectrales necesarias para el cálculo de los índices de EH. Por este motivo es que fueron seleccionadas imágenes captadas por la misión EOS por medio del sensor MODIS a bordo del satélite TERRA. El satélite TERRA tiene una órbita polar alrededor de la Tierra con pasada desde el norte al sur cruzando por el Ecuador en la mañana. TERRA/MODIS capta información de la tierra cada 1 ó 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas del espectro electromagnético. La resolución espacial de MODIS, es de 250*250 m² en las bandas 1 y 2; 500*500 m² en las bandas 3-7 y 1 km² en el resto de las bandas 8-36. En este trabajo son utilizadas para la estimación de los índices de EH, las bandas de las regiones del espectro electromagnético: B1 (R), B2 (NIR), B5 (SWIR), B31 y B32 (IRT). Los datos adquiridos por el sensor MODIS son transferidos a estaciones terrenas, y adquiridos por la EOS, quienes realizan diferentes procesamientos sobre las imágenes brutas MODIS, dando como resultado distintos niveles de procesamiento de los productos MODIS. El Nivel 1A corresponde a las radiancias medidas por el sensor sin tratamiento alguno y el nivel 1B contiene las radiancias del sensor corregidas y calibradas (reescaladas entre 0 - 32767) (MODIS Product User's Guide For Level 1B). En esta experiencia se trabajó a partir de imágenes con nivel de procesamiento 1B de 1 km² de resolución espacial. Las imágenes fueron bajadas de la página web: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>, y la fecha en la que se accedió por última vez para este trabajo fue el 31/01/2007.

Se determinó un cronograma de paso de los satélites sobre la región (Cuadro 2), utilizando un software de modelado de paso de satélites, (software libre WXtrack - Satellite tracking - Copyright © David Taylor, Edinburgh), donde se determinaron las fechas y horarios en que el satélite TERRA monitorea la región de estudio con un ángulo observación zenital satelital menor a 65°. Las imágenes utilizadas corresponden a condiciones de cielo despejado con cobertura nubosa menor a 3/8.

Cuadro 2: Pasadas de satélites MODIS para las salidas de terreno.

Salidas	Fechas	Sensor	Ángulo solar (grados)	UTC (Tiempo Universal Coordinado)
1	03/11/2006	S TERRA	85	13:51
2	08/11/2006	S TERRA	60	14:09
3	12/11/2006	S TERRA	74	13:45
4	30/11/2006	S TERRA	85	13:20
5	04/12/2006	S TERRA	82	13.49
6	18/12/2006	S TERRA	64	13:36
7	21/12/2006	S TERRA	81	13:48

Salidas	Fechas	Sensor	Ángulo solar (grados)	UTC (Tiempo Universal Coordinado)
8	08/01/2007	S TERRA	67	13:50
9	26/12/2006	S TERRA	66	14:06
10	15/01/2007	S TERRA	65	13:40
11	31/01/2007	S TERRA	62	13:38

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Procedimientos previos al cálculo de los índices de EH.

Las IS procesadas en este estudio fueron un total de once, y las fechas coinciden con las de salidas al campo. La metodología de procesamiento de las imágenes es la descrita a continuación:

— Georeferenciación: se realizó utilizando los campos de geolocalización disponibles a partir del producto MYD-03 de MODIS, referenciado a partir de las efemérides del satélite, con el mismo se genera Geographic Lookup Table (GLT) y a partir de este se llevan las matrices del Nivel 1b de EOS-MODIS a una matriz georeferenciada según la Proyección UTM, Datum WGS-84, Zona 21.

— Cálculo de radiancia y reflectancia para MODIS: las IS MODIS con las que se trabajó se encuentran en un nivel de procesamiento bajo, sus valores se encuentran en un sistema de escalado llamado Scaled Integer y para trabajar con estas imágenes se buscó transformar estos valores a radiancia y reflectividad. Para realizar las transformaciones de las imágenes magnitudes físicas de radiancia ($\text{Watt/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$) se utilizaron los datos de calibración para cada banda, implícitas en cada imagen (efemérides del satélite), y aplicando la ecuación 1 (MODIS User Guide, 2003):

$$Lk[\text{Watt} / \text{m}^2 * \text{sr} * \mu\text{m}] = Ak * (SI - Bk) \quad (1)$$

donde:

- Lk: representa el valor de radiancia siendo su unidad ($\text{Watt/m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$).
- k: representa la banda espectral del sensor.
- Ak (Radiance_scales): es el factor multiplicativo de cada banda k.
- SI: es el valor de la cuenta digital reescalada entre el cero y el máximo valor máximo que puede obtener un píxel (32767).
- Bk (Radiance_offsets): es un valor constante para cada banda k.

Para realizar las transformaciones a reflectividad ($\rho(\%)$) se utilizaron los datos de calibración para cada banda utilizando la ecuación 2 (MODIS User Guide, 2003):

$$\rho(\%)k = AkR(SI - BkR) \quad (2)$$

donde:

- AkR (Reflectance_scalesk): es el factor multiplicativo para cada banda.
- SI: es el valor de la cuenta digital reescalada entre el cero y el máximo.
- BkR (Reflectance_offsetsk): es un valor para cada banda, en general vale cero.

— Cálculo de la temperatura radiativa para MODIS: La banda 31 adquiere información en la ventana espectral de 10,780 – 11,280 μm , mientras que la banda 32 lo hace en la ventana espectral de: 11,770 – 12,270 μm . Estas son bandas emisivas de radiación de onda térmica, y para obtener el valor de sus temperaturas radiativas (T_{31} y T_{32}) se debe utilizar una función semejante a la inversa de la Ley de Planck propia de cada canal. Las ecuaciones de transformación son:

$$T_{31} = \frac{14388}{11,025 * \log \left(1 + \frac{1,1911 * E_{31}}{(11,025)^5 * L_{31}} \right)} \quad (3)$$

$$T_{32} = \frac{14388}{12,029 * \log \left(1 + \frac{1,1911 * E_{32}}{(12,029)^5 * L_{32}} \right)} \quad (4)$$

donde:

- 11,025 y 12,029 son los valores medios de la ventana espectral de la banda 31 y de la banda 32 respectivamente (en micrómetros).
- E: bandas emisivas (E_{31} y E_{32}) de radiación de onda térmica.
- L: bandas de radiancia medida en cada banda (L_{31} y L_{32}).

Para la obtención de la temperatura radiativa de la superficie, se utilizó el algoritmo de tipo split window (SW) propuesto por Sobrino et al. (2002) (ecuación 5). Este es un método de absorción diferencial y utiliza dos canales dentro de una misma ventana atmosférica (ubicada entre 10 y 12,5 μm), obteniendo similares procesos de absorción y emisión atmosférica y por tanto una buena correlación entre la corrección atmosférica en un canal y la absorción diferencial entre las dos bandas.

$$T_s = T_{31} + 1,52 + 1,79 * (T_{31} - T_{32}) + 1,2 * (T_{31} - T_{32})^2 \quad (5)$$

siendo T_{31} (K) y T_{32} (K) las temperaturas radiativas en las bandas 31 y 32 logradas a partir de las ecuaciones 3 y 4.

En cada pasada de satélite se obtienen los valores de T_s para cada imagen, con la finalidad de efectuar los cálculos de los índices, esto se realiza teniendo en cuenta las fechas y horarios (Cua-

dro 2) en que el satélite tendría un ángulo de observación menor a 65° y teniendo en cuenta que no haya nubes al momento del paso del mismo. Una vez obtenida la Ts a partir de SR, y con las condiciones previas descritas para las imágenes captadas sobre la región en estudio, se comparan con los valores obtenidos en campo, con el fin de corroborar si las temperaturas de campo se corresponden con las obtenidas por el satélite. Los datos mostraron diferencias insignificantes. Luego, las imágenes fueron aptas para la realización de este estudio.

3.2. Estimación de los índices de EH

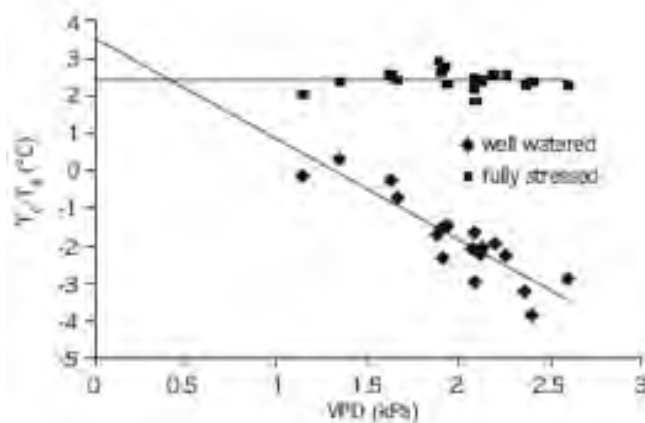
3.2.1. Calculo del CWSI

El CWSI se sustenta en la relación entre la diferencia de temperatura de la superficie observada y la del aire (Ts-Ta), y el déficit de presión de vapor (DPV). La utilidad del CWSI se limita a cultivos de cobertura completa, es decir cuando en la superficie no es visible el suelo desnudo, y esto implica que la Ts es igual a la temperatura de la vegetación (Tc) (Jackson et al., 1982; Moran, 2004). Tanto para el presente índice como para los siguientes, la temperatura del aire (Ta) se obtuvo en la estación meteorológica del campus de Tandil. El CWSI se sustenta en delimitar las líneas de máximo (ul) y nulo (ll) estrés hídrico a partir de la relación DPV versus Tc-Ta (Erdem et al., 2005).

$$CWSI = \frac{((Tc - Ta) - (Tc - Ta)_{ul})}{((Tc - Ta)_{ul} - (Tc - Ta)_{ll})} \quad (6)$$

La Imagen 2 muestra los límites ul y ll para un cultivo de alfalfa y uno de maíz siempre suponiendo máxima cobertura vegetal. Las funciones lineales de pendiente negativa indican el límite de no estrés hídrico (CWSI=0) mientras que la función constante y=3 determina los puntos de nula transpiración (CWSI=1). El CWSI afirma o no la necesidad de riego en un cultivo específico. El uso de este índice se ha extendido en áreas bajo riego intensivo con la finalidad de estimar la productividad y el uso eficiente de agua de riego (Erdem et al., 2005).

Imagen 2. Diferencia entre Tc-Ta versus DPV en un cultivo de frijoles con buen estado hídrico y uno con elevado estrés



Fuente: Erdem et al. (2005).

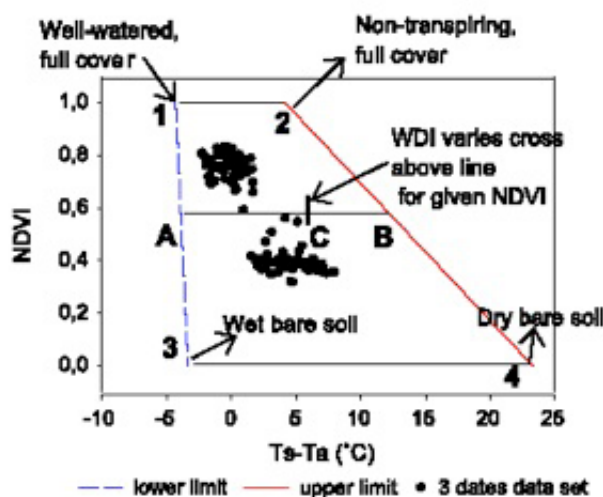
3.2.2. Calculo del WDI

El WDI se ha calculado a partir de la utilización propuesta en Luquet A. y otros (2004):

$$WDI = 1 - \left[\frac{(T_{su} - T_a) - (T_s - T_a)}{(T_{su} - T_a) - (T_{sl} - t_a)} \right] \quad (7)$$

Tsu y Tsl corresponden a los límites superior e inferior logrados en el trapecoide propuesto por Moran et al. (1994) (Imagen 3).

Imagen 3. Trapecoide del WDI.



Fuente: Moran et al. (1994), tomado de Luquet et al. (2004:9).

El extremo superior izquierdo del trapecoide de la Imagen 3 corresponde a un cultivo con buen contenido de agua (100% cobertura) y el extremo superior derecho corresponde a un cultivo donde no hay transpiración (T) (100% de cobertura vegetal) (puntos 1 y 2 respectivamente). Estos dos puntos indican los límites inferior y superior del CWSI. La porción de abajo del trapecoide, indica suelo desnudo, y este varía entre suelo húmedo (3) y seco (4).

3.2.3. Cálculo del TDVI

El Temperature Vegetation Dryness Index (TDVI) se sustenta en principios similares a los índices antes descritos con límites húmedo y seco en un espacio triangular. Requiere obtener los parámetros de una función lineal lograda entre la Ts y el NDVI (límite seco del trapeco de Moran et al., 1994). Este índice está relacionado con la variabilidad de la Hs a diferencia de otras interpretaciones existentes de Ts/NDVI. Está basado solamente en información obtenida desde satélite (tendencia actual en el uso de sensores remotos), y su potencial de aplicación operacional es amplio (Sandholt et al., 2002).

Para la estimación de la ecuación propuesta por Sandholt et al. (2002) del (TDVI), es necesario primeramente definir la ecuación de NDVI detallada por Rouse et al. (1974):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (8)$$

donde:

- NIR: es la banda 2 (MODIS) de reflectividad del infrarrojo cercano.
- R: es la banda 1 (MODIS) de reflectividad del rojo.

Luego la ecuación del TDVI queda representada de la siguiente manera:

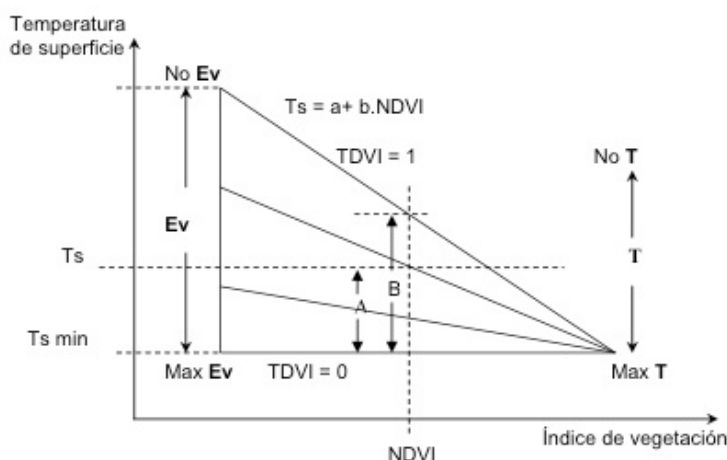
$$TVDI = \frac{Ts - Ts_{min}}{a + b * NDVI - Ts_{min}} \quad (9)$$

donde:

- Ts es la temperatura en el píxel (K) (obtenida a partir de las bandas 31 y 32 del MODIS).
- Tsmin es la mínima temperatura de superficie (K) (obtenida a partir de las bandas 31 y 32 del MODIS).
- NDVI: ecuación (8) propuesta por Rouse et al. (1974).
- “a” y “b” son parámetros propios del área de estudio que se obtienen desde una imagen de satélite. Los parámetros “a” y “b” se calculan a partir de la relación existente entre NDVI y Ts (Rivas et al., 2005).

Los parámetros a y b, y Tsmin se obtuvieron realizando un gráfico de dispersión entre las bandas NDVI y Ts para cada imagen. De este modo se calcularon los datos requeridos para la aplicación de la ecuación 4 identificando el límite seco y húmedo correspondiente (Imagen 4, donde Ev es la evapotranspiración).

Imagen 4. Triángulo que define los límites del TVDI.



Fuente: Las abreviaturas han sido definidas en el texto (tomado de la adaptación de Rivas et al., 2005:197).

3.3. Comparación entre las medidas de campo y los índices calculados desde IS

Una vez obtenidos los datos proporcionados por SR y por los ST, se realiza la comparación entre estos, es decir los índices de EH aplicados se corroboran con los datos de humedad obtenidos en el terreno.

Primeramente, se observa si de las temperaturas de superficie respectivas a las salidas de campo, son las mismas que las obtenidas en las imágenes de satélite. Luego, si son válidos los cálculos obtenidos a partir de la ecuación 5, se calculan los índices de EH a partir de las ecuaciones 6, 7 y 8. Por lo anterior, es que surge la importancia de revalidar los datos de Ts en función de los ST y SR.

Así, luego de procesar las once imágenes y de calcular el NDVI, la Ts, el CWSI, el WDI y el TDVI se procede a ubicar en ellas la región donde se encuentran los establecimientos agropecuarios en el cual se realizó el trabajo de campo. Para ello se midió en las parcelas las coordenadas con GPS (Global Positioning System) en latitud/longitud (elipsoide de referencia WGS84) y con la función localización de ENVI 4.4 se ubicaron en la imagen. Luego se delimitaron las regiones de interés de 3x3 píxeles (9 km²) en las que está contenido el campo de trigo en la unidad de producción “Tata Dios” y de girasol en “La Marcelina”, y se generó un vector que contiene cada área de interés. Posteriormente se aplicó el vector a cada imagen considerada, luego se exportaron los datos de NDVI, Ts, CWSI, WDI y TDVI, para cada una de las fechas, para luego comparar las mediciones de humedad obtenidas sobre la parcela de trigo y girasol con los resultados obtenidos a partir de los índices de EH, tomando los valores medios por fecha de los cultivos.

3.4. Análisis estadístico de los índices usados

Para evaluar la calidad de los índices usados se utilizaron los siguientes estadísticos:

3.4.1. La raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (Pi - Oi)^2}{m}} \quad (10)$$

donde:

- m: es el número de observaciones.
- i: número de observaciones (i=1...m).
- Oi: es el valor observado.
- Pi: es el valor calculado a partir del índice.

3.4.2. El error relativo (RE)

$$RE = \frac{RMSE}{O} \quad (11)$$

siendo O el valor medio de Oi con i = 1, 2, . . . ,m.

3.4.3. El coeficiente de determinación (r^2):

$$r^2 = \frac{\left[\sum (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

donde:

- \bar{P} y \bar{O} : son los valores medios de P_i y O_i .

3.4.4. El índice de concordancia de Willmott:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^m (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (13)$$

donde:

- $P'_i = P_i - O_i$.
- $O'_i = O_i - O$.

El índice fue considerado bueno cuando $d \geq 0,9$ y $RE \leq 0,2$ y cuando el $r^2 > 0,8$ (Cai J. y otros, 2007).

Para calcular el valor observado, O (%) de la H_s (%), medida en el terreno, se ha considerado una capacidad máxima (H_{max}) de 31 % y una mínima (H_{min}) del 5 % para los 12 primeros cm del suelo (valores calculados para un Argiudol típico del campus Tandil) aplicando:

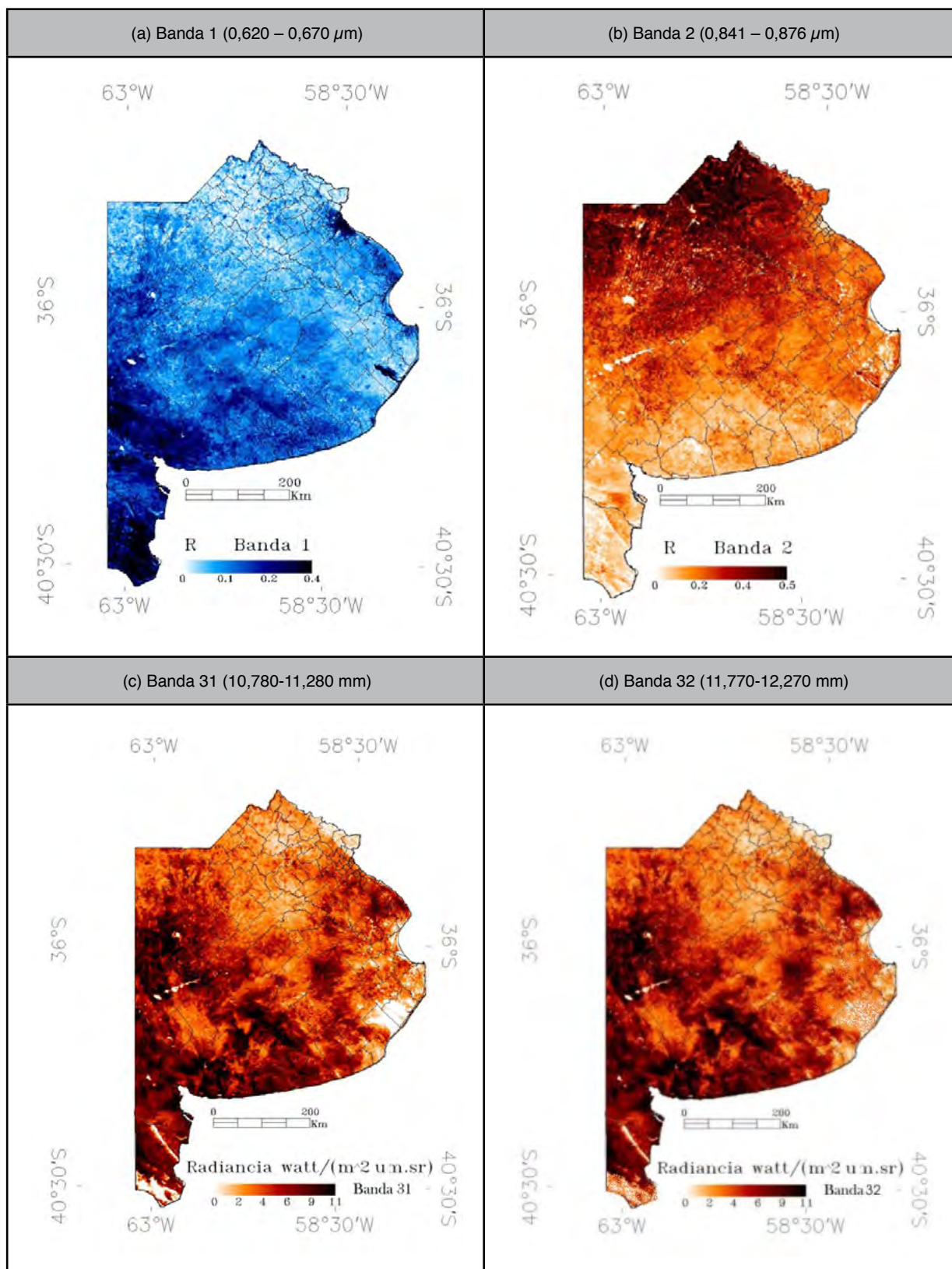
$$O = \frac{H_{max} - H_s}{H_{max} - H_{min}} \quad (14)$$

4. Resultados y Discusión

4.1. Procesamiento y análisis de datos obtenidos a partir de SR

El Mapa 3 muestra la reflectividad de la superficie en la banda 1 y 2 (3 (a) y (b)) y la radiación emitida en las bandas 31 y 32 (3 (c) y (d)). Son el resultado de aplicar las ecuaciones 1 y 2 a las bandas 31 y 32 de MODIS para el día 31/01/2007. La reflectividad en el visible (V) varía entre 0 y 0,4 % mientras que en el IRC lo hace entre 0 y 0,5 %. Los valores más altos en el IRC son un indicativo de alta proporción de vegetación que presenta la RPA en su conjunto. Además se puede notar la alta reflectividad en el V para la zona sur-sur-oeste de la provincia y valores mínimos en el norte, centro y este en la que la reflectividad es máxima en el IRC. También se observan las zonas con fuerte absorción de la longitud de onda en V e IRC (zona de lagunas en Las Encadenadas y otros sectores con cuerpos de agua de gran extensión).

Mapa 3. Mapas de la RPA de las bandas del sensor MODIS necesarias para la aplicación de los índices propuestos. Reflectividad (a-b) y Radiancia (c-d).

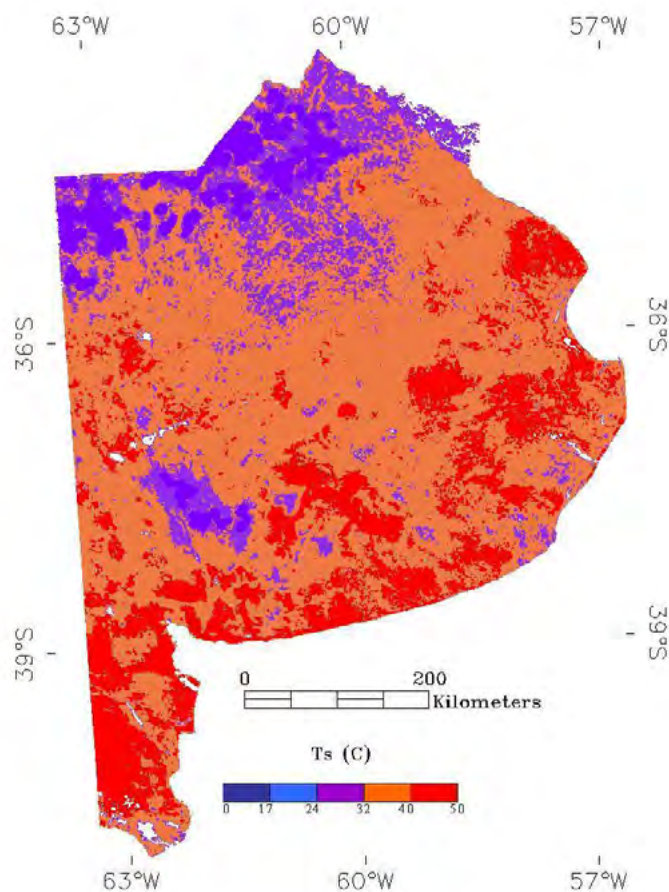


Fuente: Elaboración propia.

Los Mapas 3 (c) y (d) muestra la variación espacial de la radiancia emitida en las bandas 31 y 32 a partir de las cuales se logrará obtener la temperatura radiativa de la superficie. Los valores de radiancia son menores a $11 \text{ W m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ en ambos mapas con valores menores en la banda 32 a consecuencia de una mayor absorción de vapor de agua en el intervalo 11,770-12,270 mm.

El Mapa 4 muestra la T_s resultante luego de la aplicación de la corrección atmosférica (ecuación 5). En el mapa se observa que la temperatura de la superficie presenta un dominio de valores entre 32 y 40 °C con máximas temperaturas en sectores puntuales de la RPA pudiendo llegar a máximos en sectores de baja cobertura vegetal. Se observa también que la T_s delinea el Río Colorado y el Río Negro al sur de la RPA en respuesta de la elevada diferencia de temperaturas entre los ríos y los terrenos del entorno muy secos.

Mapa 4. Mapa de T_s de la RPA logrado luego de aplicar la corrección atmosférica (fecha 31/01/2007).



Fuente: Elaboración propia.

4.2. Comparación de los datos de terreno con la información obtenida desde satélite

4.2.1. Análisis de la Hs en conjunto a escala de parcela

La Hs en los predios analizados ha variado de 12,4 % a 30,4 % en respuesta a las precipitaciones registradas y a las condiciones de cada suelo. Se comenzó el análisis con un 16 % de humedad y se finalizó éste con un mismo valor. Para cada uno de los índices se ha valorado la sensibilidad a la

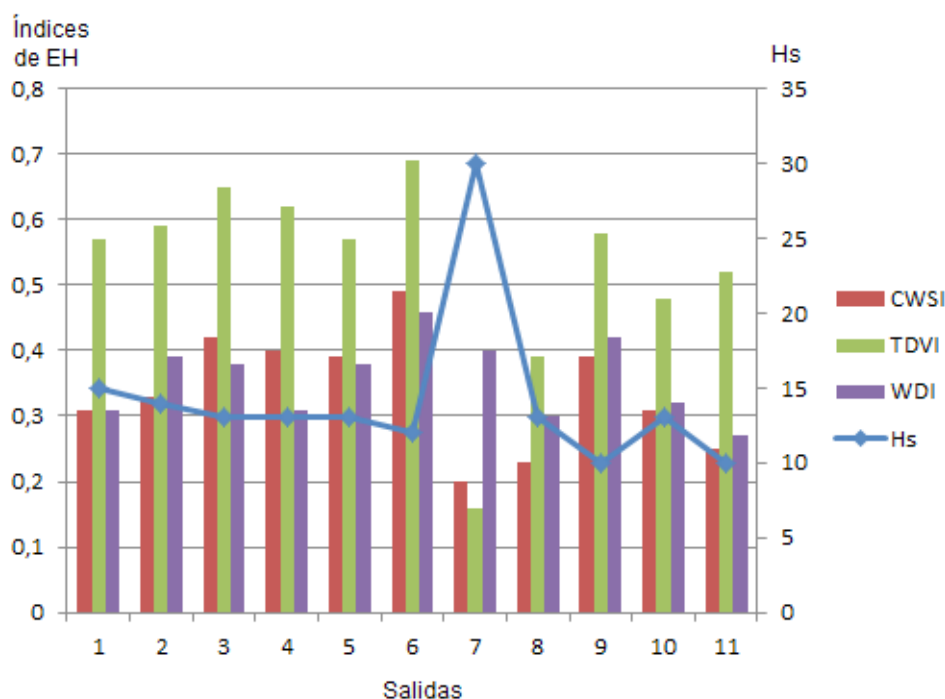
detección de los cambios de Hs. De este modo se ha comparado independientemente cada índice y por último en conjunto.

4.2.2. Análisis de los índices de EH en conjunto

En el Gráfico 1 se presenta el análisis global de los índices de EH (en gráfico de barras) en relación a la Hs (en líneas) medida en las parcelas de manera detallada en base a las once salidas efectuadas en el campo (Cuadro 2) al momento del paso del satélite, mostrando valores que se han agrupados por valores medios de las dos áreas de estudio seleccionadas (Gráfico 1). En el análisis de estos se observa que el TDVI tiene una mayor sensibilidad a pequeñas fluctuaciones en la Hs, el WDI presenta una menor sensibilidad; mientras que el CWSI no muestra cambios observables para pequeñas variaciones de Hs.

Si se analiza entonces de manera mensual (Gráfico 1) se puede observar en las salidas 1 a 4 del mes de noviembre (2006), que la Hs ha estado por debajo del 16% con leves fluctuaciones que en todos los casos los índices fueron capaces de identificar. Sin embargo, en el mes de diciembre del mismo año (salidas 5 a 7) presentó la máxima Hs (30,4 %) observándose un cambio abrupto de los tres índices de EH. Por último, en el mes de enero del 2007 (salidas 8 a 11) la humedad del suelo ha sido relativamente baja (entre el 17,4 y 12,4 %) con pequeños cambios que fueron identificados por los índices.

Gráfico 1. Variación en el tiempo de la Hs vs EH (CWSI- WDI-TDVI)



Fuente: Elaboración propia.

En este punto del análisis se puede decir que el TDVI y el WDI muestran una buena aptitud para la detección de cambios hídricos en el sistema agua-suelo-planta, mientras que el CWSI no sería adecuado para emplear en las condiciones aquí realizadas, particularmente por su aptitud para ser aplicados en superficies con máxima cobertura vegetal.

4.2.3. Análisis y Comparación Estadística

La Cuadro 3 muestra la comparación de los índices estimados a partir de las ecuaciones de CWSI, WDI y TDVI con los observados en el terreno. El que mejor ajuste presenta es el TDVI con un coeficiente de Willmott de 0,95, un r^2 de 0,97 y un RMSE de 0,06 %. El CWSI y WDI muestran un RMSE similar con un coeficiente de determinación significativamente menor en el CWSI, y un coeficiente de Willmott con comportamiento inverso (0,94 y 0,67).

Cuadro 3: datos estadísticos

ÍNDICES DE EH	RMSE	RE	r^2	d
CWSI	0,23	0,43	0,49	0,94
WDI	0,21	0,40	0,70	0,67
TDVI	0,06	0,12	0,92	0,95

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Ejemplo de aplicación de grado de estrés para la RPA.

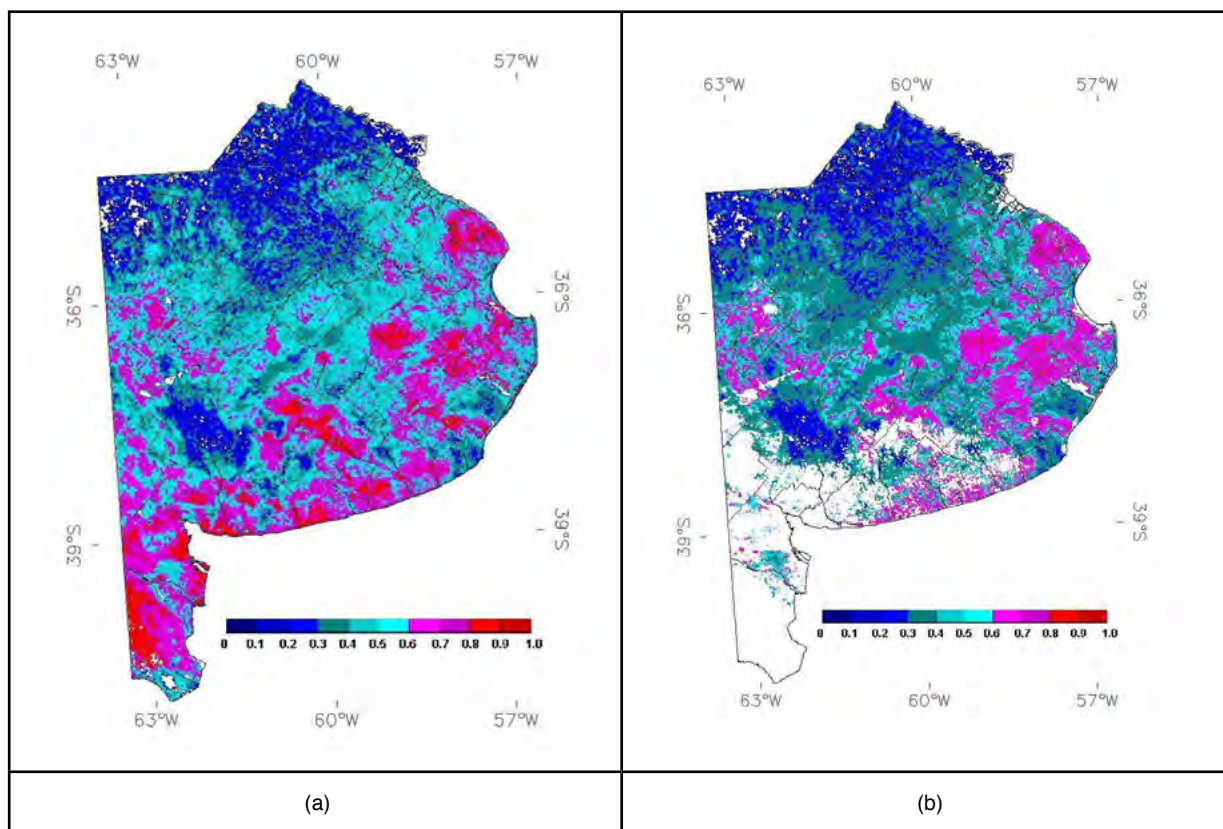
De los resultados anteriores se puede comprobar que el TDVI es el índice que presenta una aptitud adecuada para el cálculo del EH. Este índice es de sencilla aplicación y presenta importantes beneficios ya que requiere únicamente de datos captados desde satélite.

A modo de ejemplo se analiza el comportamiento del estrés de la RPA aplicando el TDVI a una imagen que se seleccionó del 31/01/2007 que presentaba mínima nubosidad, bajo ángulo de observación y una atmósfera con bajo contenido de vapor de agua. Con esta imagen se ha seguido la metodología utilizada para la estimación del TDVI, utilizando la ecuación de límite seco ($y = -33,30x + 58,06$) establecida a partir del conjunto de rectas originadas por la nube de puntos del espacio $T_s/NDVI$ para las 11 fechas analizadas (donde $y = T_{smax}$ y $x = NDVI$).

El Mapa 5 muestra el resultado del TDVI logrado utilizando los parámetros mostrados para toda la RPA (Mapa 5 a) y para sectores con mayor proporción de cubierta vegetal (Mapa 5 b). Se puede ver con adecuada precisión las zonas con mayor déficit y aquellas con mínimas limitaciones de agua.

El Mapa 5 (b) muestra la resultante de aplicar el TDVI (para $NDVI > 0,4$), y considerando lo expresado por Sandholt et al. (2002), los cuales señalan que valores de TDVI cercanos a cero indican un mayor estatus hídrico de la vegetación (o sea, menor EH) y valores cercanos a 1 indican una vegetación con mayor EH; es posible decir entonces que la zona de los partidos del centro de la RPA, es la más afectada para el desarrollo de cultivos, ya que se encuentran los valores con mayor EH (0,8 y 1). Siguiendo hacia el Norte - Oeste y Centro de la RPA se dan situaciones de mejoría respecto del EH (0,5 y 1). En la zona Sur - Este (partidos de Tandil, Ayacucho y Sur de Azul), ya se presentan valores con superiores condiciones de humedad, que permiten mejorar los rendimientos de los cultivos debido al menor EH (0,2 y 0,5) (Holzman, 2012). En la zona costera Sur, se observa que presenta condiciones hídricas intermedias, mientras que en la zona Este las condiciones hídricas son adecuadas (con valores cercanos a 1).

Mapa 5. TDVI en todo el área de la RPA (a) y TDVI con NDVI > 0,4 (b). (31/01/2007).



Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusiones

Se analizaron tres índices de EH que utilizan información de satélite, dos de ellos combinan información de satélite con datos de estaciones meteorológicas (CWSI y WDI) y el tercero únicamente información de satélite (TDVI). Éstos índices se calculan a partir de datos registrados en el sector del espectro electromagnético del IRT (8-14 μm) (CWSI, WDI y TDVI) e información del óptico (TDVI).

Estudios previos realizados en diferentes regiones del mundo y en la zona de la RPA muestran una buena consistencia del CWSI, del WDI y del TDVI para la estimación del EH (Price, 1990; Nemani et al., 1993; Nemani y Running, 1989; Moran et al., 1994; Jackson, 1982; Jackson et al., 1981; Idso, 1982; Clarke, 1997; Prihodko y Goward, 1997; Goetz, 1997; Luquet et al., 2004; Erdem et al., 2005; Straschnoy et al., 2006; Goward et al., 2002; Sandholt et al., 2002; Luquet et al., 2004; Schirmbeck y Rivas, 2007; Vazquez et al., 2008; Houspanossian et al., 2008; Venturini y Rivas, 2010).

Del análisis de los resultados de los índices de estrés, calculados a partir de datos captados por el sensor MODIS, respecto a las medidas realizadas in situ (campañas de terreno sobre cultivo de trigo y girasol) se desprende que el TDVI (sustentado en T_s y NDVI) es el más sensible a los cambios en la disponibilidad de agua del suelo. Éste ha mostrado una elevada capacidad de detec-

ción de los cambios de humedad de suelo registrados en las campañas presentando una adecuada variabilidad temporal y un buen rango de variación.

En cuanto al comportamiento estadístico el TDVI es el que mejor resultado arroja en: raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE (0,06%)), coeficiente de concordancia de Willmott (d (0,95)), coeficiente de determinación (r^2 (0,92)) y el error relativo (RE (0,12)).

Los dos índices restantes presentaron un comportamiento similar teniendo una menor variación, entre máximos (35 %) y mínimos (12 %) de humedad medida, menor a la registrada con el TDVI. Los estadísticos mostraron una aptitud diferente y en el caso del CWSI presento un valor de concordancia (d) bueno (0,94), no así el coeficiente de determinación (0,40).

Además, es importante indicar que el TDVI es el índice más sencillo de calcular (con respecto al CWSI y al WDI) ya que requiere datos de temperatura de superficie y del NDVI, con los cuales se determina el límite seco y húmedo (siendo propio del área del estudio y de la imagen considerada). Es por ello que es importante la estimación del límite seco extremo del área para garantizar una valoración multitemporal consistente al momento de realizar un análisis espacio temporal.

El conocimiento generado en este trabajo permite facilitar diagnósticos de DAS en la RPA, que como ya se ha mencionado, dicha región se encuentra en la actualidad atravesando por un intenso proceso de expansión e intensificación agrícola (Vazquez y Zulaica, 2012; Vazquez et al., 2012a; 2012b) con una importante incorporación de tecnologías, tales como, nuevas maquinarias, agroquímicos, híbridos, y todo tipo de insumos para la producción, sumado por supuesto a la incorporación de personal calificado, tan necesarios a la hora de implementar técnicas tales como la siembra de precisión. Pero todo lo anterior puede verse afectado en el aumento de los riesgos económicos por su elevada dependencia del desarrollo de los cultivos y las condiciones meteorológicas, por lo tanto, el cálculo del indicador de EH a partir del índice TDVI, puede generar diagnósticos a un menor costo y tiempo de ejecución, con respecto al CWSI y WDI, además de presentar valores estadísticos que comprueban la mayor sensibilidad ante diferentes cambios en la DAS.

6. Agradecimientos

Agradezco a mi director de Tesis de Maestría, Dr. Raúl Rivas, por su guía y aportes. Además agradezco al Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA). Director Dr. Eduardo Usunoff, por los fondos otorgados para la realización del presente trabajo.

7. Referencias bibliográficas

- Basso, Bruno, Cammarano, Davide y De Vita, Pascuale (2004). "Remotely sensed vegetation indices: theory and applications for crop management". *Rivista Italiana di Agrometeorologia*. 36-53.
- Boegh, Eva; Soegaard, Henrik y Thomsen, Anton (2002). "Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance". *Remote Sensing of Environment*. 79: 329-343.
- Burgos, Juan Jacinto (1968). El clima de la PBA en relación con la vegetación natural del suelo. En: Cabrera, Ángel (ed.). *Flora de la PBA*. INTA. Col. Científica. Tomo IV. Parte I: 33-100.
- Cabrera, Ángel (1976). "Regiones Fitogeográficas Argentinas". *Enciclopedia Argentina Agrícola y de Jardín*. 2(1):1-85.
- Cai, Joe; Liu, Xia; Lai, T. y Santos Pereira, L. (2007). "Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages". *Agricultural and Forest Meteorology*. 145: 22-35.
- Ceccato, Pietro y Gobron Nadine. (2002). "Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1. Theoretical approach". *Remote Sensing of Environment*. 82:188-197.
- Clarke, Thomas R. (1997). "An empirical approach for detecting crop water stress using multispectral airborne sensors". *Hort Technology*. 7(1): 9-16.
- Erdem, Yegim; Seherali S.; Erdem Tolga y Kenar, D. (2005). "Determination of Crop Water Stress Index for Irrigation Scheduling of Bean (*Phaseolus vulgaris* L.)". *Remote Sensing of Environment*. 30: 195-202.
- Fensholt, Rasmus y Sandholt, Inge (2003). "Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment". *Remote Sensing of Environment*. 87:111- 121.
- Goetz, Scott (1997). "Multisensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site". *International Journal of Remote Sensing*. 18 (1): 71- 94.
- Goward, Inge; Xue, Yongkang y Czajkowski, Kevin (2002). "Evaluating land surface moisture conditions from remotely sensed temperature/vegetation index measurements an exploration with the simplified simple biosphere model". *Remote Sensing of Environment*. 79: 225-242.
- Holzman, Mauro Ezequiel (2012). *Estimación del estrés hídrico en cultivos y su relación con rendimientos en la región pampeana mediante imágenes de temperatura de superficie e índices de vegetación*. Tesis de doctorado. Argentina: Bahía Blanca. http://cursosihlla.bdh.org.ar/Tesis_Holzman [consulta: 20 de abril de 2012].
- Houspanossian, Javier; Rivas, Raúl y Vazquez, Patricia. (2008). "La Humedad del Suelo Cultivado con Maíz y la Relación con la Temperatura Radiativa de su Cubierta Vegetal". *Revista Ciencia*. 3 (6): 65-74. exactas.unca.edu.ar/revista/v70/pdf/RevCiencia7-5.pdf [consulta: 15 de diciembre de 2012].
- Idso, Sherwood; Jackson, Ray; Pinter, Jr. Paul; Reginato, Robert y Hatfield, J. (1981). "Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability". *Agricultural Meteorology*. 24:45-55.
- Idso, Sherwood (1982). "Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress". *Agricultural Meteorology*. 27:59-70.
- INTA (1985). "Atlas de Suelos de la República Argentina. Proyecto PNUD-ARG. 85/019". Tomo I y II. INTA SA-GYP (eds). Argentina: Buenos Aires.
- Jackson, Ray; Idso, Sherwood; Reginato, Robert y Pinter, Jr. Paul. (1981). "Canopy temperature as a crop water stress indicator". *Water Resources Research*. 17:1133.
- Jackson, Ray (1982). "Canopy temperature and crop water stress". En: *Advances in Irrigation*. D.I. Hillel (ed). Vol. 1. Academic Press. pp. 43-85.
- Luquet, Delphine; Vidal, Alain; Dauzat, Jean; Béqué, A.; Oliosio, Albert y Clouvel, Pascal (2004). "Using directional TIR measurements and 3D simulations to assess the limitations and opportunities of water stress indices". *Remote Sensing of Environment*. 90: 53-62.
- Manuel-Navarrete, David Manuel; Gallopin, Gilberto; Blanco, Mariela; Díaz-Zorita, Martin; Ferraro, Diego; Herzer, Hilda; Lateralra, Pedro; Morello, Jorge; Murmis, Maria; Pengue, Walter; Piñeiro, Martin; Podestá, Guillermo; Martinez-Guerza, María y Gherza, Claudio. (2005). "Consecuencia de los recientes cambios agrícolas". *Revista Ciencia Hoy*. 15(87): 37-45.
- Moran, Susan; Clarke, Thomas; Inoue, Yoshio y Vidal Anson (1994). "Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index". *Remote Sensing of Environment*. 46:246-263.

- Moran, Susan; Clarke, Thomas, Kustas, William; Wetz, M. y Amer, S. (1994). "Evaluation of hydrologic parameters in a semiarid rangeland using remotely sensed spectral data". *Water Resources Research*. 30 (5): 1287-1297.
- Moran, Susan (2004). "Use of remote sensing for monitoring evaporation over managed watersheds". *Watershed Management and Operations Management* 2000. 105.
- Moran, Susan.; Inoue, Yoshio y Barnes, Edward (1997). "Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management". *Remote Sensing Environment*. 61: 319-346.
- Morello, Jorge y Solbrig, Otto Thomas (1997). *Argentina granero del mundo: hasta cuando? La degradación del sistema agroproductivo de la pampa húmeda y sugerencias para su recuperación*. CEA, UBA, Harvard University, INTA, Bs. As.
- Nemani, Ramakrishna y Running, Steven (1989). "Estimation of surface resistance of evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data". *Journal of Climate and Apply Meteorology*. 28: 276-294.
- Nemani, Ramakrishna; Pierce, Lars; Running, Steven y Goward, Samuel (1993). "Developing satellite-derived estimates of surface moisture status". *Journal of Applied Meteorology*. 32 (3): 548- 557.
- Nemani, Ramakrishna; Pierce, Lars; Running, Steven y Goward, Samuel. (1993). "Developing satellite-derived estimates of surface moisture status". *Journal of Applied Meteorology*. 32 (3): 548-557.
- Price, Jhosep (1990). "Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 28: 940-948.
- Prihodko, Lara y Goward, Samuel (1997). "Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations". *Remote Sensing of Environment*. 60 (3): 335-346.
- Rivas, Raúl, Caselles, Vicente y Coll, César (2002). A simple method to calculate the reference evapotranspiration. En: Advanced International Workshop. Capri Island. Italy. *Earth observation to estimate evapotranspiration*.
- Rivas, Raúl y Caselles, Vicente (2004). "A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing - based surface temperature and local meteorological data". *Remote Sensing of Environment*. 93: 68-76.
- Rivas, Raúl; Weinzettel, Pablo y Usunoff, Eduardo. (2005). "Resultados preliminares de la estimación del estrés hídrico a partir de temperatura de superficie y NDVI". En: *II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de Hidrología Subterránea-Relación aguas superficiales-aguas subterráneas*. Córdoba: Río Cuarto, 195-202.
- Rouse, John; Haas, Robert; Schell, John; y Deering, Don (1974). *Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation*. NASA/GSFC, Type III, Final Report. EEUU: Grenbelt (Maryland).
- Sandholt, Inge; Rasmusen, Kjeld y Andersen, Jens (2002). "A simple interpretation of the surface temperature / vegetation index space for assessment of surface moisture status". *Remote Sensing of Environment*. 79: 213-224.
- Schirmbeck Juliano y Rivas Raúl. (2007). "Comportamiento de los términos del balance de energía en una pastura". En: Rivas Raúl, Grisotto Alfredo., Sacido Mónica (eds). *Teledetección: hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional.*, pp. 317-322. Mar del Plata, Argentina. Editorial Martín. 489 pp.
- Sobrino, José Antonio (2000). *Teledetección*. Universitat de Valencia: Valencia.
- Sobrino, José Antonio; Soria Guillem y Jiménez-Muñoz, Juan (2002). "Land surface temperature and emissivity retrieval from remote sensing data". *Recent Research Developments on Geophysics* 4: 21-44.
- Straschnoy, Julieta Verónica.; Di Bella, Carlos Marcelo; Jaimes, Florencia; Oricchio, Patricio y Revella, César Manuel (2006). "Caracterización especial del estrés hídrico y de las heladas en la región pampeana a partir de información satelital y complementaria". *RIA*. 35 (2): 117-141.
- Vazquez, Patricia.; Rivas, Raúl y Usunoff, Eduardo. (2008). "Análisis Multitemporal de la Disponibilidad de Agua en el Suelo a Partir de Datos de Satélite". *Revista Ciencia*. 3 (3): 47-58.
- Vazquez Patricia y Zulaica Laura (2011a) "Cambios agroproductivos y problemas ambientales en la Cuenca del río Quequén Grande (Provincia de Buenos Aires, Argentina)". *Revista Geografía, publicada pela Associação de Geografia Teórica*. 36(2): 283-296.
- Vazquez Patricia y Zulaica Laura (2011b). "Aplicación de sensores remotos al estudio de los cambios en el uso de la tierra y su incidencia sobre el hábitat, en la cuenca del río Quequén Grande (Provincia Buenos Aires, Argentina)". *Revista Geografía en Cuestión*. 4(02): 270-289.
- Vazquez Patricia y Zulaica Laura (2012). "Transformaciones agroproductivas e indicadores de sustentabilidad en el Partido de Tandil (Provincia de Buenos Aires) durante los periodos 1988-2002 y 2002-2010". *Revista CAMPO-TERRITÓRIO: revista de Geografía Agrária*. 7 (13): 5-39. www.seer.ufu.br/index.php/campoterritorio/article/view/13762 [consulta: 11 de diciembre de 2012].

- Vazquez, Patricia; Sacido, Mónica y Zulaica, Laura (2012a). “Técnicas de análisis para el ordenamiento territorial de cuencas agropecuarias: Aplicaciones en la Pampa Austral, Argentina”. *Scripta Nova*. 16(392). www.ub.edu/geocrit/sn/sn-392.htm. [consulta: 13 de diciembre de 2012].
- Vazquez, Patricia; Sacido, Mónica y Zulaica, Laura (2012b). “Transformaciones agroproductivas e indicadores de sustentabilidad en la Cuenca del río Quequén Grande (Provincia de Buenos Aires, Argentina) durante los periodos 1988-1998 y 1998-2008”. *Revista Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada*. 50: 88-119.
- Viglizzo, Ernesto; Pordomingo, Aníbal; Castro, Miguel y Lértora, Federico Eduardo. (2002). “La sustentabilidad ambiental de la agricultura pampeana ¿oportunidad o pesadilla?” *Ciencia Hoy*. 12 (68): 38-51.
- Venturini, Virginia y Rivas, Raúl. (2009). “Validation of data from the SAC-D / AQUARIUS mission: Application to the knowledge of vegetation waterstress”. En: *5th Aquarius/SAC-D Science Meeting*. NASA-CONAE (eds). Argentina: Buenos Aires.
- Venturini, Virginia y Rivas, Raúl. (2010). “Preliminary results for the future Application to the knowledge of vegetation water stress”. En: *6th Aquarius/SAC-D Science Meeting*. NASA-CONAE (eds). EEUU: Seattle-WA.

Sobre la autora

PATRICIA VAZQUEZ

Licenciada en Diagnóstico y Gestión Ambiental (Facultad de Ciencias Humanas (FCH), Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA)) y Magister en Teledetección y SIG (Facultad de Agronomía (FA), UNCPBA). Finalizando Doctorado en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Rosario). Lugar de trabajo CESAL (Nodo CONICET). UNCPBA. Docente en FCH, asignatura: Gestión Ambiental de los Sistemas Rurales, y en la FA, asignatura: Agroecología. Docente de cursos de posgrado, asignaturas: Plataformas y Sensores Remotos, Teledetección aplicada y SIG, Procesamiento Digital de Imágenes, etc. Integrante de proyectos de investigación desarrollados en la UNCPBA (Facultad de Ciencias Exactas y Humanas), Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP) en el Centro de Investigaciones Ambientales (FAUD), y Universidad Nacional de La Plata (UNLP) en la Facultad de Ciencias Naturales y Museo, con numerosas publicaciones y participaciones en congresos y jornadas científicas. Integrante del Consejo de Gestión de la Maestría de Teledetección y SIG (FA, UNCPBA). Becaria de la UNLP, Becaria del Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA), Becaria Proyecto Internacional, Universidad de Cádiz, Universidad de Siena, UBA, UNNE y CECOAL (CONICET) e Instituto multidisciplinario sobre Ecosistemas y Desarrollo Sustentable. Beca otorgada: The research Council of Norway, para Asistencia al Congreso Diversitas. South África.