

AGRICULTURA DE RIEGO ASISTIDA CON SATÉLITES

• Enrique Palacios-Vélez •
Colegio de Postgraduados, México

• Julio Enrique Palacios-Sánchez •
Universidad de Sonora, México

• Luis Alberto Palacios-Sánchez •
Servicios de Estudios en Ingeniería y Sistemas S.A. de C.V.

Resumen

En el año 2000, la Comisión Europea financió un proyecto denominado *DEMETER*, (*Demonstration of Earth Observation Technologies in Routine Irrigation Advisory Services*), cuyo objetivo principal fue lograr que los países mediterráneos de Europa, como Grecia, Italia, Portugal y España, mejoraran el uso del agua en el sector agrícola. Considerando los resultados obtenidos, la Comisión financió otro proyecto más ambicioso, cuyo acrónimo fue *PLEIADEs* (*Participatory Multi-Level EO-Assisted Tools for Irrigation Water Management and Agricultural Decision-Support*), en el que participaron 11 países, entre los cuales se consideró a México. Durante los años 2006 a 2009, se estableció en el estado de Sonora, en el norte de México, el proyecto *PLEIADEs*, con el objetivo, entre varios otros, de apoyar a los productores de tres distritos de riego de ese estado en el mejoramiento del uso del agua de riego. Como parte de sus resultados, se pudo adaptar una tecnología basada en la observación de la tierra (EO, por sus siglas en inglés) con los satélites Landsat 5 y 7, anteriormente probada en el proyecto *DEMETER*, mediante la estimación del consumo de agua de los cultivos, calculando la variable *Kc* en función de los índices NDVI (índice de vegetación de diferencias normalizadas) y utilizando la evapotranspiración de referencia obtenida de estaciones meteorológicas, basada en la fórmula de Penman-Monteith; adicionalmente, se calculó otro índice, MSI (índice de estrés de humedad), para evaluar la condición de humedad de los cultivos en los mencionados distritos. Para estimar y observar el estado de las parcelas regadas, se utilizó el visor denominado *System of Participatory Information Decision Support and Expert Knowledge for River Basin Management* (*SPIDER*, www.pleiades.es), usando los sistemas de información geográfica (SIG) de los distritos de riego. Finalmente, se obtuvieron relaciones entre los valores promedio de los índices y del consumo de agua estimado, con rendimientos de trigo medidos en el distrito de riego del Río Mayo, que podrán ser de utilidad para los productores agrícolas.

Palabras clave: sensores remotos, imágenes de satélite, evapotranspiración, índices de vegetación, NDVI, MSI.

Introducción

El 23 de julio de 1972, Estados Unidos de América puso en órbita el primer satélite de una serie para evaluar los recursos naturales, como parte del proyecto iniciado en 1967, "Earth

Resources Technology Satellite" (ERTS), cuyos satélites serían posteriormente conocidos como Landsat. Por otra parte, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos desarrolló el software *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS), para el análisis y tratamiento

de las imágenes de dichos satélites. Desde entonces y conforme se fueron desarrollando sistemas de computación más eficientes y mejoras significativas en los sensores instalados en muchos otros tipos de satélites que se han enviado al espacio por varias naciones de América, Europa y Asia, se ha logrado dar seguimiento al desarrollo de cultivos agrícolas, de manera que ahora es una herramienta básica para lo que se ha denominado agricultura de precisión.

Especificamente, en apoyo a la agricultura de riego, se han llevado a cabo muchos proyectos utilizando imágenes de satélite, en combinación con sistemas de información geográfica; se han tenido resultados muy notables, como un libro de la Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID-CIID, 2000), que muestra varios ejemplos, entre los que destaca el mejoramiento del manejo de grandes sistemas de riego, como el del Valle de Gharb, en Marruecos, con el apoyo de la empresa francesa CEMAGREF y la FAO, iniciado en 1986. También es de mencionarse el libro *Remote Sensing in Water Resources Management: The State of the Art* de Banstiaanssen (1998), donde se hace un recuento de las aplicaciones del uso de diferentes índices calculados con las reflectancias obtenidas de imágenes de satélite, para el estudio de áreas regadas en diferentes lugares del mundo.

Más recientemente, en el año 2000, la Comisión Europea financió un proyecto denominado *DEMETER* (*Demonstration of Earth Observation Technologies in Routine Irrigation Advisory Services*), en apoyo de los países mediterráneos (España, Italia, Grecia y Portugal), que utilizan volúmenes considerables de agua en agricultura de regadío, con objeto de que mejoraran la eficiencia en el uso de este recurso, cuyos resultados se resumen en las *AIP Conference Proceedings* (D'Urso et al., 2005, editores). El éxito logrado con este proyecto motivó a la Comisión Europea a proponer un proyecto más ambicioso, que considerara la transferencia de la tecnología desarrollada a otros países, incluyendo algunos en proceso de desarrollo;

así nació *PLEIADEs* (*Participatory Multi-Level EO-Assisted Tools for Irrigation Water Management and Agricultural Decision-Support*), en el cual participan 23 instituciones de 11 países, que incluyó a México, con tres instituciones: el Colegio de Postgraduados (Colpos), el Instituto Tecnológico de Sonora (Itson) y la Universidad de Sonora (Unison). La zona de estudio de este proyecto en México es el Distrito de Riego 051 Costa de Hermosillo y la cuenca del río Sonora; como complemento y prueba de las tecnologías propuestas, se incluyeron en el proyecto los distritos de riego Río Mayo y Río Yaqui.

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo ha sido probar, adaptar y calibrar en nuestro medio las metodologías que se han obtenido en los proyectos *DEMETER* y *PLEIADEs*, así como evaluar la opinión de los productores agrícolas de los distritos de riego Costa de Hermosillo, Río Mayo y Río Yaqui respecto a la utilidad que les puede representar conocer el estado de desarrollo de sus cultivos, evaluado mediante el uso del visor *SPIDER*, para apoyarlos en la toma de decisiones que les permita mejorar el uso del agua de riego.

También, considerando los trabajos previos realizados en la India por el Instituto Internacional para el Manejo del Agua (IWMI), encontrar funciones que relacionen índices de vegetación obtenidos de imágenes de satélite, con el rendimiento de los principales cultivos, en especial el trigo, regados en estos distritos de riego.

Materiales y métodos

El trabajo se ha desarrollado en los distritos de riego 051 Costa de Hermosillo, en el 038 Río Mayo y en el 041 Río Yaqui, en el estado de Sonora; tomando en cuenta que el trigo es uno de los principales cultivos producidos en este estado, se llevaron a cabo mediciones en varias parcelas de productores cooperantes para evaluar y ajustar funciones que permitan

el monitoreo de los cultivos y, en su caso, relacionar índices de vegetación con indicadores de su crecimiento y productividad.

El principal material utilizado han sido imágenes de los satélites Landsat 5 y 7, las que fueron procesadas con *software* comercial, como son el *IDRISI®* de Clark Labs (2006) y el *ERDAS®* de Leica Geosystems (2008), así como *software* desarrollado por uno de los autores para la corrección atmosférica (Palacios, 2007) y para el cálculo de índices de vegetación en parcelas; adicionalmente se obtuvieron datos de estaciones agrometeorológicas automáticas de los distritos de riego, cuya información diaria puede obtenerse en línea de www.agroson.org.mx.

Con objeto de calibrar algunas de las funciones propuestas por D'Urso y Ritcher (2008), se realizaron cuidadosas mediciones en dos parcelas cultivadas con trigo, con un área total de 73.3 ha, regadas con el pozo núm. 2926 en el Campo Santa Elena, ubicadas cerca de la población de Ciudad Alemán, en el Distrito de Riego 051 Costa de Hermosillo.

En estas parcelas se midió la aplicación del agua de riego (lámina de agua total usada) y se realizaron estimaciones del índice de área foliar; mediante un ceptómetro marca AccuPAR, se estimó la evapotranspiración de referencia, a nivel diario, utilizando la información obtenida de la estación agrometeorológica más cercana (La Providencia, en la Costa de Hermosillo) y utilizando valores de K_c estimados para ajuste de la evapotranspiración de los cultivos; adicionalmente se utilizaron ocho imágenes de satélite para darle seguimiento a su desarrollo vegetativo, calculando los índices de vegetación de diferencias normalizadas promedio (NDVI) (Rouse *et al.*, 1974), así como los índices de estrés de humedad MSI (Rock *et al.*, 1986), cuyos valores se obtienen de las reflectancias de las bandas 3 (roja ρ_r), 4 (infrarroja cercana ρ_i) y 5 (infrarroja media ρ_{im}) de los sensores de los satélites Landsat, cuyas fórmulas son:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_i - \rho_r}{\rho_i + \rho_r} \quad (1)$$

$$\text{MSI} = \frac{\rho_i}{\rho_{im}} \quad (2)$$

Se consiguieron ocho imágenes del satélite Landsat 5, con el sensor TM, en los días del año 21, 37, 53, 69, 85, 101, 117 y 133 del año 2008. Las imágenes se corrigieron en su georreferenciación utilizando ortofotos de INEGI y también se les aplicó una corrección atmosférica utilizando el programa *CorAtmLandsat*, desarrollado por uno de los autores de este artículo (Palacios, 2007).

Utilizando el programa *IDRISI®* se calcularon los valores del NDVI para cada una de las imágenes disponibles y luego se estimó el valor medio dentro de las dos parcelas consideradas.

También se calculó la evapotranspiración de los cultivos, acorde con lo propuesto por el instructivo de la FAO 56 (Allen *et al.*, 2006), incluyendo la estimación del K_c en función del NDVI, según lo propuesto por Calera y González (2007), cuya fórmula para su estimación, válida principalmente para cultivos anuales, es:

$$K_c = 1.15 * \text{NDVI} + 0.17 \quad (3)$$

Por otra parte, en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, se seleccionaron 15 parcelas en el módulo 15, de donde se obtuvo información sobre la fecha de siembra del cultivo de trigo, su variedad, número y fecha de los riegos, y aplicaciones de fertilización, así como aplicación de plaguicidas y los rendimientos obtenidos, con objeto de correlacionarlos con los valores medios de los índices calculados. Para este estudio se obtuvieron 10 imágenes de los satélites Landsat 5 y 7, una del 30 de diciembre de 2007 y las restantes de los días del año 15, 31, 47, 55, 63, 79, 103, 111 y 127, de 2008; posteriormente se repitió la medición en las mismas parcelas en el ciclo agrícola 2008-2009, con nueve imágenes de los mismos satélites, los días del año 2009, 10, 26, 42, 50, 62, 78, 102, 110 y 126, con la característica de que la

parte central del distrito del Río Mayo no tiene rayas (defecto del sensor del satélite Landsat 7), incluyendo toda el área del módulo 15; además, estas imágenes están ortorrectificadas y también en todos los casos se hizo la corrección atmosférica.

Resultados y discusión

Evaluación en la Costa de Hermosillo

Para la Costa de Hermosillo, los resultados de las mediciones efectuadas en las parcelas donde se sembró el trigo el 31 de diciembre de 2008 se muestran en el cuadro 1, donde se observa la información correspondiente a los valores promedio del NDVI en cada imagen de satélite, en las dos parcelas que se sembraron sin ninguna división y la estimación del índice de área foliar medio obtenida con el ceptómetro. También se incluyen en el cuadro los valores calculados para el factor de cobertura (F_c) y el valor de K_c , coeficiente de cultivo, para el cálculo de la evapotranspiración, según las funciones propuestas por Urso y Calera (2005) para cada fecha correspondiente a las imágenes de los Landsat.

La función propuesta para el factor de cobertura, según D'Urso y Ritcher (2008) es:

$$F_c = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (4)$$

Donde el subíndice del NDVI *soil* se refiere al valor correspondiente al suelo desnudo y el de *veg*, al valor máximo del índice de vegetación (100% cubierto). En el caso del K_c , para la estimación de la evapotranspiración de los cultivos, los valores calculados se ajustaron a una función poligonal cúbica para poder estimar los datos diarios.

Si se grafican los valores del índice de área foliar (IAF) como función del NDVI y se ajusta a una función exponencial, se tiene una similar a la obtenida por Urso y Richter (2008), como se muestra en la figura 1.

Para el cálculo de los valores de K_c se puede ajustar el valor del NDVI a una función cúbica que permita hacer un cálculo del consumo de agua diario del trigo. El valor obtenido para esta función, donde d es el día considerado, con los ocho valores mostrados en el cuadro 1, es:

$$\begin{aligned} NDVI &= -0.000000788*d^3 - 0.0000575*d^2 \\ &+ 0.007486*d + 0.163 \text{ con un } R^2 = 0.97 \end{aligned} \quad (5)$$

Luego, usando el primer valor de K_c (3) y denominando $NDVI_d$ el valor obtenido con (5) para el día d se tiene:

$$Kc_{ndvi} = 1.15 * NDVI_d + 0.17 \quad (6)$$

Es importante señalar que esta función se validó en el Distrito de Riego Río Mayo, donde se midió la evapotranspiración del cultivo

Cuadro 1. Mediciones en las parcelas en el Distrito de Riego 051.

| Día Juliano | NDVI | IAF | F_c | K_c |
|-------------|--------|-------|-------|-------|
| 21 | 0.2699 | 0.605 | 0.240 | 0.480 |
| 37 | 0.5092 | 1.683 | 0.637 | 0.756 |
| 53 | 0.6424 | 2.760 | 0.858 | 0.909 |
| 69 | 0.6757 | 4.107 | 0.914 | 0.947 |
| 85 | 0.7278 | 4.980 | 1.000 | 1.007 |
| 101 | 0.6994 | 3.990 | 0.953 | 0.974 |
| 117 | 0.5427 | 2.215 | 0.693 | 0.794 |
| 133 | 0.3348 | 0.795 | 0.348 | 0.555 |

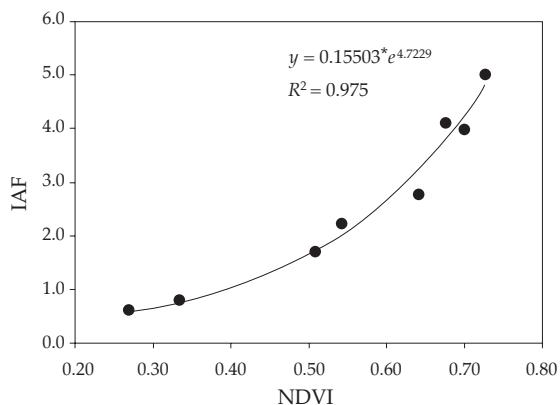


Figura 1. Relación NDVI con IAF.

del trigo mediante el balance de energía, utilizando una estación de flujo turbulento (Eddy Correlation) y la evapotranspiración de referencia se obtuvo de una estación meteorológica automática que estima esta variable con la fórmula de Penman-Monteith; el NDVI se obtuvo de las imágenes de los satélites Landsat (cuyos valores se muestran como puntos grises en la figura), de manera que es posible calcular $K_c = ETc/ETr$. Los resultados se muestran en la figura 2.

Obsérvese que la función obtenida de $K_c = 0.1478 \cdot NDVI + 0.1716$ es prácticamente igual a la propuesta por Calera y González (2007).

Por lo tanto se puede considerar que el valor de la evapotranspiración del cultivo para el día d será:

$$ETc_d = Kc_{ndvi} \cdot ETr_d \quad (7)$$

Donde ETr_d es la evapotranspiración de referencia obtenida con los sensores de las estaciones meteorológicas automáticas, calculada con la fórmula de Penman-Monteith.

Tomando los datos diarios de ETr de la estación "La Perseverancia", se calculó la evapotranspiración diaria del cultivo, con una duración aproximada de 132 días, cuya suma es de 519 mm, como se muestra en la figura 3.

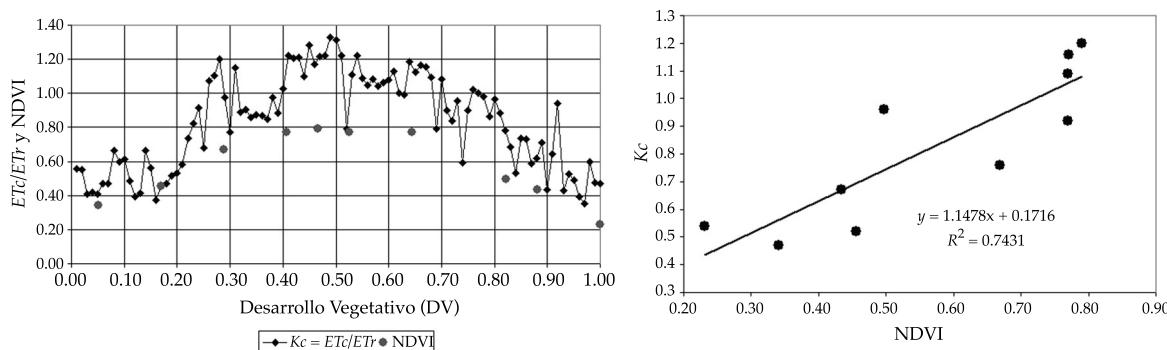
En la figura 3 se observa que para el día 60, la transpiración tiene un aumento brusco, típico de las zonas desérticas, debido a lo que los agricultores llaman un golpe de calor.

La lámina total aplicada fue de 865 mm, por lo que la eficiencia de aplicación estimada fue de 0.60.

El rendimiento que obtuvo este cultivo fue de 5.5 ton/ha, que se considera abajo de la media, que en Sonora, para el año 2008 fue ligeramente mayor de 6 ton/ha.

Evaluaciones en el Distrito de Riego 38 Río Mayo

En el Distrito de Riego Río Mayo se estudiaron 15 parcelas sembradas de trigo en el módulo 15, ubicado en el noroeste, con información

Figura 2. Cálculo de la función ETc/ETr .

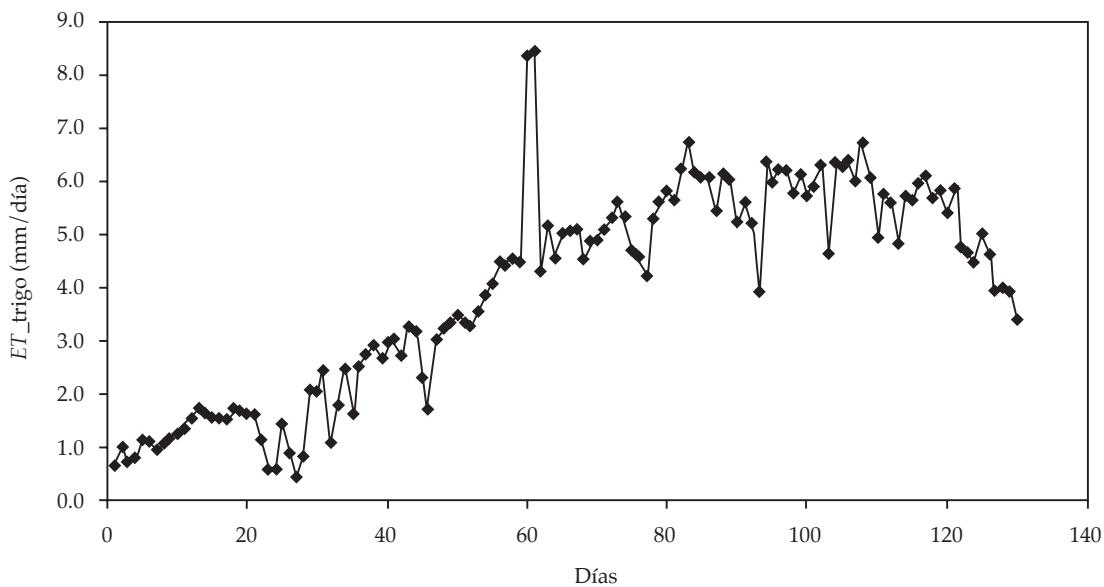


Figura 3. Consumo diario de agua del trigo.

tomada de los productores cooperantes, así como del personal de operación del distrito de riego, utilizando las mismas técnicas descritas para la costa de Hermosillo, cuyos datos básicos se muestran en el cuadro 2.

Las parcelas 2668 y 2673 están juntas y se trataron como una sola, y en la parcela 4447 se observaron cambios en la superficie, de manera que finalmente la superficie cosechada fue menor que la originalmente sembrada.

En cada una de estas parcelas se calcularon los valores promedio del NDVI como indicador de productividad y también del MSI (*Moisture Stress Index*), utilizando la metodología anteriormente descrita, con objeto de evaluar la efectividad del riego aplicado en cada caso, así como correlacionar los valores medios de los índices con los rendimientos reportados.

Los resultados obtenidos de estas parcelas se muestran en el cuadro 3, donde se incluye también la evapotranspiración de los cultivos, calculada según se explicó, para la Costa de Hermosillo, con los valores obtenidos para cada parcela con base en una función que ajustó el

NDVI a valores diarios, similar a la función (5) y con el cálculo del K_c obtenido de una función similar a la (7) para cada parcela. El valor de ETr diario se obtuvo de la estación meteorológica automática establecida en el campo del INIFAP que se encuentra cerca del módulo 15, cuya información también puede obtenerse en línea de www.agroson.org.mx.

Se han obtenido relaciones entre los valores de los índices NDVI y MSI y los rendimientos reportados en las parcelas, observándose una aceptable correlación entre estas variables. La función obtenida entre el NDVI y el rendimiento es similar a la obtenida por Sakthivadivel *et al.* (1999) en el distrito de riego Bhakra de un millón de hectáreas en la India, que para ese caso fue: $R = 10.99 \text{ NDVI} - 3.75$ con $R^2 = 0.86$.

En las figuras 4 y 5 se muestran estas relaciones, donde se observa un valor mayor para el parámetro de la variable independiente, debido a que tenemos mejores rendimientos en el trigo.

Cuadro 2. Información de parcelas participantes del Distrito de Riego 038 Río Mayo.

| Nombre del productor | Padrón númer. | Superficie (ha) | Cultivo | Variedad | Fecha siembra | Densidad (kg/ha) | Dosis fertilizante (kg/ha) | Textura | Rendimiento (ton/ha) |
|----------------------|---------------|-----------------|---------|----------|---------------|------------------|----------------------------|---------|----------------------|
| Adolfo Campo | 2673 | 4.31 | Trigo | Jupare | 15-nov-08 | 170 | 100 | Arcilla | 8.0 |
| Adolfo Campo | 2668 | 5.00 | Trigo | Jupare | 15-nov-08 | 170 | 100 | Arcilla | 8.0 |
| Adolfo Campo | 2617 | 4.29 | Trigo | Jupare | 29-dic-08 | 170 | 100 | Arcilla | 6.9 |
| Adolfo Campo | 2602 | 5.00 | Trigo | Jupare | 29-dic-08 | 170 | 100 | Arcilla | 6.9 |
| Francisco Planag | 3251 | 4.50 | Trigo | Tacupeto | 22-dic-08 | 120 | 300 | Arcilla | 6.5 |
| Francisco Planag | 5489 | 5.00 | Trigo | Tacupeto | 22-nov-08 | 120 | 300 | Arcilla | 6.5 |
| Francisco Planag | 5490 | 5.00 | Trigo | Platinum | 21-dic-08 | 120 | 300 | Arcilla | 6.1 |
| Francisco Planag | 3257 | 5.00 | Trigo | Samayoa | 21-dic-08 | 120 | 300 | Arcilla | 6.0 |
| Humberto Ruiz | 3277 | 10.00 | Trigo | Jupare | 24-nov-07 | 150 | 400 | Arcilla | 5.8 |
| Emilio Sandoval | 4469 | 5.00 | Trigo | Jupare | 24-nov-07 | 180 | 400 | Arcilla | 7.8 |
| Francisco Parra | 4470 | 5.00 | Trigo | Jupare | 25-nov-07 | 140 | 280 | Arcilla | 7.5 |
| Francisco Parra | 4447 | 4.50 | Trigo | Samayoa | 27-dic-07 | 140 | 280 | Arcilla | 7.5 |
| Pedro Valenzuela | 2514 | 5.00 | Trigo | Jupare | 30-dic-07 | 170 | 400 | Arcilla | 4.6 |
| Juan Virchez | 2512 | 5.00 | Trigo | Jupare | 05-ene-08 | 180 | 400 | Arcilla | 3.0 |
| Herodoto Moreno | 2519 | 5.00 | Trigo | Jupare | 25-dic-08 | 180 | 200 | Arcilla | 6.0 |

Cuadro 3. Valores medios en el ciclo agrícola de indicadores biofísicos.

| Parcela númer. | MSI med. | NDVI med. | Etc (mm) | Rend. ton/ha |
|----------------|----------|-----------|----------|--------------|
| 2512 | 0.6034 | 0.4369 | 410 | 3.0 |
| 2514 | 0.5397 | 0.5291 | 460 | 4.0 |
| 2519 | 0.5143 | 0.5571 | 470 | 6.0 |
| 2602 | 0.4565 | 0.6109 | 511 | 6.9 |
| 2617 | 0.4702 | 0.6013 | 495 | 6.9 |
| 2668 | 0.3604 | 0.6977 | 516 | 8.0 |
| 2673 | 0.3604 | 0.6977 | 516 | 8.0 |
| 3251 | 0.4786 | 0.5742 | 486 | 6.5 |
| 3257 | 0.5083 | 0.5304 | 452 | 6.5 |
| 3277 | 0.4450 | 0.6369 | 492 | 6.0 |
| 4447 | 0.5166 | 0.5728 | 495 | 6.5 |
| 4469 | 0.3881 | 0.6804 | 513 | 7.8 |
| 4470 | 0.4102 | 0.6717 | 510 | 7.5 |
| 5489 | 0.4550 | 0.6274 | 506 | 6.5 |
| 5490 | 0.4522 | 0.5931 | 491 | 6.1 |

Como se observa en la figura 5, la relación entre el índice de estrés y el rendimiento no es lineal, ya que se aprecia que conforme aumenta el estrés, el rendimiento disminuye con más rapidez, lo cual parece lógico.

También se deduce que una razón de la variación de los valores del índice NDVI se debe en gran parte al efecto del estrés de humedad, y que la disminución del NDVI es debida a un riego deficiente en varias de las parcelas analizadas. Para comprobar esta hipótesis se ha correlacionado el índice MSI con el NDVI y, como se puede observar en la figura 6, hay una alta correlación entre dichos índices.

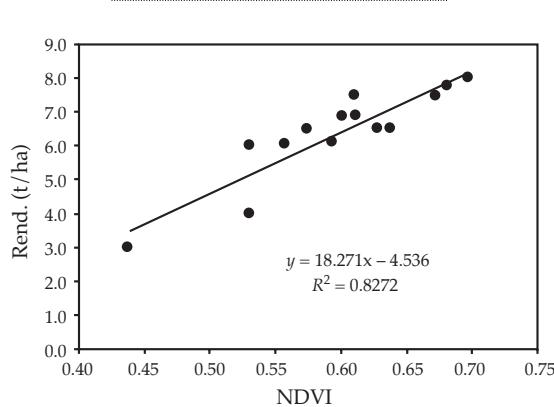


Figura 4. Relación entre NDVI y rendimiento del trigo.

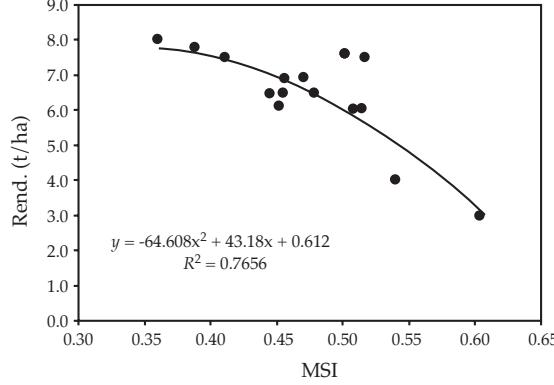


Figura 5. Relación entre el MSI y el rendimiento del trigo.

Para comprobar que el estrés de humedad es el principal factor en la variación de los rendimientos, también puede relacionarse el consumo de agua de los cultivos con su rendimiento; se observa que los rendimientos menores corresponden a menores consumos de agua, lo que se muestra en la figura 7.

Como se ve, hay una buena correlación entre la evapotranspiración del cultivo y el rendimiento, que es lineal directa; es decir, a más evapotranspiración mayor rendimiento, lo cual concuerda con resultados de otros estudios.

También se encontró, como era de esperarse, una relación entre el índice MSI y la

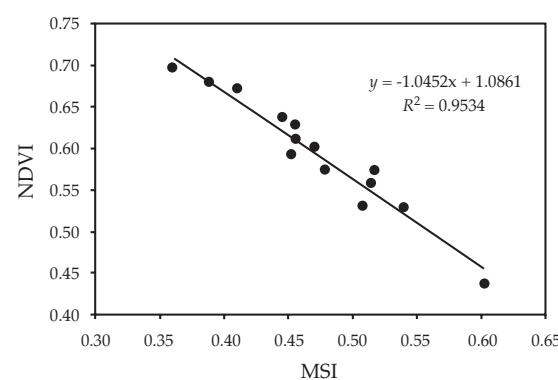


Figura 6. Relación entre los índices de vegetación MSI y NDVI.

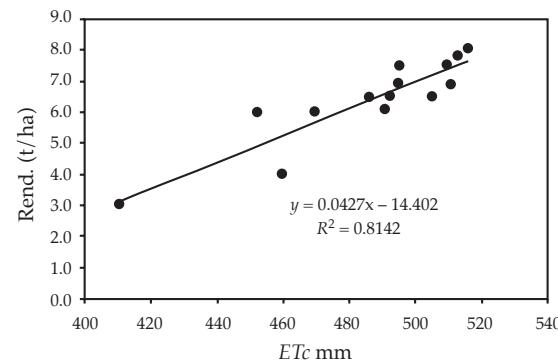


Figura 7. Relación entre evapotranspiración y rendimiento.

evapotranspiración de los cultivos que, como se observa en la figura 8, no es lineal sino curvilínea, donde se aprecia que a mayor estrés hídrico menor evapotranspiración del cultivo.

Para facilitar el cálculo del valor medio del NDVI en cada parcela, uno de los autores de este artículo ha desarrollado un software (*EStadParcelas.exe*) que puede usarse después de haber obtenido un *raster* con la información de cualquier índice y disponiendo además del vectorial de las parcelas ligadas con el catastro y padrón de usuarios en formato (*.shp), con el cual es posible calcular el valor medio de los índices en cada parcela. Así, en la figura 9 se muestra la zona sur del módulo 15 con los valores del NDVI para el día del año 47 en cada una de las parcelas.

Con el visor SPIDER se puede conocer directamente el valor promedio del índice NDVI para un número específico de píxeles en una parcela que debe definirse (el cursor suele mostrar un área de 3*3 píxeles, que puede variarse hasta 9*9 píxeles).

También se puede estimar el consumo de agua de los cultivos, ya que es posible integrar gráficamente dicho consumo entre las fechas de las imágenes, por lo que es factible la evaluación de la eficiencia en el uso del agua de riego sobre una parcela bajo el supuesto

de que se mide la cantidad de agua aplicada; utilizando el programa *EStadParcelas.exe* también puede evaluarse la evapotranspiración de todas las parcelas de un módulo con un cultivo dominante, como el trigo. Al considerar la cantidad de agua que los cultivos utilizaron en el proceso evapotranspirativo, podría estimarse la eficiencia con la que se utiliza el riego, tomando en cuenta los volúmenes de agua usados para la irrigación que, como se ha visto, tiene un efecto en el rendimiento del cultivo.

En la figura 10 se muestra la pantalla que se presenta con parte del distrito de la Costa de Hermosillo (convertida a tonos de grises), con una imagen de satélite y los vectores de las parcelas; en la figura 11 se muestra la integración del valor de la evapotranspiración para el periodo comprendido entre el 6 de febrero y el 14 de mayo del 2008, correspondiente a las imágenes del satélite Landsat 5 para esas fechas, donde se ve el valor acumulado del uso del agua (forma sombreada en esta figura; no incluye el total).

Conclusiones

Como se ha mostrado en este trabajo, se han desarrollado las bases para instrumentar un sistema de información para que los usuarios de sistemas de riego puedan conocer el estado de sus parcelas en relación con el desarrollo de sus cultivos y también el estado del estrés de humedad a que están sujetos, de manera que si esta información se proporciona cada 16 días utilizando imágenes de los satélites Landsat o bien con mayor frecuencia si se utilizan imágenes de la constelación de satélites SPOT (dado que México cuenta con una antena para bajar estas imágenes), el usuario estará en condiciones de tomar decisiones respecto al manejo de su cultivo y del riego, considerando que mediante un sistema de información adecuado se les informe sobre su estado y que definen las acciones que puedan considerar para el mejoramiento de la producción, en función del valor de los índices.

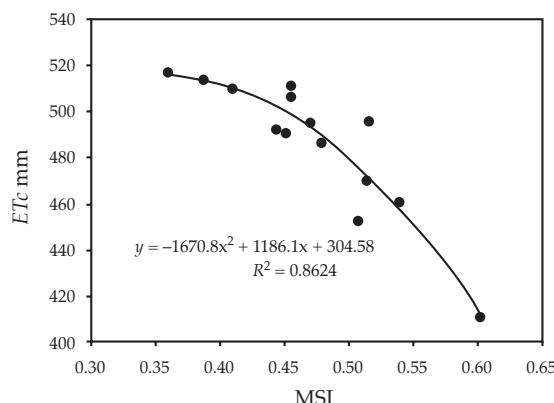


Figura 8. Relación entre el estrés de humedad y la evapotranspiración.



Figura 9. Valores del NDVI por parcela en zona sur del módulo 15 del Distrito de Riego Río Mayo.



Figura 10. Pantalla que muestra el SPIDER, donde se observa la parcela estudiada.

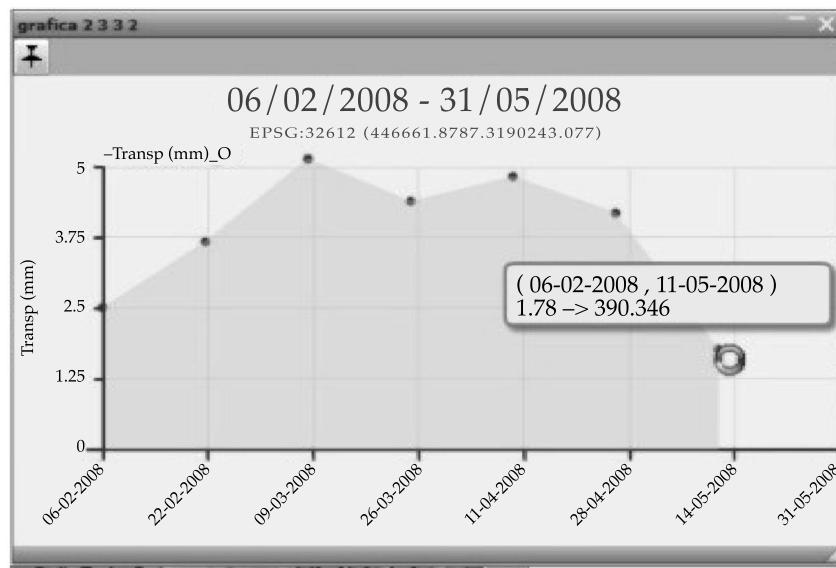


Figura 11. Gráfica generada por el visor SPIDER, donde se estima la transpiración del trigo.

Como producto del proyecto PLEIADEs se ha desarrollado el visor SPIDER, que permite visualizar la condición de una parcela por sectores definidos por un área de 3^*3 hasta 9^*9 píxeles, mostrando los valores del índice NDVI, así como la transpiración del cultivo en mm para el día en que se tomó la imagen de satélite, así como el acumulado mediante la integración gráfica.

Por otra parte, se ha desarrollado un programa que permite estimar los valores medios de los índices NDVI y MSI para cada una de las parcelas consideradas en un sistema de información geográfica que cubra al distrito de riego considerado.

También, tomando en cuenta que en las zonas donde hay distritos de riego generalmente hay disponible información meteorológica diaria, es posible estimar el consumo de agua de los cultivos, principalmente anuales, también en un despliegue gráfico, lo cual se puede facilitar si se organiza un sistema de información para los usuarios de los distritos de riego que cuenten con un SIG, con la participación de las organizaciones de usuarios del riego, los gobiernos estatales, la Secretaría

de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación y la Comisión Nacional del Agua.

Mediante estos sistemas de información y comunicación, como el Internet, mensajería en teléfonos celulares y aun mediante despliegue gráfico en los mencionados teléfonos, lo cual ya está en periodo de prueba en otro proyecto del Colpos, se puede informar a los usuarios de los distritos cómo va el desarrollo de sus cultivos, para que puedan tomar decisiones, con el fin de mejorar su productividad, así como sus futuros ingresos.

Al respecto, tanto en España como en Francia existen actualmente servicios de asistencia técnica asistida con satélite. Así, en España se tiene el "e+SARAS", que es el Servicio de Asesoramiento en Riego Asistido con Satélite, al que se puede tener acceso por Internet o mediante teléfono celular, con un costo relativamente bajo para los beneficiarios.

En Francia, la empresa INFOTERRA está proporcionando un servicio a usuarios de riego utilizando la mayor parte de los satélites disponibles para esta empresa (los tres satélites de la constelación SPOT, Landsat, FORMOSAT

y KOMSAT), enviando por correo electrónico o mediante Internet recomendaciones para sus usuarios, con información sobre el estado de sus cultivos, protección de cultivos contra plagas y enfermedades, manejo de insumos y manejo del agua de riego.

Con estos antecedentes, en la actualidad es viable el establecimiento de un sistema de asesoramiento similar en nuestro país; en una primera etapa, para usuarios de los distritos de riego que ya tienen sistemas de información geográfica, lo cual podrá extenderse en un futuro a unidades de riego e incluso para la agricultura en general.

El costo de los servicios podrá distribuirse entre los gobiernos federal, estatal y usuarios. Es de interés señalar que en Francia los costos los pagan todos los involucrados en la producción agrícola, incluyendo los vendedores de insumos y otros servicios.

Agradecimientos

Gran parte del trabajo de investigación se ha realizado con el apoyo del proyecto PLEIADEs, financiado por la Comisión Europea, y en el cual los autores están participando, así como sus respectivas instituciones, por lo que se agradece al personal de la Universidad Castilla La Mancha, España, responsable de la administración del mencionado proyecto, por permitirnos presentar el uso del programa SPIDER, que aún se encuentra en etapa de desarrollo.

Recibido: 13/04/09

Aprobado: 30/08/10

Referencias

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D. y SMITH, M. *Evapotranspiración del cultivo: guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: Estudio FAO, Riego y Drenaje 56, 2006.
- BANSTIAANSSEN, W.G.M. *Remote Sensing in Water Resources Management: The State of the Art*. Sri Lanka: International Water Management Institute, 1998.
- CLARK LABS. IDRISI ANDES, GIS and Image Processing Software. Guide and Tutorial. Worcester: Clark University, 2006.
- CALERA, B.A. y GONZÁLEZ, J. *Parámetros biofísicos de la cubierta vegetal. Relaciones operativas para la obtención de mapas de estos parámetros de las imágenes de satélite*. Albacete, España: Grupo de Teledetección y SIG, IDR, UCLM. Documento de PLEIADEs, 2007.
- DEMETER. *Demonstration of Earth observation Technologies in Routine irrigation advisory services* [en línea]. European Commission, 2002. Disponible para World Wide Web: <http://www.demeter-ec.net>.
- D'URSO, G.M. and CALERA, A. Operative Approaches to Determine Crop Water Requirements from Earth Observation data: Methodologies and Applications. *AIP Conference Proceedings*, 2005.
- D'URSO, G.M., OSSAN, A., and MORENO, J. (editors). *Earth Observation for Monitoring and Water Management. AIP Conference Proceedings*, Nápoles, Italia, 2005. <http://proceedings.aip.org/proceedings>.
- D'URSO, G.M. and RICHTER, K. *Methodology of Basic Products E. O. Portfolio L1-Operational use*. Draft v. 0.1 PLEIADEs Project, 2008.
- ESRI. *ArcView y ArcMap, GIS and Mapping Software. Guide and Tutorials*. Redlands, Environmental System Research Institute, California, 2005.
- ERDAS. *Erdas Imagine GIS software* [en línea], 2008. Disponible para World Wide Web: <http://www.erdas.com>.
- ICID-CIID. *Remote Sensing and Geographic Information Systems in Irrigation and Drainage: Methodological Guide and Applications*. New Delhi: Alain Vidal Editor, 2000.
- JENSEN, J.R. *Remote Sensing of Environment: An Earth Resource Perspective*. New Jersey: Prentice Hall, 2000.
- PALACIOS, L.A. *Corrector Atmosférico en Imágenes Landsat*. Tesis doctoral. Montecillo, México: Colegio de Postgraduados, 2007.
- PLEIADEs. *Participatory multi-Level EO-assisted tools for Irrigation water management and Agricultural Decision-Support*. PLEIADEs, 2008. Disponible para World Wide Web: www.pleiades.es.
- ROCK, B.N., VOGELMANN, J.E., WILLIAMS, D.L., VOGELMANN, A.F., and HOSHISAKI, T. Remote Detection of Forest Damage. *Bio Science*. Vol. 36, 1986, 439 pp.
- ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A., and DEERING D.W. *Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS*. Third ERTS Symposium. NASA SP-351, vol. 1, Greenbelt, 1974, pp. 309-317.
- SAKTHIVADIVEL, R., THIRUVENGADACHARL, S., AMERASINGHE, U., BASTIAANSSEN, G.M., and MOLDEN, D. *Performance evaluation of the Bhakra Irrigation System, India, using remote sensing and GIS techniques. Research Report 28*. Sri Lanka: International Water Management Institute, 1999.

Abstract

PALACIOS-VÉLEZ, E., PALACIOS-SÁNCHEZ, J.E. & PALACIOS-SÁNCHEZ, L.A. *Irrigated agriculture assisted by satellite images. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. II, No. 2, April-June, 2011, pp. 69-81.

In 2000, the European Commission financed a project known as DEMETER(Demostration of Earth Observation Technologies in Routine Irrigation Advisory Services) to find innovative technologies that would allow improving water use efficiency and productivity in irrigation in Mediterranean countries, such as Greece, Italy, Portugal, and Spain. Considering the success of this project, the Commission has financed another more ambitious project in which 11 countries and 23 research and educational institutions have been involved. The project was called Participatory multi-Level EO-assisted tools for Irrigation water management and Agricultural Decision-Support, (PLEIADEs), and Mexico was one of the beneficiaries. This project was established during the period from 2006 to 2009, in the State of Sonora, in northern Mexico, , and the main objective, among several others, was to support the producers of the irrigation districts in this state, in order to improve the use of water in land irrigation. Related to this project, some of the technologies developed in Europe were tested and adapted in three Irrigation Districts, the Hermosillo Coast, the Mayo River and the Yaqui River. Using information from several water users from these districts, the methodologies have been tested and adapted to evaluate the development of the wheat crop using images from satellites Landsat 5 and 7. In this study, some functions have been obtained, correlating vegetation indices and evapotranspiration to crop yield, which make it possible to evaluate the effect of water applied to soil and input management. Also the System of Participatory Information Decision Support and Expert knowledge for River basin management (SPIDER), was adapted for the use of water users. The results of this study show the possibility of developing methodologies to transfer information to the water users which can be useful to improve soil, water and input management to get better crop yields.

Keywords: remote sensing, satellite images, evapotranspiration, vegetation index, NDVI, MSIC.

Dirección institucional de los autores

Dr. Enrique Palacios-Vélez

Colegio de Postgraduados
Programa de Hidrociencias
Edificio de Hidrociencias y Edafología
km. 36.5, carretera México-Texcoco
56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México, MÉXICO
Teléfonos: +52 (55) 5804 5986 y 5804 5985
Fax: +52 (55) 5804 5937
epalacio@colpos.mx

Dr. Julio Enrique Palacios-Sánchez

Universidad de Sonora-Campus Navojoa
Departamento de Ciencias Químico Biológicas y
Agropecuarias

Lázaro Cárdenas 100
Colonia Francisco Villa
85880 Navojoa, Sonora, MÉXICO
Teléfonos: +52 (642) 4259 952 y 4259 958
jepalacios58@hotmail.com

Dr. Luis Alberto Palacios-Sánchez

Servicios de Estudios en Ingeniería y Sistemas, S.A. de C.V.
Tezozomoc 55, colonia Cuauhtémoc
83294 Hermosillo, Sonora, MÉXICO
laps@colpos.mx
luispalacios@seissa.com.mx