

Uso de la variabilidad térmica en la determinación del estrés hídrico en cultivos

M.P. González Dugo¹(P), R.. Bryant², M. S. Moran²

¹Servicio Central de Apoyo a la investigación: Información del Territorio. Universidad de Córdoba.

²USDA ARS Southwest Watershed Research Center, Tucson, Arizona.

RESUMEN

La información sobre la temperatura de la cubierta vegetal que facilitan los sensores remotos se ha utilizado con éxito en la determinación del estrés hídrico de los cultivos, como atestiguan los resultados obtenidos de la aplicación del CWSI y el WDI. Sin embargo, no siempre se dispone de los datos requeridos para su cálculo, limitándose en muchas ocasiones por ello su aplicación a la investigación agrícola. En este trabajo se comparan estos índices con dos nuevas aproximaciones, basadas ambas en la relación entre el estrés hídrico de un cultivo y la variabilidad de la temperatura de su cubierta. Este concepto, que había sido planteado anteriormente, ofrece nuevas posibilidades con el desarrollo de sensores sobre plataformas aéreas y espaciales más versátiles y accesibles. Los resultados confirman especialmente la utilidad de la desviación típica en la determinación del estrés, método que puede ser aplicado con un procesamiento mínimo de los datos y que sin necesidad de información meteorológica o de calibración, permitiría un retorno rápido de los resultados, para elaborar una programación del riego más acertada.

ABSTRACT

Infrared thermometry has been commonly applied to monitor plant water stress, based on the relation between crop temperature and crop transpiration rate. The remote measure of surface temperature avoid the disadvantages of other point measurements methods. Several indices to assess the water content and the health of the plant have been developed combining meteorological data with remotely sensed information. Two of this indices, the crop water stress index (CWSI) and the water deficit (WDI) are compared in this work with two new approaches based on crop temperature variability, the histogram-derived crop water index (HCWSI) and the standard deviation of thermal data (STD). The good agreement found with accepted methods, specially with the latter, is a promising result that, with a further refinement, may produce management information with a minimum input data and time of processing.

INTRODUCCIÓN

El riego es sin duda la práctica más importante para mejorar el rendimiento agrícola, siendo esencial en zonas áridas. Sin embargo, la creciente demanda de agua para usos generales, va reduciendo el suministro disponible para el regadío, a la vez que aumenta su coste. A pesar de los grandes avances realizados en las últimas décadas, aún continúa la búsqueda de nuevas tecnologías que ayuden a establecer programaciones de riego óptimas.

Los métodos clásicos estudian el contenido en humedad del suelo, algún parámetro de la planta o alguna variable meteorológica, para estimar la cantidad de agua perdida por el

sistema planta-suelo en un período dado. Estos métodos, además de lentos y de complicada puesta en práctica, proporcionan una información puntual que difícilmente caracteriza una parcela completa (Jackson, 1982). La medida directa de la temperatura de las hojas es uno de estos métodos, su relación con el estrés hídrico de la planta se basa en el enfriamiento que produce el agua transpirada por las hojas al evaporarse. En situaciones de escasez de agua, la transpiración es mínima y la temperatura de las hojas aumenta. Este es el mecanismo de transferencia de calor dominante cuando consideramos la cubierta vegetal en su conjunto, en vez de las hojas individualmente (Idso y Baker, 1967), por lo que puede ser usado para la programación del riego a esta escala. Por otro lado, las medidas remotas en el infrarrojo resuelven las dificultades prácticas de los métodos de medida puntuales, ya que los sensores térmicos sobre plataformas aéreas o espaciales son una fuente de información cada vez más accesible no solo para la investigación agraria sino también para los agricultores. El desarrollo de índices de estrés hídrico, como el CWSI (índice de estrés hídrico en cultivos) de Idso y col. (1981) refuerza el uso de estos métodos remotos. El CWSI, basado en la diferencia entre la temperatura del aire y la de cubierta, ha sido aplicado con éxito en la detección de estrés hídrico en condiciones de cobertura completa del cultivo. Moran y col. (1994) extendieron estas aplicaciones con el desarrollo del WDI (índice de déficit hídrico), aplicable en condiciones de cobertura parcial. En el WDI se combinan los índices espectrales de vegetación con la temperatura superficial para estimar el estrés.

Aunque estos índices han aportado importantes beneficios al manejo del riego, los datos que requiere su cálculo (especialmente datos meteorológicos recogidos *in-situ* y a la hora de paso del sensor e información de calibración) pueden ser un obstáculo para un uso más generalizado en campo. En este trabajo se presenta un método sencillo para estimar las condiciones hídricas de un cultivo usando la variabilidad espacial de la temperatura de la cubierta. En condiciones de ausencia de estrés las plantas que componen un cultivo pueden ser consideradas como un conjunto homogéneo a la hora de interpretar los resultados de la temperatura de la cubierta. Sin embargo, cuando hay déficit de agua, el comportamiento de las plantas varía considerablemente de unos individuos a otros, debido a factores diversos como las características edáficas, por lo que bajo estas circunstancias, no se puede considerar al cultivo como un conjunto uniforme. Este hecho se pone frecuentemente de manifiesto en la dificultad de obtener datos representativos en medidas de estrés en campo. La variabilidad de la temperatura de la cubierta ha sido tratada anteriormente (Clawson y Blad, 1982; Gardner y col., 1981) y los avances en el desarrollo de nuevos sensores hacen oportuna una revisión de esta idea. Para ello se van a comparar los índices anteriormente descritos (CWSI en su forma teórica y empírica de la línea base y el WDI), con un nuevo índice basado en la determinación de la variabilidad espacial de la temperatura a través del estudio de su histograma (HCWSI) y con los valores de desviación típica en cada parcela (STD).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la campaña ATLAS

Este trabajo se ha realizado utilizando un conjunto existente de datos del sensor ATLAS (Airborne Terrestrial Applications Sensor, propiedad de la NASA) sobre la finca experimental de Maricopa, situada al suroeste de Phoenix (Arizona, EE.UU.). La colaboración entre el Laboratorio de Conservación de Agua del USDA-ARS y el Stennis Space Center (SSC) de la NASA, para investigar la utilidad de las imágenes espectrales de este sensor en el manejo agrícola produjo un conjunto de seis vuelos durante 1998, a lo largo de la estación de

crecimiento del algodón y del sorgo, esto es, de Abril a Septiembre. Todas las especificaciones de estos vuelos, como una resolución espacial de los datos de 2.5 m, un intervalo espectral de 0.45 - 12.2 μm , distribuido en 14 canales y el diseño de la misión, con un solape entre líneas de vuelo cercano al 75%, fueron proyectadas para ajustarse a los requisitos de la investigación agrícola. En la figura 1 se muestra una imagen ATLAS en falso color de toda la finca experimental. El trabajo de campo consistió en una inspección de cultivos, la instalación de paneles de referencia sobre el terreno y medidas radiométricas coincidiendo con cada una de las pasadas. El resultado del examen de cultivos en cada vuelo, referenciado geográficamente con un GPS, se introdujo en un sistema de información geográfica (SIG) para su posterior análisis. Los datos recogidos en este examen fueron estimados visualmente, incluyendo: cultivo en cada parcela, estadio de crecimiento, porcentaje de cobertura de la vegetación, altura del cultivo, humedad y aspereza del suelo, dirección de laboreo y un comentario con información importante o anomalías.

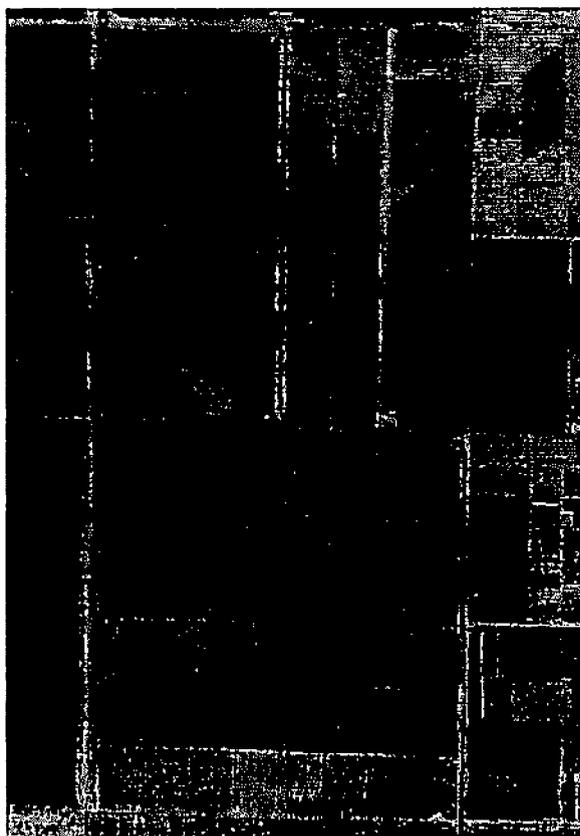


Fig. 1. Imagen del sensor ATLAS de la finca experimental Maricopa.

Paneles de referencia de reflectividad conocida fueron instalados durante cada vuelo para calibrar posteriormente las imágenes. Una superficie total de 16x16 m fue cubierta para cada nivel de reflectividad considerado (0.04, 0.08, 0.48 y 0.64), esto supone alrededor de 6x6 elementos de la imagen o píxeles ATLAS, de los cuales los 2x2 centrales se pueden considerar no contaminados por los efectos de borde y aptos como referencia en la calibración (Moran, 1998). Estos paneles, especialmente los de valores extremos, se pueden apreciar en la fig.1 como parcelas muy pequeñas de color blanco y negro en el centro-derecha de la imagen. Se realizaron también medidas de temperatura con un termómetro de infrarrojo sobre estos paneles, en cada vuelo, para calibrar los canales térmicos del sensor. Con el objetivo de

abarcar mejor el espectro completo y de proporcionar una calibración cruzada, se realizaron medidas en campo con varios radiómetros sobre cubiertas representativas, se eligió una parcela de alfalfa con una alta cobertura, una pista de aterrizaje de tierra compactada y un panel de SO₄Ba.

Descripción de los datos seleccionados

Para realizar este estudio se han seleccionado un total de 64 parcelas de algodón (en la fig. 1 en color rojo), con superficies entre 0.5 y 1.4 ha, lo que supone entre 2000 y 5500 puntos de información para cada parcela y cada banda del sensor. En la elección se dio prioridad a las parcelas que presentaban mayores diferencias en la humedad del suelo, la cobertura y la altura de cultivo. Los vuelos utilizados fueron los tres últimos, correspondiente a los días 193, 231 y 260, en los que el cultivo debía haber alcanzado la madurez en todas las parcelas. El amplio solape entre las líneas de vuelo hizo posible que todas las parcelas seleccionadas tuvieran un ángulo de visión desde el sensor de menos de 10°, lo que disminuye los efectos de la radiación bidireccional. Se recogieron datos meteorológicos horarios en la misma finca experimental, que fueron interpolados para la hora exacta de vuelo en cada línea. La temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa fueron utilizados para calcular los índices clásicos de estrés hídrico.

Procesamiento de los datos

Las imágenes recibidas habían sido calibradas utilizando los instrumentos que llevaba a bordo el avión, transformando los valores digitales relativos medidos por radiancia en el sensor, es decir, a la altura de vuelo y sin considerar ningún efecto atmosférico. La transformación a reflectividad o a temperatura, dependiendo de la longitud de onda de cada banda, se realizó utilizando un método empírico que establece una relación lineal entre valor digital o radiancia en el sensor y la reflectividad o la temperatura de la superficie (Smith y col. 1999; Moran y col. 2000). Para ello, se utilizaron todos los datos medidos en campo tanto en los paneles de referencia desplegados sobre el suelo, como las medidas realizadas con el radiómetro sobre diferentes superficies. Para cada vuelo y cada banda se utilizaron una media de cinco puntos que comprendían una reflectividad entre aproximadamente 0.05 y 0.8 y una temperatura entre 25 y 50 °C con los que fueron calculadas las ecuaciones para corregir toda la imagen, los coeficientes de regresión estuvieron en todos los casos por encima del 0.99.

Cálculo de los índices de estrés hídrico

Los dos primeros índices que se calcularon fueron el CWSI_t de Jackson y col. (1981),

$$\text{CWSI}_t = 1 - \lambda E_T / \lambda E_{Tp} = [\gamma(1+r_c/r_a) - \gamma^*] / [\Delta + (1+r_c/r_a)] \quad (1)$$

siendo el cociente de resistencias,

$$r_c/r_a = \{[\gamma r_a R_n / C_v] - [(T_c - T_a)(\Delta + \gamma)] - DPV\} / \{\gamma[(T_c - T_a) - r_a R_n / C_v]\} \quad (2)$$

y la aproximación de la línea base (Idso, 1982):

$$\underline{CWSI_b} = \{(f_0 + f_1 DPV) - (T_c - T_a)_r\} / \{(f_0 - f_1 DPV) - (f_0 + f_1 DPV_x)\} \quad (3)$$

donde, λ es el calor de vaporización; E_r y E_{rp} son las intensidades de evapotranspiración actual y potencial; r_a es la resistencia aerodinámica, r_c , la resistencia de la cubierta y r_{cp} en condiciones de ET potencial; γ es la constante psicrométrica y modificada como $\gamma^* = \gamma (1 + r_{cp}/r_a)$; Δ es la curva de Clausius-Clapeyron; R_n , la radiación neta; C_v es la capacidad de calor del aire; T_c la temperatura de la cubierta (suponiendo 100% de cobertura) y T_a la del aire; DVP es el déficit de presión de vapor y DPV_x a la temperatura $(T_a + f_0)$; f_1 , f_0 son respectivamente la pendiente e intersección de la relación entre $(T_c - T_a)$ y DPV para un cultivo en buenas condiciones hídricas.

El WDI combina la diferencia entre la temperatura del aire y de la superficie (temperatura medida directamente por el sensor, que en casos de cobertura parcial corresponderá a una composición de suelo y vegetación), con un índice de vegetación que corrige el efecto del suelo SAVI (soil-adjusted vegetation index) desarrollado por Huete en 1988:

$$SAVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R + L)(1 + L) \quad (4)$$

donde, ρ_R y ρ_{NIR} son las reflectividades de la cubierta en la bandas espectrales correspondientes al rojo e infrarrojo cercano y L es un factor corrector que se ha demostrado que toma el valor 0.5 en un variedad de cultivos y entornos distintos.

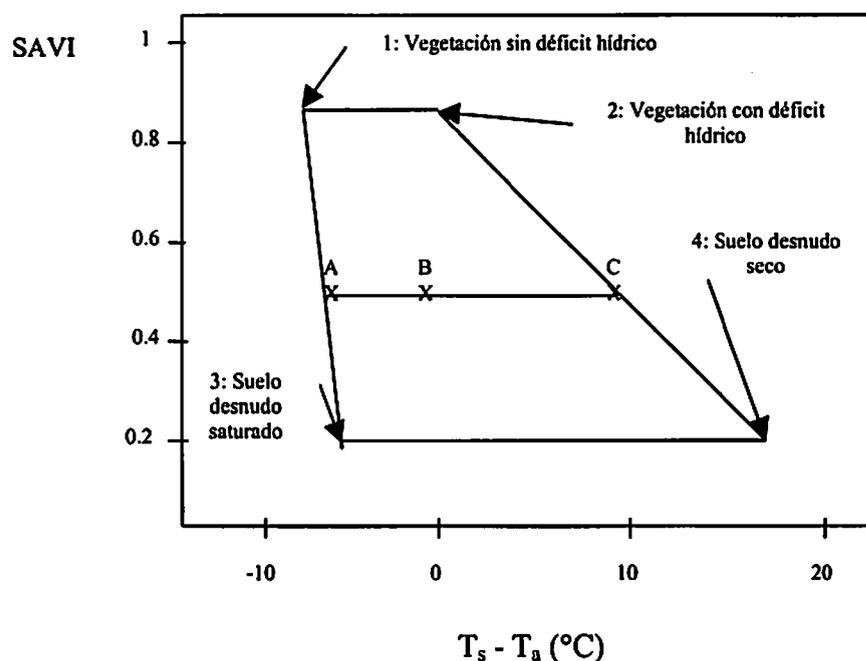


Figura 2. Forma trapezoidal hipotética que relaciona $(T_s - T_a)$ y el índice de vegetación SAVI (varía entre 0.1 para suelos desnudos y 0.8 para coberturas de vegetación completas). Con una medida de $T_s - T_a$ en un punto C es posible igualar el cociente entre ET actual y potencial con el de las distancias CB y AB. (Moran y col. 1994).

Por tanto,

$$WDI = 1 - \lambda E_r / \lambda E_{rp} = AB / AC \quad (5)$$

Los vértices del trapecio corresponden a situaciones extremas y pueden ser calculados considerando para el punto 1, una resistencia mínima de la cubierta (r_{cp}), es decir en condiciones de ET potencial, en el punto 2, la resistencia máxima (r_{cx}), debido al cierre estomatal, en el punto tres se considera cero para el suelo húmedo y sin cubierta y en el cuatro igual a ∞ para un suelo seco, las expresiones a aplicar son para cada vértice:

$$(T_s - T_a)_1 = [r_a(R_n - G)/C_v][\gamma(1 + r_{cp}/r_a)/\{\Delta + (1 + r_{cp}/r_a)\}] - [DPV/\{\Delta + \gamma(1 + r_{cp}/r_a)\}] \quad (6)$$

$$(T_s - T_a)_2 = [r_a(R_n - G)/C_v][\gamma(1 + r_{cx}/r_a)/\{\Delta + (1 + r_{cx}/r_a)\}] - [DPV/\{\Delta + \gamma(1 + r_{cx}/r_a)\}] \quad (7)$$

$$(T_s - T_a)_3 = [r_a(R_n - G)/C_v][\gamma/(\Delta + \gamma)] - [DPV/(\Delta + \gamma)] \quad (8)$$

$$(T_s - T_a)_4 = [r_a(R_n - G)/C_v] \quad (9)$$

Cualquier situación del cultivo debe comprenderse dentro de estos límites, por lo que será posible aplicarle el WDI.

El HCWSI se basa en la hipótesis de que en un cultivo con cobertura total y un nivel hídrico adecuado, los valores de la temperatura de la cubierta siguen una distribución normal. Un cultivo en las condiciones descritas debe tender al intervalo óptimo de temperatura para una fotosíntesis máxima, denominado *ventana térmica* (Burke y col., 1988). Si este cultivo tiende a un valor fijo de temperatura, se puede suponer que los datos se distribuyen según una normal siempre que no haya otros factores de variabilidad como algún rodal en el cultivo y la media de estos datos debe estar en el centro del intervalo de su *ventana térmica*. Cuanto más se alejen los datos térmicos de una parcela de una distribución normal, mayor será el estrés hídrico de la parcela. Esto se debe a que al disminuir el agua disponible para la fotosíntesis, las diferencias en las propiedades del suelo y su capacidad para almacenar agua modifican la capacidad de cada planta para mantenerse dentro de su *ventana térmica*. Esta teoría se aplica en la derivación de un índice de estrés hídrico a partir de la desviación del histograma de la temperatura de superficie, de un histograma que se construye siguiendo una distribución normal con los mismos parámetros, media y desviación típica, que los datos originales. Para poder comparar distintas parcelas, se normaliza el eje Y de cada histograma (el de frecuencias y el generado artificialmente) creando histogramas con igual intervalo de valores en Y, independientemente de la desviación típica de los datos, situando ese intervalo entre 0 y 1. El HCWSI se calcula sumando las diferencias absolutas de los dos histogramas, lo que corresponde al área sombreada en las figuras 3a y 3b.

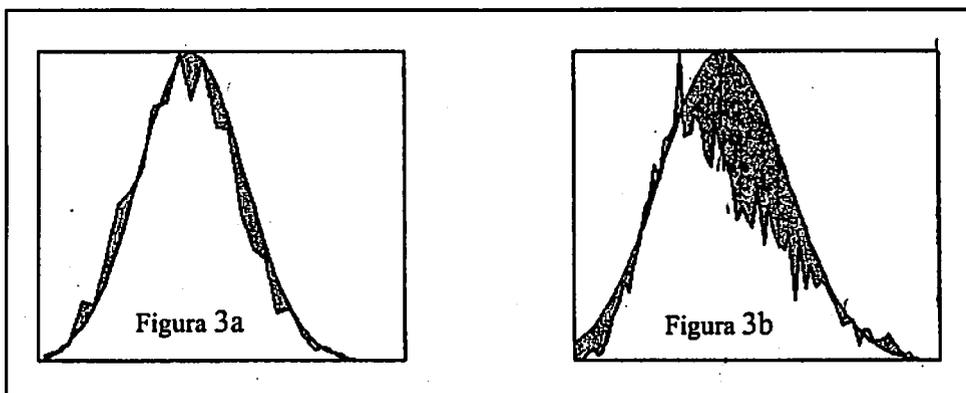


Figura 3. Ejemplo de histogramas de datos térmicos y la distribución normal asociada en a) imagen térmica de un cultivo en buenas condiciones hídricas y b) un cultivo con estrés hídrico.

RESULTADOS

La siguiente tabla muestra la relación encontrada entre los índices para el conjunto de los datos:

	STD	WDI	CWSI _t	CWSI _b
WDI	0,78			
CWSI _t	0,54	0,71		
CWSI _b	0,5	0,73	0,94	
HCWS	0,76	0,39	0,21	0,11

Tabla 1. Coeficientes de correlación entre los índices de estrés hídrico (calculados con 62 de las 64 parcelas estudiadas).

Es destacable en primer lugar la baja relación del HCWI con los tres índices clásicos: WDI, CWSI_t y CWSI_b, lo que indica que tal y como ha sido calculado, el HCWI no puede ser utilizado en la determinación del estrés hídrico. Esto puede deberse a que los datos considerados no se ajustan a una distribución normal, o bien a que para su cálculo, el histograma real de una parcela en situación de estrés esta siendo comparado con uno construido partiendo de la media y la varianza de los mismos datos, y no con los correspondientes a una parcela en condiciones óptimas, lo que podría arrojar mejores resultados. Esta alternativa presentaría algunos inconvenientes, como un aumento de las dificultades para aplicarlo en campo, al requerir una parcela de referencia en condiciones óptimas y comparable a las demás. Será necesario profundizar en el estudio de esta relación entre la variabilidad de la temperatura y el estrés y en los fundamentos de este índice para plantear alguna opción que proporcione mejores resultados.

Por otro lado, es notable la alta correlación de estos índices con la desviación típica de los datos. Esta relación es especialmente buena con el WDI y no tanto con el CWSI, lo que es lógico, considerando que este último es válido únicamente en situaciones de cobertura completa, premisa que no se cumple en todas las parcelas consideradas. Aquellas en las que esto sí ocurre, con un índice de vegetación SAVI > 0.7, la correlación entre la desviación típica y el CWSI aumenta hasta 0.63 y 0.74 para las aproximaciones teóricas y de línea base. En estos valores de cobertura y como era de esperar, la correlación entre el WDI y el CWSI también aumenta hasta un 0.95 y 0.98 para cada caso.

Representando gráficamente la relación entre la desviación típica y el WDI (fig. 4) se aprecia claramente el ajuste y se puede observar también la situación anómala de dos puntos (representados en tono más claro). Corresponden a dos parcelas adyacentes entre si, la 32_7 y 32_8 del día 193, ambas tienen los valores de cobertura más bajos de todo el conjunto, con índices SAVI iguales a 0.35 y 0.36, lo que, tal y como se aprecia en la figura 5, tiene una respuesta espectral cercana al suelo desnudo. Al pertenecer a la primera fecha de toma de datos, es posible que el cultivo no hubiese alcanzado aún la madurez. En la parcela 32_8 la sequedad es muy alta, como indica el WDI, sin embargo la STD no tiene un valor tan elevado como le correspondería, probablemente por una predominante influencia del suelo sobre la cubierta vegetal. La parcela 32_7 se estaba regando en el momento de paso del sensor, como se puede comprobar claramente en la imagen (fig. 5), por lo que la variabilidad de la temperatura es muy alta, no viéndose reflejado este acontecimiento en el WDI, cuyo valor corresponde a la superficie ya regada, mayoritaria en la parcela. Eliminando estos dos puntos,

el coeficiente de ajuste de la ecuación se sitúa en 0.62, valor mucho más significativo que el anterior.

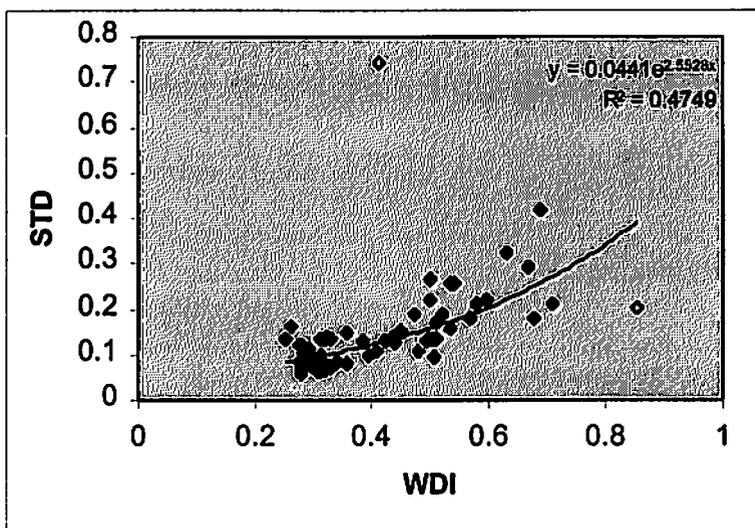


Figura 4. Relación entre la desviación típica y el WDI, en un tono más claro aparecen las dos parcelas con muy baja cobertura y en riego, lo que origina valores anómalos.

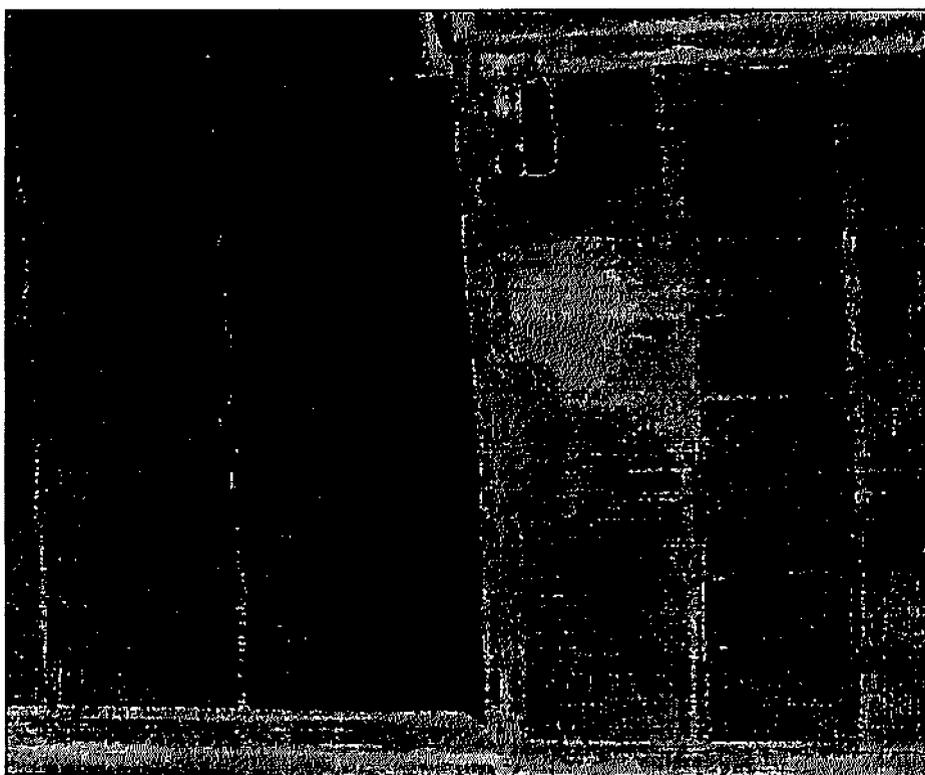


Figura 5. Imagen ATLAS del día 193, se pueden apreciar las parcelas 32-7 y 32-8, la primera parcialmente regada y la segunda con una cubierta más cercada al suelo desnudo a su derecha que a otras parcelas con algodón su izquierda.

CONCLUSIONES

La variabilidad de la temperatura de la cubierta de un cultivo es un buen índice de su estrés hídrico y con un refinamiento del método podría ser empleado en la programación del riego. La relación entre índices comúnmente aplicados en campo, como el CWSI y el WDI, con las aproximaciones aquí presentadas ha obtenido resultados dispares. Por un lado, la correlación con la desviación típica de los datos térmicos (STD) es significativa en todos los casos, llegando a un coeficiente de correlación de 0.78 con el WDI. Por otro lado el HCWSI no presenta una relación significativa, lo que indica que alguna de las premisas de su planteamiento es errónea y deberá ser objeto de un estudio más profundo.

En condiciones de muy baja cobertura, la influencia del suelo provoca una respuesta espectral muy homogénea, enmascarando el estado del cultivo, por lo que se debe establecer un umbral mínimo de cobertura para el uso de la variabilidad térmica. Se ha comprobado que otros factores que influyen en la variabilidad, como un riego en marcha, deben ser evitados ya que distorsionan los resultados de forma substancial.

Agradecimientos

A Juan Vicente Giráldez y Luciano Mateos, que propiciaron esta colaboración y al Southwest Watershed Research Center.

BIBLIOGRAFIA

- Burke, J. J., J. R. Mahan y J. L. Hatfield (1988). Crop-specific thermal kinetic windows in relation to wheat and cotton biomass production. *Agron. J.* 80:553-556.
- Clawson, K. L. y B. L. Blad (1982). Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. *Agron. J.* 74:311-316.
- Gardner, B. R., B.L. Blad y D.G. Watts (1981). Plant and air temperatures in differentially-irrigated corn. *Agric. Meteorol.* 25:207-217.
- Huete A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Rem. Sens. Environ.* 27:47-57.
- Idso, S. B. y D. G. Baker (1967). Relative importance of reradiation, convection and transpiration in heat transfer from plants. *Plant Physiol.* 42:631-640.
- Idso, S. B., R. D. Jackson, P. J. Pinter, R. J. Reginato y J. L. Hatfield (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 24:45-55.
- Idso, S. B. (1982). Non-water-stress baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric. Meteorol.* 27:59-70.
- Jackson R. D. (1982). Canopy temperature and crop water stress. *Advances in Irrig.* 1:43-85
- Jackson, R. D., D. B. Idso, R. J. Reginato, y P. J. Pinter (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.* 17:1133-1138.
- Moran, M. S., T. R. Clarke, Y. Inoue y A. Vidal (1994). Estimating Crop Water Deficit Using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 49:246-263.
- Moran, M. S. (1998). NASA's airborne terrestrial applications sensor (ATLAS): A customer's perspective. *NASA Commercial Rem. Sens. Verification and Validation Symp.* J.C. Stennis Space Center, MS.
- Moran, M. S., R. Bryant, K. Thome, W. Ni, Y. Nouvellon, M.P. González, J. Qi y T. R. Clarke (2000). A refined empirical line approach for reflectance factor retrieval from Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+. *Remote Sensing of environment*, en prensa.
- Smith, G. M. y E. J. Milton (1999). The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. *Int. J. Rem. Sens.* 20:2653-2662.