

Identificación de los efectos del estrés hídrico en cultivos de algodón por medio de sensores remotos

Identification of water stress effects on cotton crops using remote sensing

Fabio H. Echeverry Andrade¹

“Cómo citar este artículo: Echeverry Andrade, F. H. (2017). Identificación de los efectos del estrés hídrico en cultivos de algodón por medio de sensores remotos. *Análisis Geográficos*, 52, 91-106.

Resumen

La demanda promedio de algodón en Colombia desde el 2006 ha caído de 80 000 toneladas por año a 30 000 debido a los fuertes cambios climáticos, lo cual se refleja en la mala calidad de la fibra de hilatura. En este trabajo se identificaron los efectos del estrés hídrico del cultivo de algodón en el municipio de Villavieja, Huila. Para ello se emplearon 12 imágenes satelitales de las series Landsat 4 TM, 5 TM y 7 ETM+ correspondientes a diferentes periodos climáticos de Colombia (secos y húmedos). Las imágenes fueron procesadas en el software Erdas Imagine 9.2 y se les aplicaron diferentes transformaciones: radiancia, reflectancia, índice de vegetación por diferencia normalizada e índice diferencial de agua normalizado, para finalmente calcular el índice diferencial de sequía normalizado. También se aplicó el índice empírico de humedad de referencia del estrés hídrico (CWSI) con datos de temperatura superficial. La validación dio como resultado una correlación de $R^2 = 0,9271$ y $0,4757$ para la temporada seca y la húmeda, respectivamente. Cuando se determina el valor umbral en las diferentes etapas fenológicas del cultivo, el índice CWSI ha demostrado ser de especial utilidad para programar el riego durante y evitar de esa manera daños por estrés hídrico y disminución en la producción.

Palabras clave: índice CWSI, estrés hídrico, percepción remota, termometría infrarroja, cultivos de algodón.

¹ Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Programa de Ingeniería Topográfica, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Correo: fabio.echeverri@correounivalle.edu.co.



Abstract

The average demand of cotton in Colombia from 2006 has fallen from 80 000 tons / year to 30 000, this appears for the strong climate changes, where there meets reflected the bad quality of the fiber of spinning. In this work has identified the effects of the water stress of the cotton crop in the Municipality Villavieja, Huila. With the implementation of 12 images satellites, it was possible to observe the effects of the water stress, the series Landsat 4 TM, 5 TM and 7 ETM+ were implemented with epochs understood by the climatic periods of Colombia (dry and humid). The images were processed in the software Erdas Imagine 9.2, different transformations were applied to them: radiance, reflectance, Normalized Difference Vegetation Index and Normalized Difference Water Index, to finally calculate the Normalized Differential Drought Index. Also applied the Crop Water Stress Index (CWSI) with information of superficial temperature. The validation gave like proved a correlation of $R^2 = 0.9271$ and 0.4757 for dry and humid season, respectively. The Index CWSI has demonstrated to be useful in the programming irrigation. When the threshold value is determinate in the different phenological stages of the crops, it is used to avoid hurts for water stress and decrease in the production of the crops.

Keywords: *CWSI index, water stress, remote sensing, infrared thermometry, cotton crops.*

Introducción

La demanda global de recursos hídricos se incrementa de forma paralela al desarrollo social y económico, y a la par del crecimiento poblacional en el planeta (Wu *et al.*, 2014); así, se aumenta la demanda de necesidades alimenticias y se intensifica la competición por el agua entre la agricultura, la industria y el medio ambiente (Yan & Wu, 2014). La disponibilidad de agua es un factor determinante en la producción potencial de la agricultura (Yuan *et al.*, 2013), convirtiéndose en uno de los sectores consumidores más grandes de recursos hídricos en el mundo, ya que consume cerca del 70 % del agua extraíble en distintos países y más del 90 % en países con suelos áridos (Parvizi, Sepaskhah & Ahmadi, 2014).

Los cultivos de algodón ocupan el sexto puesto en consumo de agua a nivel nacional, con un 7 % de aguas superficiales (Arévalo Uribe, 2012). En las últimas décadas se han utilizado diferentes metodologías con el fin de evaluar la calidad de los frutos bajo diferentes estados hídricos (Suárez *et al.*, 2010), y entre las variables utilizadas se destaca la temperatura. Uno de los mecanismos para valorar la temperatura es hacer uso de la información térmica en un cultivo, lo que permitiría obtener el estado hídrico a partir de sus dimensiones espaciales (Luquet *et al.*, 2003). En ese sentido, los estudios con termografía infrarroja en los temas de estrés hídrico son una herramienta útil para darle una mejor distribución al suministro de agua (O'Shaughnessy *et al.*, 2011).

Por los fuertes cambios climáticos, en las regiones que cultivan algodón se presentan pérdidas de miles de toneladas, que se

ven reflejadas en los indicadores económicos del sector (Conalgodón, 2012).

Desde el primer lanzamiento de satélites meteorológicos y de observación, el procesamiento de imágenes satelitales, junto con datos estacionarios, ha sido considerado como un método eficaz para obtener información de condiciones hídricas a diferentes escalas espaciales y temporales (Méndez-Barroso, Garatuza-Payán & Vivoni, 2008).

Uno de los métodos más utilizados es el índice de estrés hídrico (CWSI, por la sigla en inglés de *crop water stress index*), que vincula la temperatura de cubierta con el estrés hídrico (González-Dugo *et al.*, 2006). También se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por la sigla en inglés de *normalized difference vegetation index*), uno de los más utilizados en el mundo por su sencillez y simplicidad, que es una transformación digital que combina matemáticamente los niveles digitales de las bandas espectrales que corresponden a la imagen (Méndez-Barroso, Garatuza-Payán & Vivoni, 2008), y el índice diferencial de agua normalizado (NDWI, por la sigla en inglés de *normalized difference water index*), que se utiliza para medir la cantidad de agua presente en la vegetación a través de las reflectancias del infrarrojo cercano y de la banda infrarroja media (Delbart *et al.*, 2005).

Materiales y métodos

Para este trabajo se emplearon 12 imágenes satelitales Landsat de tres de sus series (4 TM, 5 TM y 7 ETM+). Las imágenes se obtuvieron del servidor Earth



Explorer del USGS Global Visualization Viewer de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por su sigla en inglés), definidas por el path 8 y row 58 que abarca el municipio de Villavieja. Las imágenes seleccionadas corresponden a diferentes épocas, desde el 5 de junio de 1992 hasta el 22 de enero de 2010, con el fin de estudiar los efectos del estrés hídrico. El procesamiento de las imágenes se realizó en el software Erdas Imagine 9.2 y se empleó ArcGIS 10.2 para las salidas gráficas.

Zona de estudio

La zona de estudio fue el municipio de Villavieja, que es el segundo productor de algodón en el departamento de Huila, con una altitud promedio de 384 msnm y una superficie de 670 km².

Tratamiento digital de las imágenes

Las 12 imágenes Landsat fueron sometidas a una etapa de preprocesamiento, en la cual se efectuaron correcciones atmosféricas para minimizar los errores antes de aplicar los diferentes índices.

Se creó una imagen compuesta, donde se unieron las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 para Landsat 4 TM, 5 TM y 7 ETM, sin incluir la 6, ya que esta última se utilizó para estimar la temperatura superficial. Luego de esto se procedió a realizar un recorte de las imágenes con un archivo de forma poligonal del municipio de Villavieja, que fue transformado a un formato AOI.

Con el recorte ya definido en las 12 imágenes, se continuó con el procesamiento de la información, ya que los valores digitales no presentan ninguna variable

biofísica. Se inició con la conversión de valores digitales a valores de radiancia (ec. 1), que es el total de energía radiada por una superficie en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Luego de obtener los valores de radiancia, estos se convierten a valores en reflectancia aparente (ec. 2), ya que el cálculo de la reflectancia elimina el efecto coseno de diferentes ángulos cenitales solares producidos por la diferencia de tiempo entre adquisición de datos, y también compensa los diferentes valores de la irradiancia solar exoatmosférica (Chander, Markham & Helder, 2009).

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{max} - L_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \right) \times (Q_{cal} - 1) + L_{min} \quad (1)$$

Donde L_{max} y L_{min} son los valores máximos y mínimos de radiancia de cada una de las bandas que componen las imágenes; Q_{max} y Q_{min} son los valores de pixeles máximos y mínimos cuantificados y calibrados y Q_{cal} es la imagen.

$$\rho_k = K\pi \frac{L_{\lambda}}{ESUN * \cos \theta} \quad (2)$$

Donde L_{λ} es la radiancia; $ESUN$ es la irradiancia solar exoatmosférica; θ es el ángulo cenital solar y K es la distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas que se obtiene mediante la ecuación 3.

$$K = 1 + 0.0167 \left[\sin \frac{2\pi(n - 93,5)}{365} \right]^2 \quad (3)$$



Aplicación de los índices

Una vez obtenidos los valores de reflectancia de las distintas bandas, se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice diferencial de agua normalizado (NDWI) y el índice diferencial de sequía normalizado (NDDI).

Índice de vegetación de diferencia normalizada

Para el NDVI se utilizaron la banda roja (3) e infrarroja cercana (4), ya que las plantas sanas absorben la luz roja y reflejan la luz infrarroja. Esta relación permite detectar las plantas sanas con condiciones de humedad normal (Stamatis, Tsadilas & Schepers, 2010), y se calcula con la ecuación 4:

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{Red})}{(\rho_{NIR} + \rho_{Red})} \quad (4)$$

Donde ρ_{NIR} es la reflectancia del infrarrojo cercano y ρ_{Red} es la banda roja.

Índice diferencial de agua normalizado

El NDWI (ec. 5) se utilizó para medir la cantidad de agua presente en la vegetación. Para este índice se utilizó la banda infrarroja cercana (4) y la banda del infrarrojo medio (5).

$$NDWI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{SWIR})}{(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR})} \quad (5)$$

Donde ρ_{NIR} es la reflectancia del infrarrojo cercano y ρ_{SWIR} es la reflectancia de la banda infrarroja media.

Índice diferencial de sequía normalizado

El cálculo del NDDI se basa en la diferencia entre el NDVI que contiene información de la vegetación y el NDWI que presenta información sobre los niveles de humedad en el suelo. La ecuación 6 los relaciona de la siguiente forma:

$$NDDI = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI} \quad (6)$$

Cálculo de la temperatura superficial

Para el cálculo de la temperatura superficial es necesario obtener inicialmente la fracción de vegetación (f_v) que corresponde a la cantidad de vegetación presente en un pixel, la emisividad (e), que es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie, y la temperatura de brillo (T_L), que equivale a la temperatura efectiva en el satélite en grados Kelvin.

Fracción de vegetación

La fracción de vegetación fue calculada utilizando la ec. 7 y se basa en los datos máximos y mínimos obtenidos del cálculo del NDVI; este índice se expresa en valores entre -1,0 y 1,0 (Sancha Navarro, 2010).

$$f_v = 1 - \left[\frac{(NDVI_{MAX} - NDVI)}{(NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN})} \right]^{\alpha} \quad (7)$$

Donde f_v es la fracción de uso de la vegetación; $NDVI_{MAX}$ es el valor máximo del NDVI; $NDVI_{MIN}$ es el valor mínimo del NDVI y α es el valor de la orientación de la hoja de la planta (0,6).



Emisividad

Posteriormente fue calculada la emisividad con la ecuación 8, y se usaron los datos obtenidos en el cálculo del NDVI y la fracción de vegetación (López García & Caselles Miralles, 1986).

$$\varepsilon = fv * \varepsilon_v + (1 - fv)\varepsilon_s \quad (8)$$

Donde ε es la emisividad; ε_v es la emisividad superficial de la vegetación (0,985); ε_s es la emisividad superficial del suelo (0,978) y fv es la fracción de uso de la vegetación.

Temperatura de brillo

Este parámetro se calculó con los valores de radiancia de la banda térmica obtenidos en el preprocesamiento de las imágenes, y para ello se utilizó la ecuación 9. El resultado se presenta en grados Kelvin (Santana Rodríguez, Escobar Jaramillo & Capote, 2010).

$$T_L = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (9)$$

Donde T_L es el brillo de temperatura en el sensor en grados Kelvin; L_λ es la radiancia de la banda térmica; K_1 y K_2 son constantes: 666,09 $Wm^2sr^{-1}um^{-1}$ y 1282,71 K respectivamente.

Temperatura superficial

La temperatura superficial es el resultado final en esta serie de procesos y se obtuvo mediante las ecuaciones 10 y 11. Su resultado está dado en grados centígrados.

$$\rho = \frac{h * c}{\sigma} \quad (10)$$

Donde h es la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$); c es la velocidad de propagación de la luz ($2,998 \times 10^8$) y σ es la constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23}$).

$$T_S = \left[\frac{T_L}{1 + \left(\frac{\lambda T_L}{\rho}\right)} \ln \varepsilon \right] - 273.15 \quad (11)$$

Donde T_S es la temperatura superficial; T_L es el brillo de temperatura en el sensor en grados Kelvin y λ es la longitud de onda media de la banda térmica ($11,5 \times 10^{-6}$).

Índice de estrés hídrico a partir de la temperatura superficial

El índice de estrés hídrico (CWSI) se calculó mediante el uso de la ecuación 12, donde T_S es la temperatura del cultivo; T_w es la temperatura media del aire y T_{dry} es un estimado de la máxima temperatura. De acuerdo con la gobernación del Huila, en el municipio de Villavieja la temperatura promedio del aire es de 32 °C.

$$CWSI = \left(\frac{T_S - T_w}{T_{dry} - T_w} \right) \quad (12)$$

Clasificación supervisada

Para identificar las diferentes coberturas de la tierra presentes en la zona de estudio, se aplicó una clasificación supervisada mediante el uso del software Erdas a partir de las salidas generadas por los diferentes modelos.



Validación

En la realización de este proyecto, al no contar con la posibilidad de obtener información primaria en campo, se utilizaron los datos de temperatura, humedad y precipitación registrados mensualmente a partir del año 1998 en una estación meteorológica de la Federación Nacional de Arroceros ubicada en el municipio de Aipe, vecino de Villavieja. Estos datos fueron normalizados y se filtraron para obtener solo la temperatura y los años de acuerdo con las imágenes.

Resultados y discusión

Tratamiento digital de las imágenes

El recorte realizado con un AOI basado en un archivo de formato shp georreferenciado (WGS 84, UTM zona 18) del municipio de Villavieja arrojó resultados satisfactorios. En estos recortes, las nubes presentes en las imágenes no alteraron sus valores digitales y tampoco opacaron la zona de estudio.

Como resultado del cálculo de reflectancia se obtuvieron 12 imágenes (fig. 1) para tres de las cuatro épocas climáticas presentes en la zona andina de nuestro país; los valores máximos y mínimos de las imágenes estaban entre -1 y 1.

Índices

El resultado de los índices se interpretó visualmente. El NDVI (fig. 2) presenta las zonas con contenido de humedad en tonos grises oscuros y negros, y el contenido de vegetación y suelo en colores grises claros y blancos; por el contrario, el NDWI (fig. 3) presenta las zonas con contenido de humedad en color blanco.

Los índices NDVI y NDWI se procesaron con el fin de conocer las variaciones presentes en las 12 imágenes respecto al contenido de humedad y vegetación; los tres muestran el comportamiento de la humedad presente en el suelo y la cobertura vegetal, con cambios considerables en las extensiones de llanuras aluviales y vegetación en las tres temporadas. Con esto, tenemos que el uso de sensores

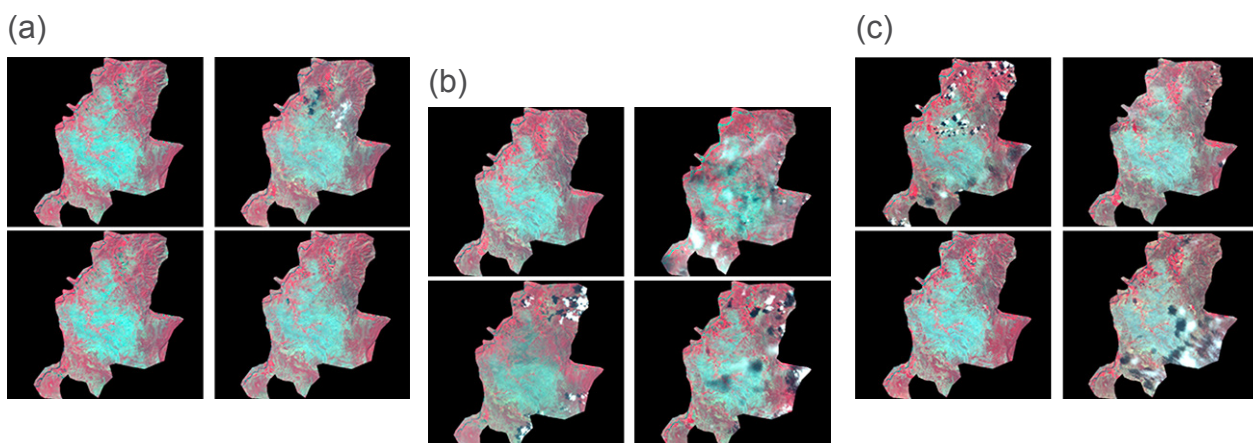


Figura 1. Valores de reflectancia: a) temporada seca, 21 de dic. - 21 de mar.; b) temporada húmeda, 22 de mar. - 21 de jun.; c) temporada seca, 2 de de jun. - 21 de sep.

Fuente: elaboración propia.



remotos para el monitoreo de la escasez de agua en el campo puede resultar útil en las regiones semiáridas donde el agua es, a menudo, el factor más limitante de la producción (Stamatis, Tsadilas & Schepers, 2010).

El índice de vegetación NDVI y el de agua NDWI son modelos desarrollados para trabajar con bandas contenidas en los productos de sensores, los cuales permiten conocer la presencia de cuerpos de agua en una superficie (fig. 2 y 3). Un análisis visual de las imágenes del NDWI indica

que la temporada húmeda (b), muestra más cantidad de agua en la superficie vegetal.

Por último, se calculó el índice diferencial de sequía normalizado (NDDI) (fig. 4), que combina los índices NDVI y NDWI. Se observó que se presenta más sequía en la temporada seca, comprendida entre el 21 de diciembre y el 21 de marzo, y aunque este resultado se ve alterado por la zona que comprende al desierto de la Tatacoa, se pueden ver los cambios que se presentan con más intensidad en las

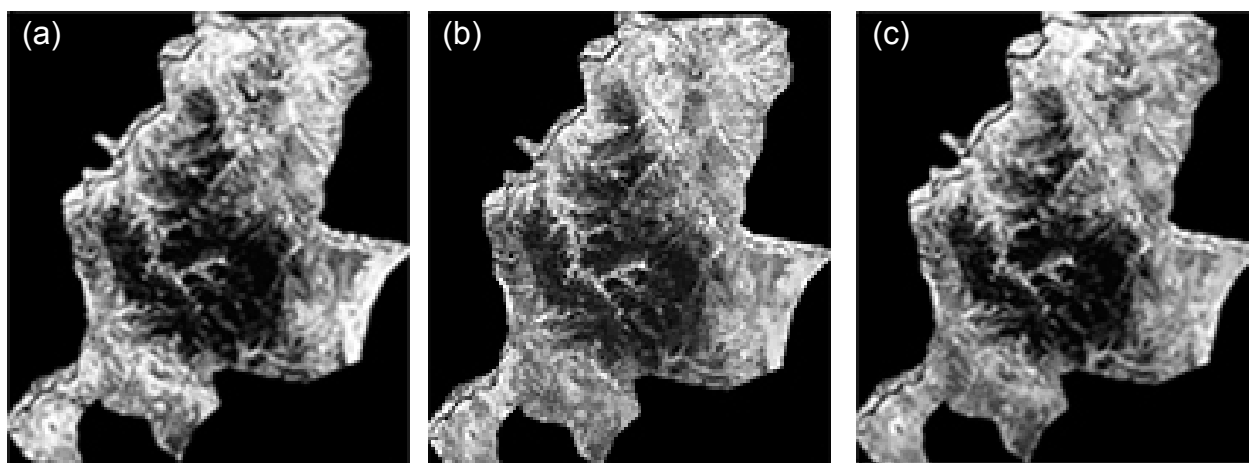


Figura 2. NDVI: a) temporada seca, 21 de dic. - 21 de mar.; b) temporada humedad, 22 de mar. - 21 de jun.; c) temporada seca, 2 de jun. - 21 de sep.

Fuente: elaboración propia.

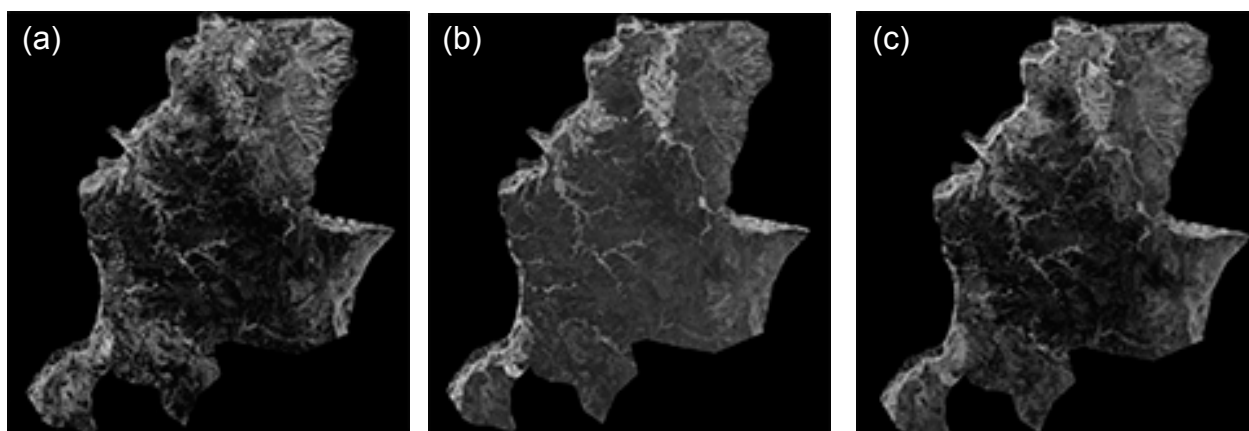


Figura 3. NDWI: a) temporada seca, 21 de dic. - 21 de mar.; b) temporada húmeda, 22 de mar. - 21 de jun.; c) temporada seca, 2 de jun. - 21 de sep.

Fuente: elaboración propia.

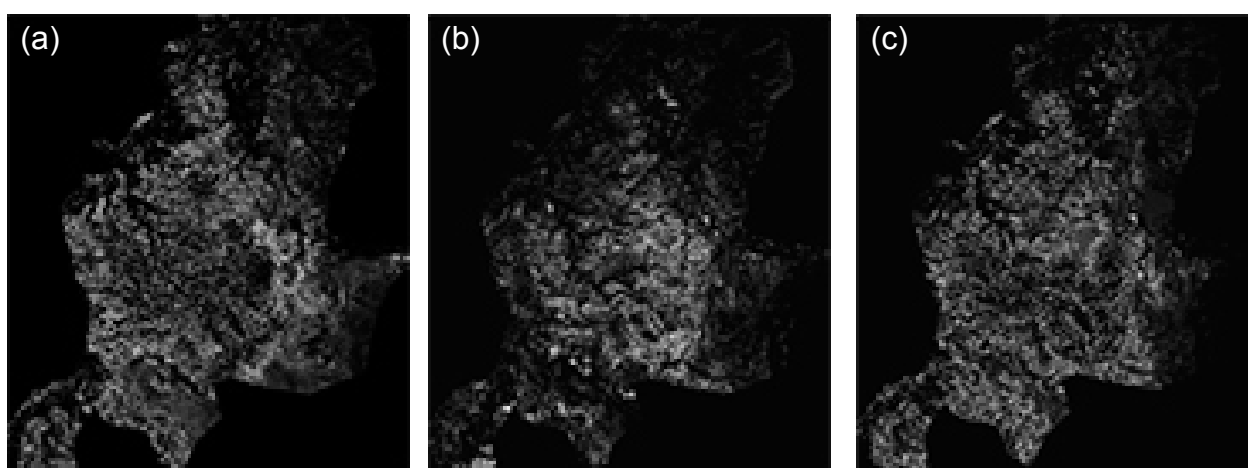


Figura 4. NDDI: a) temporada seca, 21 dic. - 21 de mar.; b) temporada húmeda, 22 de mar. - 21 de jun.; c) temporada seca, 2 de jun. - 21 de sep.

Fuente: elaboración propia.

épocas secas que en la temporada húmeda. Luquet *et al.* (2003) y O’Shaughnessy *et al.* (2011) sugieren que para aplicar la información de termografía infrarroja digital en los temas de estrés hídrico en un cultivo y poder obtener el estado hídrico se necesita saber las dimensiones del cultivo. En comparación con este estudio, debido a la resolución de las imágenes Landsat, no se identifican los cultivos de algodón y

los modelos se aplicaron a todo el municipio de Villavieja, lo que generó variaciones en los cálculos del índice CWSI.

Temperatura superficial

El cálculo de la temperatura superficial (fig. 5) arrojó los valores presentados en la tabla 1, los cuales se presentan en grados centígrados y evidencian que en la temporada húmeda la temperatura es menor.

Tabla 1. Temperatura superficial

Temperatura superficial	Máxima	Mínima
Temporada seca (dic. 21 - mar. 21)	31,556 °C	29,863 °C
Temporada húmeda (mar. 22 - jun. 21)	30,925 °C	29,304 °C
Temporada seca (jun. 22 - sep. 21)	31,415 °C	29,693 °C



Una vez alcanzado el umbral del CWSI es recomendable programar el riego para evitar los daños por estrés hídrico y la disminución en el rendimiento de los cultivos. El umbral para el algodón es de 0,3 pero los valores obtenidos con el CWSI (tabla 2) son superiores al umbral en las temporadas secas, lo que evidencia presencia de estrés hídrico. Claro está que estos valores se ven alterados por la presencia de coberturas diferentes a la del algodón y solo en la temporada húmeda se registra un CWSI de 0,18 lo cual indica que la superficie no está estresada. Yuan *et al.* (2004) afirman que el CWSI es el indicador más utilizado para cuantificar situaciones de estrés hídrico, ya que está basado en la temperatura del dosel de la superficie. Esto se comprobó al calcular la temperatura superficial y aplicar la fórmula CWSI (ec. 12), lo que arrojó como resultado el estado de estrés de las tres épocas estudiadas (tabla 2).

Clasificación supervisada

En la clasificación supervisada (fig. 6) se eligieron dos temporadas: la seca, del 21

Tabla 2. Índice de estrés hídrico a partir de la temperatura superficial

Temporada seca (dic. 21 - mar. 21)	0,80
Temporada húmeda (mar. 22 - jun. 21)	0,18
Temporada seca (jun. 22 - sep. 21)	0,50

de diciembre al 21 de marzo, que es la temporada más árida del país, y la húmeda, que va desde el 22 de marzo hasta el 21 de junio.

En la imagen *a* se puede observar que el desierto de la Tatacoa (naranja) se hace más visible y la cobertura vegetal (verde oscuro) más escasa, en comparación con la imagen *b*. En la imagen *b* se pueden observar los efectos de la temporada húmeda, ya que se hace más evidente la presencia de cuerpos de agua (azul) y la vegetación (verde oscuro) más abundante; también se aprecia la presencia de nubes (blanco).

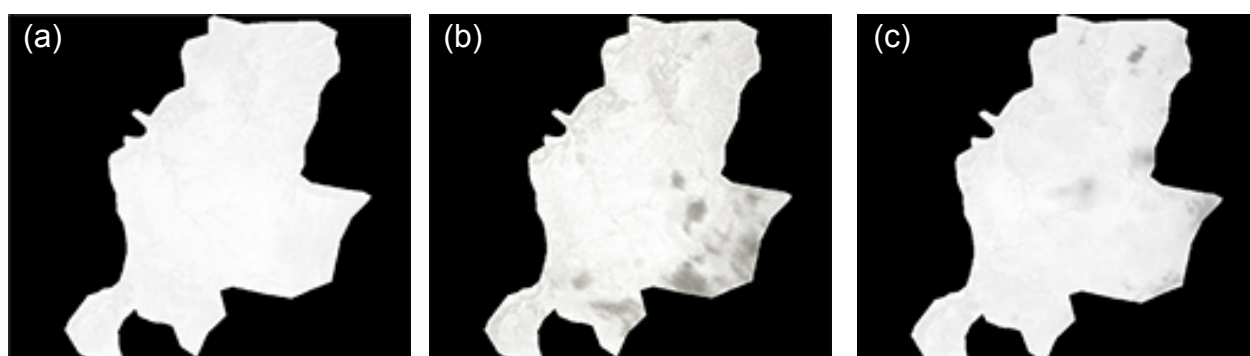


Figura 5. a) temporada seca, 21 dic. - 21 de mar.; b) temporada húmeda, 22 de mar. - 21 de jun.; c) temporada seca, 2 de jun. - 21 de sep.

Fuente: elaboración propia.

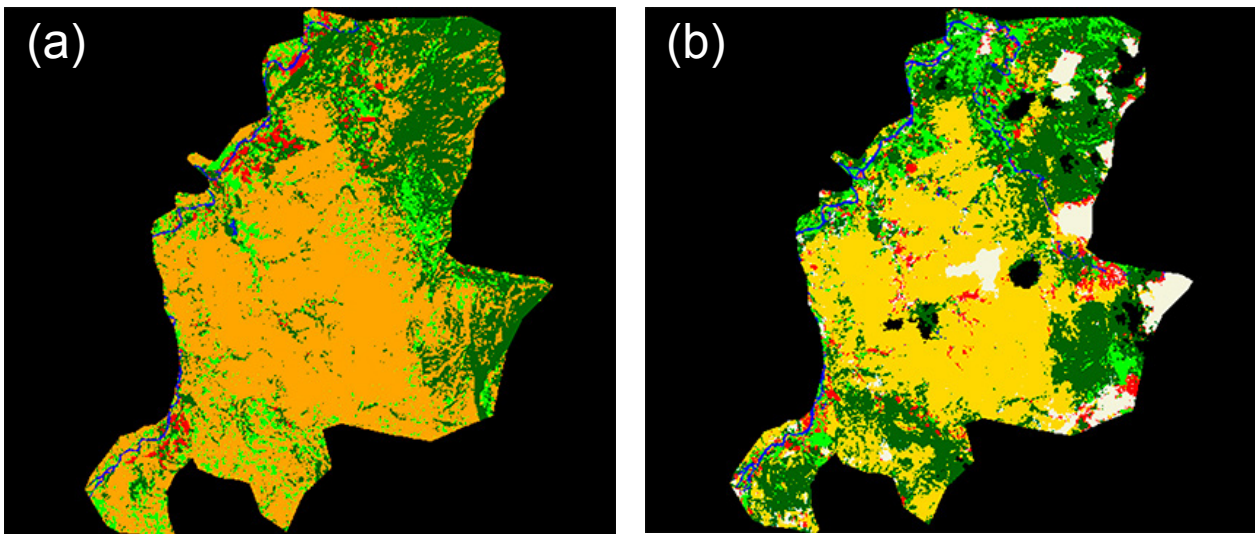


Figura 6. Clasificación supervisada: a) temporada seca, 21 dic. - 21 de mar.; b) temporada húmeda, 22 de mar. - 21 de jun.

Fuente: elaboración propia.

Validación

La validación se realizó a partir de la información climatológica proveniente de la estación meteorológica Aipe, ubicada en el municipio con el mismo nombre, vecino del municipio de Villavieja. El problema generado en este estudio fue que no se obtuvieron los datos por días para hacer una comparación con el día de toma de imágenes, por lo que los datos obtenidos de las estaciones fueron mensuales. Se eligieron los meses de marzo y junio para evaluar la temporada seca y húmeda respectivamente.

Con la regresión lineal de los datos de las estaciones y la temperatura superficial en la temporada seca (fig. 7), se obtuvo una pendiente en la que cada incremento unitario de la temperatura de la imagen hace que la temperatura registrada en las estaciones aumente 2,98 °C. La ordenada de origen arrojó un valor de 3,73 °C, lo que significa que con las temperaturas

mínimas registradas en los valores de pixel, el valor inicial en las estaciones será el de la ordenada. En general, estos datos muestran una relación positiva y se puede decir que son confiables, obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) = 0,9271.

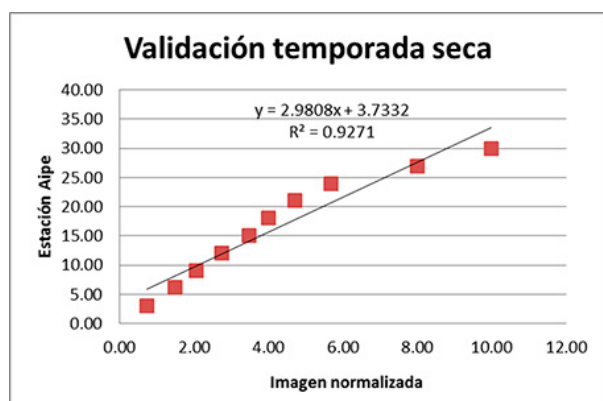


Figura 7. Validación temporada seca

Fuente: elaboración propia.



A diferencia de la regresión lineal de la temporada seca, la regresión lineal de la temporada húmeda (fig. 8) no arrojó resultados satisfactorios, no se evidencia una relación en los datos y se consideran dispersos, además de obtener un coeficiente de determinación (R^2) = 0,4757.

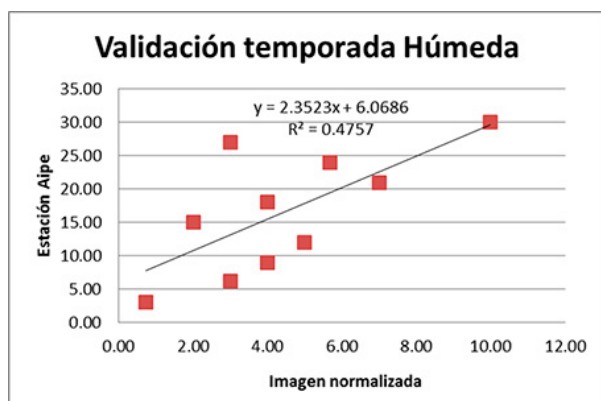


Figura 8. Validación temporada húmeda.
Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

En este estudio, el estado del arte fue la herramienta esencial que permitió el desarrollo óptimo de cada uno de los productos. Gracias a esta fase se pudieron conocer modelos matemáticos aplicables a las imágenes satelitales, en este caso, del sensor Landsat en tres de sus series (4 TM, 5 TM y 7 ETM). Esto ayudó a la interpretación de los datos obtenidos, permitiendo realizar un análisis visual y estadístico.

La implementación de imágenes satelitales en la estimación e identificación de fenómenos climáticos ha tenido gran auge en las últimas décadas. Las bandas térmicas han sido ampliamente utilizadas para estudiar el estrés hídrico, mejor conocido como sequía. Así, vemos que

la termometría infrarroja es una herramienta sencilla, práctica, no destructiva y confiable que se ha aplicado en diversos estudios agrícolas para la programación del riego, y también es útil para la predicción de rendimientos.

Es de destacar la utilidad del índice de vegetación normalizada (NDVI) y el índice diferencial de agua normalizado (NDWI) para estimar la cantidad y calidad de los cultivos y de los cuerpos de agua, debido a su gran sencillez y su fácil adaptación a diferentes superficies del globo terrestre, aunque es necesario emplear condicionales a la hora de generar los modelos en Erdas, ya que con algunas operaciones se indeterminan y no arrojan resultados. Aunque en general los resultados obtenidos son satisfactorios, se considera pertinente y, en algunos casos, necesario el uso de patrones climatológicos espacio-temporales para poder discriminar, a una escala mayor, las zonas que han sufrido sequía. El método del índice de estrés hídrico a partir de la temperatura superficial (CWSI) ha demostrado ser muy útil a la hora de programar los riegos. Cuando se determina el valor umbral en las diferentes etapas fenológicas del cultivo, este se emplea para evitar daños por estrés hídrico y disminución en la producción.

También es importante conocer las condiciones climáticas de la zona. En este caso, para Colombia, fue necesario establecer las temporadas de lluvia y de esta manera analizar tres épocas distintas: la primera es la temporada seca, entre diciembre y marzo, influenciada por las celdas de alta presión subtropical, que se conoce como la más desértica del país; la segunda, del 21 de marzo al 21 de junio, es la temporada húmeda, que se presenta con mayor

intensidad hacia el centro y sur del país; la tercera es la segunda temporada seca del año, que está comprendida entre el 21 de junio y el 21 de septiembre, y es seca especialmente en la zona central y sur del país. Estas temporadas se vieron presentes en los datos, donde se registraron diferencias en los valores de temperatura y humedad según la temporada.

A pesar de contar con los avances tecnológicos y con la constante actualización de

los sensores y satélites, es imprescindible disponer de datos de muestra tomados en campo, ya que estos permiten realizar una valoración y saber qué tan confiables son los productos obtenidos.

Este trabajo brinda elementos para futuras evaluaciones sobre los cultivos de algodón ante el cambio climático, y los resultados pueden aplicarse para acciones de protección y conservación.





Bibliografía

- Arévalo Uribe, D. (2012). *Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica*. Cali: World Wildlife Fund (WWF) Colombia. Recuperado de <http://www.huellahidrica.org/Reports/Arevalo-2012-HuellaHidricaColombia.pdf>.
- Chander, G., Markham, B. L. & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893-903. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>.
- Confederación Colombiana del Algodón (Conalgodón). (2012). *Avances de la estrategia exportadora de algodón en Colombia*. Recuperado de <http://conalgodon.com/sites/default/files/Revista%20Exportaci%C3%B3n.pdf>.
- Delbart, N., Kergoat, L., Le Toan, T., Lhermitte, J. & Picard, G. (2005). Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index. *Remote Sensing of Environment*, 97(1), 26-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.011>.
- González-Dugo, M. P., Moran, M. S., Mateos, L. & Bryant, R. (2006). Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity. *Irrigation Science*, 24(4), 233-240.
- López García, J. & Caselles Miralles, V. (1986). Aplicación de la teledetección al estudio de la temperatura superficial del mar balear y golfo de Valencia. *Cuadernos de Geografía*, 38, 75-92. Recuperado de <http://roderic.uv.es/bitstream/handle/10550/30821/75-92.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Luquet, D., Begue, A., Vidal, A., Clouvel, P., Dauszat, J., Olioso, A., Gu, X. F. & Tao, Y. (2003). Using multidirectional thermography to characterize water status of cotton. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 411-421. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00131-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00131-1).
- Méndez-Barroso, L. A., Garatuza-Payán, J. & Vivoni, E. R. (2008). Quantifying water stress on wheat using remote sensing in the Yaqui Valley, Sonora, Mexico. *Agricultural Water Management*, 95(6), 725-736. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2008.01.016>.



- O'Shaughnessy, S. A., Evett, S. R., Colaizzi, P. D. & Howell, T. A. (2011). Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton. *Agricultural Water Management*, 98(10), 1523-1535. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2011.05.005>.
- Parvizi, H., Sepaskhah, A. & Ahmadi, S. (2014). Effect of drip irrigation and fertilizer regimes on fruit yields and water productivity of a pomegranate (*Punica granatum* (L.) cv. Rabab) orchard. *Agricultural Water Management*, 146, 45-56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.005>.
- Sancha Navarro, E. F. (2010). El estudio de los índices de vegetación como base para conocer las relaciones entre la vegetación y el clima. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la información geográfica: la información geográfica al servicio de los ciudadanos* (pp. 1095-1108). Sevilla: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Recuperado de http://www.age-geografia.es/tig/2010_Sevilla/ponencia3/SANCHA.pdf.
- Santana Rodríguez, L. M., Escobar Jaramillo, L. A. & Capote, P. A. (2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de Geografía Norte Grande*, 45, 77-95. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022010000100006>.
- Stamatis, S., Tsadilas, C. & Schepers, J. S. (2010). Ground-based canopy sensing for detecting effects of water stress in cotton. *Plant and Soil*, 331(1/2), 277-287. <http://www.jstor.org/stable/24130564>.
- Suárez, L., Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., Berni, J. A. J., Sagardoy, R., Morales, F. & Fereres, E. (2010). Detecting water stress effects on fruit quality in orchards with time-series PRI airborne imagery. *Remote Sensing of Environment*, 114(2), 286-298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.09.006>.
- Wu, B., Jiang, L., Yan, N., Perry, C. & Zeng, H. (2014). Basin-wide evapotranspiration management: Concept and practical application in Hai Basin, China. *Agricultural Water Management*, 145, 145-153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2013.09.021>.





- Yan, N. & Wu, B. (2014). Integrated spatial-temporal analysis of crop water productivity of winter wheat in Hai Basin. *Agricultural Water Management*, 133, 24-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2013.11.001>.
- Yuan, G., Luo, Y., Sun, X. & Tang, D. (2004). Evaluation of a crop water stress index for detecting water stress in winter wheat in the north China Plain. *Agricultural Water Management*, 64(1), 29-40. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00193-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00193-8).
- Yuan, M., Zhang, L., Gou, F., Su, Z., Spiertz, J., & Van der Werf, W. (2013). Assessment of crop growth and water productivity for five C3 species in semi-arid Inner Mongolia. *Agricultural Water Management*, 122, 28-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2013.02.006>.

