

# **ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LOS CULTIVOS UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8 EN EL SISTEMA DE RIEGO “EL CENIZO”, VENEZUELA**

## **ESTIMATION OF CROP EVAPOTRANSPIRATION USING LANDSAT 8 SATELLITE IMAGES FOR THE “EL CENIZO” IRRIGATION SYSTEM IN VENEZUELA**

**Ricardo Trezza<sup>1</sup>, Libert Sánchez P.<sup>1</sup> y Aixa Núñez G.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería –NURR, Universidad de Los Andes, Trujillo, Venezuela.

### **Resumen**

El objetivo de este trabajo es la estimación de la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ), a través de imágenes satelitales, para el caso particular del sistema de Riego “El Cenizo”, ubicado en la planicie del Rio Motatán-Lago de Maracaibo, en Trujillo Venezuela. En la investigación se utilizó una imagen satelital LANDSAT 8, plataforma puesta en órbita en febrero del 2013, con el fin de obtener el índice de vegetación NDVI, el cual es un indicativo del estado de desarrollo de la vegetación y que permite la estimación de los coeficientes del cultivo ( $K_c$ ). Posteriormente, utilizando información puntual de una estación meteorológica de la zona, específicamente de estaciones climáticas adyacentes al área de estudio, se determinó la evapotranspiración de los cultivos, siguiendo la metodología del coeficiente del cultivo de la FAO-56. La aplicación de la metodología permitió elaborar un mapa de evapotranspiración de los cultivos a una resolución espacial de 30 m. Con esta información de evapotranspiración se puede determinar las necesidades de riego de los cultivos y facilitar el manejo del embalse de “Agua Viva”.

**Palabras clave:** teledetección, coeficiente del cultivo, NDVI, vegetación.

### **Abstract**

The objective of this work is the estimation of crop evapotranspiration ( $ET_c$ ) using satellite images on the “El Cenizo” irrigation system, Trujillo state, Venezuela. A Landsat 8 image, platform launched in February 2013, was used in this study in order to obtain the normalized differences vegetation index (NDVI), which is taken as an indicator of the status of the vegetation and allows the estimation of the crop coefficient ( $K_c$ ). Then, using weather data, specifically climatic stations adjacent to the study area, the crop evapotranspiration was calculated using the FAO-56 crop coefficient methodology. A 30 m spatial resolution map of crop evapotranspiration was produced as a result. Irrigation water requirements can be calculated from this information of evapotranspiration, which facilitates the operation of the “Agua Viva” reservoir.

**Keywords:** remote sensing, crop coefficient, NDVI, vegetation.

**Recibido: 15/08/2014 - Aprobado: 20/03/2015**

## Introducción

En la sub-región planicie aluvial del río Motatán se encuentra uno de los mayores potenciales agropecuarios del estado Trujillo, caracterizado por la producción de carne y leche, con grandes extensiones de suelos de excelente calidad. En esta zona se encuentra igualmente una de las más importantes infraestructuras de riego por gravedad del país, como es el sistema de riego “El Cenizo” con capacidad para regar 40.000 hectáreas, utilizando las aguas del río Motatán, represadas en el embalse de Agua Viva (Corpoandes, 2013).

Para estimar las demandas de agua con fines de planificación de riego de los cultivos, la publicación de la FAO-56 (Allen y col., 2006) presenta el enfoque del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ), donde la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) es obtenida como el producto de  $K_c$  y la  $ET_0$ , siendo la  $ET_0$  la evapotranspiración de referencia calculada con datos registrados en estaciones meteorológicas cercanas al área de interés. El problema de esta metodología estriba en que el valor de  $K_c$  varía con el tipo de cultivo y estado de desarrollo del mismo, por lo que es altamente variable en tiempo y en espacio. Esta alta variabilidad espacial y temporal solo puede ser caracterizada a través del uso de imágenes satelitales, las cuales contienen información espacial relacionada con el estado de desarrollo de la vegetación, correspondiente al momento de la obtención de la mismas.

El uso de las imágenes de satélite se ha extendido de manera importante en la agricultura, permitiendo la determinación de las demandas de agua de los cultivos en áreas de gran extensión, que presentan variabilidad en el uso de la tierra, venciendo las limitaciones de la información puntual de las estaciones meteorológicas. Trabajos

publicados por Singh e Irmak (2008) han demostrado la posibilidad de obtener  $K_c$  a partir del denominado Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI, por sus siglas en inglés), que se calcula utilizando los valores de reflectancia espectral de la cubierta vegetal en las bandas satelitales del rojo e infrarrojo cercano. En este sentido, Calera y col., (2005) describe una metodología para la estimación de  $K_c$  a partir de NDVI para ser utilizada en servicios para regantes en Europa. Bos y col., (2008) presenta una relación entre  $K_c$  y NDVI que permite la estimación del coeficiente del cultivo a partir de imágenes satelitales. Mientras que los modelos basados en NDVI permiten estimar la  $ET_c$  en cultivos sin limitaciones hídricas, otros modelos utilizan el balance de energía (Allen y col.; Trezza, 2006) para calcular la evapotranspiración real (ET) y así obtener coeficientes de cultivo que reflejen el impacto del estrés hídrico y otros factores influyentes en la evapotranspiración. Es por ello que se recomienda el uso de modelos basados en el balance de energía cuando se desee cuantificar ET como dato de entrada en modelos de simulación de acuíferos o para resolver conflictos derivados en las limitaciones del recurso hídrico. Para actividades de planificación agrícola general o calendarios de riego, el uso de metodologías basadas en NDVI tienen la ventaja de su alta operatividad y simplicidad, obteniendo buenas estimaciones de ET para estas actividades (Calera y col., 2005).

En este trabajo se adaptó una metodología para estimar el coeficiente de cultivo a partir de índices de vegetación obtenidos de imágenes del nuevo satélite Landsat 8. Posteriormente, se calcula la  $ET_0$  utilizando información meteorológica de la zona y finalmente se obtienen los valores de  $ET_c$  siguiendo la metodología de la FAO-56. Los valores de  $ET_c$  representan la demanda

potencial de los cultivos y permitirían realizar el manejo del riego en la zona de estudio. Para ser útiles a los usuarios del sistema de riego, los valores de  $ET_c$  deberán ser convertidos a volumen o tiempo de riego, tomando en cuenta la eficiencia de riego y el área efectiva a regar.

La metodología planteada en este trabajo puede ser aplicada a otras plataformas que cuenten con las bandas espectrales que permitan el cálculo del NDVI. En Venezuela, Roa (2012) discute sobre la disponibilidad de imágenes del satélite Miranda para la planicie Motatán-Lago de Maracaibo, con una resolución espacial de 10 metros, las cuales son adecuadas para la estimación de la evapotranspiración y consecuentemente, el manejo de agua en el sistema de riego “El Cenizo”.

## **Materiales y métodos**

### **Características del área de estudio**

El sistema de riego El Cenizo se ubica políticamente en la República Bolivariana de Venezuela, estado Trujillo, en la jurisdicción del municipio Miranda. Geográficamente se localiza en la cuenca del río Motatán entre las coordenadas geográficas  $9^{\circ}31'17''$  y  $9^{\circ}32'57''$  de Latitud Norte y  $70^{\circ}42'06''$  y  $70^{\circ}43'49''$  de Longitud Oeste. Los cultivos predominantes en el sistema de riego son los pastos y la caña de azúcar y, en menor porcentaje, hortalizas, patilla, bananos, plátanos y frutales. El tipo de riego predominante es por gravedad, aunque también existen aéreas regadas por aspersión y goteo.

Los suelos son recientemente formados por acumulación de material aluvial transportado por acción del río Motatán, suelos planos con pendientes menores del 3%, que permiten explotaciones agrícolas y ganaderas tecnificadas. Entre las series de suelos que se encuentran, la mayoría se

caracterizan por presentar arcillas y limos como texturas predominantes, condición que origina la dificultad del drenaje, y su alta capacidad de compactación (Corpoandes, 2013).

De acuerdo a los registros pluviométricos de la estación El Cenizo – Campamento Vivian, la precipitación media anual para el período 1986 – 2005 es de 1021,5 mm y se caracteriza por una estación de lluvias con régimen bimodal, con dos periodos lluviosos y una estación seca definida de Diciembre a Marzo, siendo octubre el mes más lluvioso con un promedio anual de 176,7 mm, y el mes de enero, el mes más seco con un promedio anual de 42,7 mm. (Corpoandes, 2013).

### **Datos satelitales**

Una imagen Landsat 8, corredor (path) 6, fila (row) 53 fué utilizada en el presente estudio con el objeto de obtener los valores de NDVI,  $K_c$  y  $ET_c$ . El satélite Landsat 8 fue puesto en órbita el 11 de febrero del 2013, por lo que sus imágenes son disponibles solamente para 2013 y 2014. Se seleccionó una imagen correspondiente al 19 de enero de 2014, debido a la poca nubosidad presente en la misma. En la Figura 1 se presenta una porción de la imagen mencionada.

### **Descripción de las imágenes del satélite Landsat 8**

El satélite Landsat 8 transporta dos sensores principales:

a) OLI (Operational Land Imager). Es el mapeador operacional de superficies. Este sensor produce información en un total de 9 bandas. La resolución espacial (tamaño del pixel) es de 30 metros en todas sus bandas, exceptuando la pancromática que es de 15 metros.

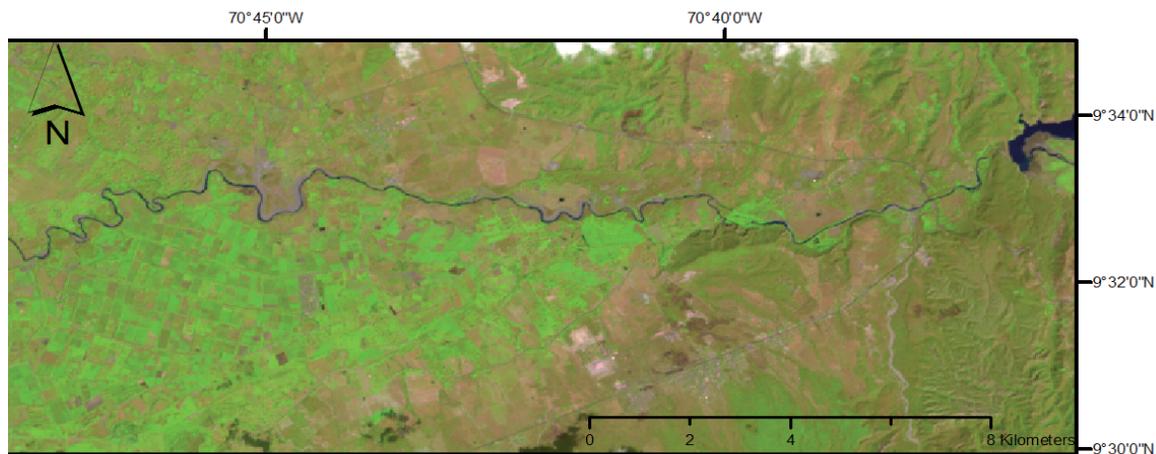


Figura 1. Composición en falso color (bandas 6,5,4) de la imagen Landsat 8 correspondiente al 19/1/2014, path 6, row 53. La imagen permite ver el embalse agua viva (arriba, a la derecha) y parte del sistema de riego “El Cenizo”.

Tabla 1. Características del satélite Landsat 8.

Sensor	Bandas	Longitud de Onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolución Espacial (m)	Observación
<b>OLI</b>	1	0,43-0,45	30	Detección de aerosoles en la atmósfera
	2	0,45-0,51	30	Banda Azul
	3	0,53-0,59	30	Banda Verde
	4	0,64-0,67	30	Banda Roja
	5	0,85-0,88	30	Infrarrojo Cercano
	6	1,57-1,65	30	Infrarrojo de onda corta 1
	7	2,11-2,29	30	Infrarrojo de onda corta 2
	8	0,50-0,68	15	Banda pancromática
	9	1,36-1,38	30	Detección de nubes tipo cirrus
<b>TIRS</b>	10	10,60-11,19	100	Banda Térmica 1
	11	11,50-12,51	100	Banda Térmica 2

b) TIRS (Thermal infrared sensor). Este sensor posee dos bandas térmicas, que permiten la estimación de la temperatura de las superficies de la tierra. La resolución espacial es de 100 metros.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de la información producida en la plataforma Landsat 8. La banda 1 es utilizada para hacer correcciones atmosféricas, ya que es sensible a la presencia de aerosoles en el aire. Las bandas 2 al 7 corresponden a radiación de onda corta y son las utilizadas para

visualización de superficies, clasificaciones de uso de la tierra y determinación de índices de vegetación. La banda 8 (pancromática) tiene una mejor resolución espacial (tamaño del pixel = 15 m), con el fin de poder visualizar detalles más pequeños. La banda 9 es para detectar nubes tipo “cirrus”. Las bandas 10 y 11 son bandas térmicas que permiten estimar la temperatura superficial. Más detalles de la plataforma Landsat 8 pueden ser obtenidos de Roy y col., (2014).

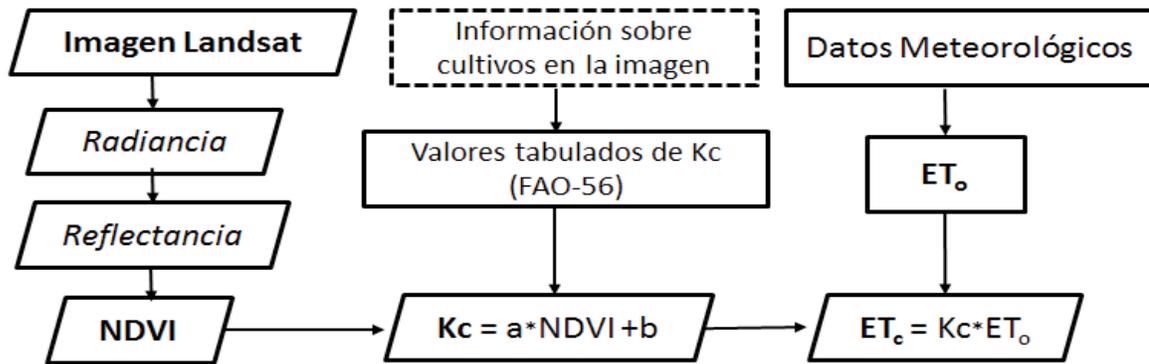


Figura 2. Esquema general de la metodología utilizada en el trabajo. En la Figura los rombos representan imágenes en formato ráster. Los rectángulos con líneas solidas representan información puntual, calculada o tabulada. El rectángulo con líneas puntuadas representa información que puede ser presentada en varios formatos, según su disponibilidad.

Tabla 2. Información del archivo metadata para el 19/1/2014

Variable	Valor
Lmax para las bandas 4 y 5	624,7018; 382,286
Lmin para las bandas 4 y 5	-51,588; -31,569
Qcmax ; Qcmin	65535; 1,0
Elevación solar ( $\beta$ )	49,14 grados
Rm	0,00002
Rad	-0,1

### Descripción de la metodología utilizada

En la Figura 2 se presenta el esquema general de la metodología utilizada en el presente trabajo. Partiendo de la imagen Landsat se realiza secuencialmente el cálculo de radiancia, reflectancia y el NDVI. La imagen Landsat 8, path 6, row 53, correspondiente al 19 de enero de 2014 fue obtenida del sitio GLOVIS del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2014). Una vez obtenida la imagen, se procedió a extraer la información contenida en su archivo metadata, la cual es presentada en la Tabla 2.

Conociendo los cultivos presentes en la zona, preferiblemente a través de un mapa de uso de la tierra, un mapa de clasificación de cultivos o, en ausencia de

los mismos, información general sobre el tipo de cultivo predominante en la zona, se procede a ubicar los valores correspondientes del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) en las tablas de la publicación FAO-56 (Allen y col., 2006). Se establece posteriormente una ecuación lineal entre los valores de NDVI y los valores de  $K_c$  que permite producir una imagen de  $K_c$ . Por otra parte, con datos obtenidos de una estación meteorológica con influencia en el área de interés, se calcula el valor de la evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_0$ ), preferiblemente utilizando alguna de las ecuaciones presentadas en la publicación de la FAO-56 (Allen y col., 2006). Finalmente, se obtiene una imagen con valores de evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) al multiplicar los valores de NDVI y la  $ET_0$ , según el enfoque del coeficiente del cultivo de la FAO-56.

Para calcular el NDVI se utiliza la siguiente ecuación: (1)

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_{Rojo}}{\rho_{IRC} + \rho_{Rojo}}$$

Donde:

NDVI = índice de vegetación de diferencias normalizadas.

$\rho_{IRC}$  = reflectancia en la banda del infrarrojo cercano.

$\rho_{Rojo}$  = reflectancia correspondiente a la banda roja.

En el caso de la plataforma Landsat 8, el valor de NDVI se calcula como: (2)

$$NDVI = \frac{\rho_5 - \rho_4}{\rho_5 + \rho_4}$$

Donde:

$\rho_5$  = reflectancia en la banda 5 (que corresponde a la región espectral del infrarrojo cercano en Landsat 8)

$\rho_4$  = reflectancia en la banda 4 (que corresponde a la región espectral del rojo en Landsat 8).

Los valores de reflectancia para las bandas 4 y 5 ( $\rho_4$  y  $\rho_5$ ), a nivel de satélite, se calculan como: (3)

$$\rho_b = \frac{\pi * L_b}{ESUN_b * \cos \theta * dr}$$

Donde:

b = número de banda (b=4 para la banda 4 y b=5 para la banda 5).

$\rho_b$  = reflectancia para la banda "b".

$L_b$  = valor de radiancia correspondiente en la banda "b"

$ESUN_b$  = valor de la constante solar correspondiente a la banda "b"

dr = distancia relativa inversa entre la

tierra y el sol,  $\theta$  = ángulo solar con respecto a una línea vertical sobre la superficie.

Los valores de radiancia para las bandas 4 y 5 ( $L_4$  y  $L_5$ ),  $L_b$  se calculan como: (4)

$$L_b = \left( \frac{L_{max} - L_{min}}{Q_{cmax} - Q_{cmin}} \right) * (DN - Q_{cmin}) + L_{min}$$

Donde:

$L_b$  = radiancia en  $W/m^2/sr/\mu m$ ;

$L_{max}$ ,  $L_{min}$ ,  $Q_{cmax}$  y  $Q_{cmin}$  = parámetros "metadata" que acompaña la imagen satelital.

DN = número digital de cada pixel en la imagen.

La distancia relativa entre la tierra y el sol (dr) es calculada con la ecuación 5: (5)

$$dr = 1 + 0,033 * \cos \left( \frac{DOY * 2\pi}{365} \right)$$

Donde

dr = distancia relativa entre la tierra y el sol.

DOY = día juliano del año (enero 1 representa DOY=1 y diciembre 31 representa DOY=365).

Para hallar el valor del ángulo del sol con la normal a la superficie ( $\theta$ ), a utilizarse en la ecuación (2) podemos usar el ángulo de elevación solar ( $\beta$ ), disponible en el archivo metadata que viene con la imagen, entonces: (6)

$$\cos \theta = \cos \left( \frac{\pi}{180} * (90 - \beta) \right)$$

Donde:

$\beta$  = ángulo de elevación solar, en grados.

Una alternativa para hallar los valores de reflectancia para efectos del cálculo de NDVI, es utilizar la ecuación siguiente: (7)

$$\rho_b = R_m * DN + Rad$$

Donde:

$R_m$  = coeficiente multiplicador para la obtención de la reflectancia.

$Rad$  = coeficiente aditivo.

Ambos coeficientes se encuentran en el archivo metadata. Es de hacer notar que esta reflectancia obtenida con la ecuación 7 no considera el ángulo solar ( $\theta$ ), pero puede utilizarse para el cálculo de NDVI debido a la normalización de los valores de reflectancia en su numerador y denominador.

Una vez obtenido el valor de NDVI, podemos estimar el valor del coeficiente de cultivo  $K_c$ , utilizando la siguiente ecuación: (8)

$$K_c = a * NDVI + b$$

Siendo  $a$  y  $b$  definidos a partir de los valores tabulados de  $K_c$  de FAO-56 (Allen y col., 2006) para los cultivos predominantes en el área de estudio: (9)

$$a = \frac{K_{c_{med}} - K_{c_{ini}}}{NDVI_{med} - NDVI_{ini}}$$

(10)

$$b = K_{c_{med}} - a * NDVI_{med}$$

Donde:

$K_{c_{med}}$  y  $K_{c_{ini}}$  = valores de  $K_c$  correspondiente a la fase de mediados de temporada y la fase inicial de desarrollo del cultivo, respectivamente (Allen y col., 2006).

$NDVI_{med}$  y  $NDVI_{ini}$  = valores de NDVI para las mismas fases.

El valor de  $NDVI_{med}$  corresponde al valor de NDVI cuando el cultivo alcanza completa cobertura, el cual es asumido como  $NDVI_{med} = 0,8$ . Por su parte, el valor

de  $NDVI_{ini}$  corresponde a la fase inicial de desarrollo, cuando el cultivo es joven y empieza a cubrir el suelo, correspondiente a un valor de  $NDVI_{ini} = 0,25$ .

De no contarse con información de cultivos y para efectos de manejo de riego, se puede obtener una aproximación, utilizando la siguiente ecuación (Bos y col., 2008 y Calera y col., 2005): (11)

$$K_c = 1,25 * NDVI + 0,2$$

Finalmente el valor de la  $ET_c$  es calculado como: (12)

$$ET_c = K_c * ET_o$$

La metodología descrita se puede implementar en cualquier software que permita el procesamiento de imágenes en formato RASTER, tal como ArcGis®, Idrisi®, ERDAS®, entre otros.

Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) y debido a que sólo se contaba con valores de temperatura del aire, se utilizó la ecuación de Hargreaves, citada en la publicación FAO-56 (Allen *et al.*, 2006): (13)

$$ET_o = 0,0023 * Ra(T_{max} - T_{min})^{0,5}(T + 17,8)$$

Donde

$Ra$  = radiación extraterrestre, en milímetros por día disponible en las tablas de FAO-56.

$T_{max}$  y  $T_{min}$  = temperatura máxima y mínima respectivamente, en grados centígrados

$T$  = promedio entre la temperatura máxima y mínima, en grados centígrados.

## Resultados y discusión

Los resultados obtenidos se describen a continuación:

a) Cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia:

El valor de la  $ET_0$  fue calculado a través de la ecuación (13) de Hargreaves, utilizando valores de temperatura máxima y temperatura mínima reportados por la estación Mene Grande, resultando en  $ET_0 = 5,7$  mm/d para el día de generación de la imagen; este valor se encuentra en los rangos esperados para zonas de alta humedad, alta temperatura del aire y presencia de nubosidad, condiciones que resultan en valores medios de evapotranspiración de referencia.

b) Procesamiento de la imagen y obtención de los mapas de NDVI,  $K_c$  y  $ET_c$ :

Posteriormente se implementaron las ecuaciones 1 al 6, elaborando un programa de computación utilizando la herramienta "Model Maker" del software ERDAS-Imagine 2014 (Intergraph,2014). El valor del NDVI fue obtenido a través de la Ecuación 2. En la Figura 3 podemos observar el mapa de NDVI donde las superficies más claras corresponden a áreas con mayor vegetación y las superficies oscuras a áreas con escasa

vegetación. En el embalse de Agua Viva el valor de NDVI resultó negativo, lo cual es característico de cuerpos de agua.

Para la definición de la ecuación (8), se consideró la predominancia de pastos en el área de estudio, por lo que fueron asumidos los siguientes valores de coeficiente de cultivo:  $K_{c_{ini}} = 0,40$ ;  $K_{c_{ini}} = 1,15$ , extraídos de la Tabla 12 de la publicación FAO-56. Considerando además  $NDVI_{med} = 0,8$  y  $NDVI_{ini} = 0,25$  y utilizando las ecuaciones (9), (10) y finalmente (8) se obtuvo la siguiente ecuación: (12)

$$K_c = 1,25 * NDVI + 0,15$$

Es importante notar que en el presente estudio no se contaba con un mapa de cultivos que permitiera ubicar exactamente los cultivos en cada parcela. De ser disponible esta información, es posible desarrollar una ecuación de  $K_c$  versus NDVI específica para cada cultivo, lo que permitiría obtener posteriormente un mapa de  $K_c$  más detallado y ajustado a la realidad.

Como último paso se multiplicaron los valores de  $K_c$  y la  $ET_0$ , produciendo el mapa de evapotranspiración del cultivo, con una resolución espacial de 30 m x 30 m

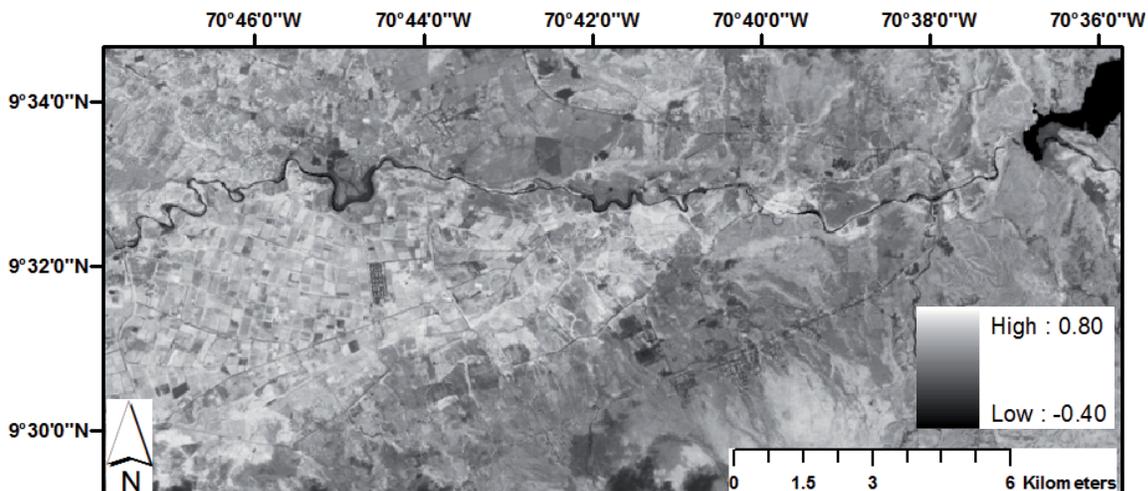


Figura 3. Mapa de NDVI correspondiente al 19/01/2014. Valores altos de NDVI (colores claros) representan mayor vegetación. El cuerpo oscuro en la derecha (NDVI negativo) es la represa de agua viva

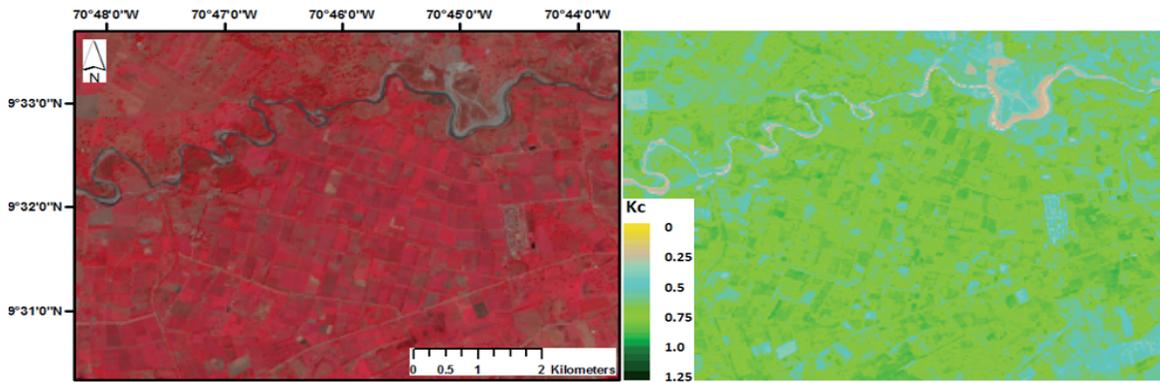


Figura 4. Izquierda: Imagen Landsat 8 en falso color (combinación 5,4,3 donde la vegetación se observa en rojo) correspondiente al 19/01/2014 de parte del Sistema de Riego “El Cenizo”. Derecha: Mapa de coeficiente del cultivo (Kc) correspondiente.

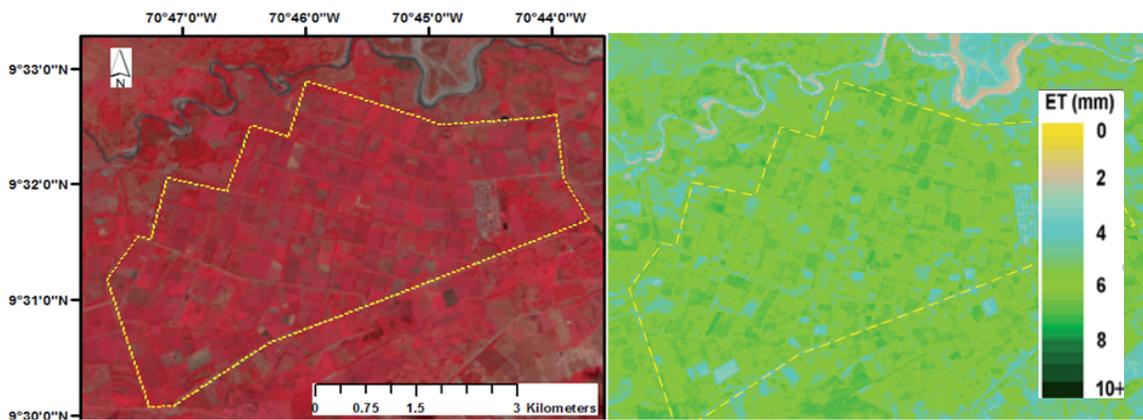


Figura 5. Izquierda: Imagen Landsat 8 en falso color, correspondiente al 19/01/2014 de parte del Sistema de Riego “El Cenizo”. Derecha: Mapa de evapotranspiración correspondiente. El polígono mostrado en líneas amarillas demarca el área de interés para el cálculo de los valores presentados en la Tabla 3.

(tamaño de pixel de 900 m<sup>2</sup>). En la Figura 4 se presenta el mapa de Kc correspondiente a 19/1/2014, para una porción del sistema de riego “El Cenizo”. El centro de la imagen se encuentra a un latitud aproximada de 9°31'50.31" N y 70°46'25.96" O.

Recordemos que se pueden convertir los valores de evapotranspiración, expresados en milímetros por día en el mapa, a volúmenes de agua netos consumidos por los cultivos. En general, 1mm/día = 1 litro/m<sup>2</sup> de superficie, es decir que conociendo el área de la parcela y la ET<sub>c</sub> de la misma se puede obtener el volumen de agua neto consumido por el cultivo. Esta agua consumida debe ser incorporada

nuevamente al suelo, a través del riego o lluvia. Una vez conocidos los volúmenes netos se pueden estimar los volúmenes reales o brutos de agua al considerar las pérdidas de agua que se producen en el sistema de riego, ya sea en la conducción de agua en los canales o en la aplicación del agua a nivel de parcela. Estos volúmenes brutos de riego deberán ser extraídos del embalse e incorporados a los canales de riego del sistema.

La Figura 5 presenta una porción del sistema de riego “El Cenizo” (demarcada por el área de interés mostrada con líneas discontinuas) y el mapa de ET<sub>c</sub>

Tabla 3. Cálculos del volumen neto de agua para riego para el área de interés mostrada en la Figura 5

Variable	Valor
Numero de Píxeles	21471
Área por pixel	900 m <sup>2</sup>
Área Total	1932,4 ha
Kc promedio	0,888
ET <sub>c</sub> promedio	4,97 mm/d
Volumen neto de agua requerido por los cultivos	96039,8 m <sup>3</sup>

correspondiente, donde a manera de ejemplo se realizaron los cálculos promedios presentados en la Tabla 3. El área total de la zona mostrada en la figura 5 es de 1932,4 ha, con una ET<sub>c</sub> promedio de 4,97 mm/día. El volumen total neto de agua consumida se obtiene al multiplicar la ET<sub>c</sub> por el área (Volumen neto = ET<sub>c</sub> \* Área), resultando un volumen neto de 96039,8 metros cúbicos. Este volumen neto se debe dividir por la eficiencia general del sistema de riego para obtener el volumen bruto de agua a extraer en el embalse.

### Conclusiones

En este trabajo se aplicó una metodología que aprovecha la similitud entre las curvas de NDVI y Kc a lo largo del ciclo vegetativo de los cultivos. La metodología permitió la elaboración de un mapa del coeficiente del cultivo, en formato raster y a 30 metros de resolución, a partir de los valores de NDVI calculados con las bandas reflectivas 4 y 5 del satélite Landsat 8. Este mapa de Kc permitió la elaboración posterior de un mapa de valores de ET<sub>c</sub>, en milímetros, para el sistema del riego “El Cenizo”, correspondiente al día de toma de la imagen, o sea el 19/1/2014. Esta información es de utilidad para la toma de decisiones sobre el manejo del agua proveniente del embalse de Agua Viva, debido a que los valores netos obtenidos pueden ser transformados

a caudales a derivar para el momento del riego, conociendo la eficiencia general de conducción y aplicación del agua en el sistema de riego.

Es importante recalcar que el procedimiento seguido en este trabajo está basado esencialmente en la metodología de la FAO-56 para la estimación de la evapotranspiración, basada en el conocimiento del coeficiente del cultivo. Esta metodología es ampliamente utilizada en el manejo de agua para uso agrícola y se utiliza principalmente a nivel parcelario. Cuando se trata de la estimación de evapotranspiración en áreas grandes, donde existe gran variabilidad de cultivos y etapas de desarrollo de los mismos, entonces se debe recurrir a imágenes satelitales para poder caracterizar esta variabilidad en el uso de la tierra, la cual se traduce en distintos valores de Kc. La metodología fue aplicada para una sola imagen Landsat, lo que representa solamente un punto en la curva del coeficiente del cultivo. Si se quieren conocer las demandas totales de agua durante todo el ciclo vegetativo del cultivo, entonces es necesario procesar varias imágenes a lo largo del mismo y construir la curva de Kc por interpolación en los días restantes.

La metodología aquí presentada puede ser aplicada en otras plataformas que tengan bandas espectrales ubicadas en la región del

rojo e infrarrojo cercano. En nuestro país, el satélite Miranda (VRSS-1) posee estas bandas, lo que permitiría su uso para la estimación de las demandas de agua de los cultivos.

### Agradecimiento

Los autores agradecen al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico, Tecnológico y de las Artes de la Universidad de Los Andes (CDCHTA-ULA), por el financiamiento otorgado a la investigación, a través del Proyecto código NURR-C-566-13-01-B. También se agradecen las útiles correcciones y sugerencias realizadas por los árbitros del presente artículo.

### Literatura citada

- Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M. Evapotranspiración del cultivo. Publicación de la FAO #56, serie de riego y drenaje. 2006. Roma, Italia: FAO.
- Allen R, Irmak A, Trezza R, Hendrickx J, Bastiaanssen W, Kjaersgard J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological Processes*. 2011. V2 (25): 4011-4027.
- Bos M, Kselik R, Allen R, Molden D. *Water requirements for irrigation and the environment*. Netherlands: Springer. 2008, 174 p.
- Calera A, Jochum A, Cuesta A, Montoro A, Lopez, P. Irrigation management from space: towards user-friendly products. *Irrigation and Drainage Systems*. Springer. 2005. V1 (19): 337-353.
- CORPOANDES. Características y potencialidades Sistema de Riego "El Cenizo". 2013. Consultado en febrero 01 2013. Disponible en: <http://www.corpoandes.gov.ve/?q=node/246>.
- INTERGRAPH. Software ERDAS-Imagine 2014. 2014. Consultado en enero 01 2015. Disponible en: [http://www.geosystems.de/2014/ERDAS\\_IMAGINE\\_Whats-New\\_2014.pdf](http://www.geosystems.de/2014/ERDAS_IMAGINE_Whats-New_2014.pdf).
- ROA J. Primeras imágenes del satélite Miranda develan un Trujillo dinámico. Sala de Geografía del NURR. Universidad de los Andes, Trujillo. 2012. Consultado en enero 01 2015. Disponible en: <http://www.nurr.ula.ve/saladegeografia/index.html>.
- Roy D, Wulder M, Loveland T, Allen R, Anderson M, Irons J, Kennedy R, Johnson R, Shai Y, Trezza R, Vogelmann J, Wynne R, Y Zhu Z. Landsat-8: science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of the Environment*. 2014. V5 (145): 154-172.
- Trezza R. Evapotranspiration from a remote sensing model for water management in an irrigation system in Venezuela. *Interciencia*. 2006. V31 (6): 417-423.
- Singh R, Irmak A. 2008. Estimation of crop coefficients using satellite remote sensing. *Journal of Irrigation and Drainage* V135 (5): 597-608.
- USGS (United States Geological Service). GLOVIS: The USGS Visualization Viewer. 2014. Consultado en abril 01 2014. Disponible en: <http://glovis.usgs.gov/>.