



## Utilización de sensores remotos en la estimación del volumen de agua requerido para el riego de *Estevia Rebaudiana* (*Eupatorium Rebaudianum*)

### Use of Remote Sensing in the Estimation of Water Volume Required for Irrigation of *Stevia Rebaudiana* (*Eupatorium Rebaudianum*)

Diana Sofía Blackburn Cuero<sup>1</sup>, Francisco Luis Hernández Torres<sup>2</sup>

**Para citar este artículo:** Blackburn, D. y Hernández, F. (2016). Utilización de sensores remotos en la estimación del volumen de agua requerido para el riego de *Estevia Rebaudiana* (*Eupatorium Rebaudianum*). *Revista de Topografía Azimut*, (7), 22-28.

**Recibido:** 10-septiembre-2016 / **Aceptado:** 10-octubre-2016

#### Resumen

Con el objetivo de estimar el volumen de agua requerido para el riego del cultivo de *Estevia Rebaudiana* se evaluaron tres factores principales: el clima, el tipo de cultivo y la etapa de crecimiento. Para cada uno de estos factores se obtuvo información adquirida a partir de sensores remotos y datos agrometeorológicos. Se estimó la evapotranspiración del cultivo (ETc) para determinar inicialmente la demanda evapotranspirativa a partir de la metodología propuesta por la FAO-56, en la que interviene el coeficiente del cultivo (Kc). Se generó el modelo predictivo del Kc de la *Estevia* a partir del índice de vegetación NDVI; las necesidades hídricas de riego fueron obtenidas restando a la ETc la precipitación efectiva. Los resultados ratifican que el comportamiento de la superficie cultivada no es homogéneo y, por lo tanto, es necesario reconocer las variaciones espaciales en cada unidad de área como mecanismo para detectar anomalías en el manejo agronómico o en los elementos que conforman el sistema suelo-planta-atmósfera-topografía. El volumen de agua requerido para el cultivo de *Estevia Rebaudiana* varía de acuerdo a las tres etapas de crecimiento identificadas, entre las que la etapa final se constituye como la de mayor consumo de agua.

**Palabras clave:** coeficiente del cultivo, *Estevia*, evapotranspiración, necesidades hídricas, sensores remotos.

#### Abstract

In order to estimate the required volume of water for irrigating the crop of *Stevia Rebaudiana*, three main factors have been evaluated: the weather, the type of crop and the period of growth. For each one of these factors, the information was obtained from remote sensing and agrometeorological data. Crop evapotranspiration (ETc) was estimated to initially determine the evapotranspirative demand based on the methodology proposed by the FAO-56, in which the crop coefficient (Kc) intervenes. A predictive model of *Stevia's* Kc was generated from the NDVI vegetation index. Water requirements for irrigation were obtained by subtracting the effective precipitation from the ETc. The results confirmed that the behavior of the cultivated area is not homogeneous and it is therefore necessary to recognize the spatial variations on each area unit as a mechanism to detect anomalies either in the agronomical management or in the elements that make up the Soil-Plant-Atmosphere-Topography system. The required water volume for the *Stevia*

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Percepción Remota, Universidad del Valle. Correo electrónico: blackburnsofia@gmail.com

<sup>2</sup> Grupo de Investigación en Percepción Remota, Universidad del Valle. Correo electrónico: flhernand@gmail.comhotmail.com

rebaudiana crop varies in accordance with the three identified growth periods, in which the final one is considered the most water-consuming period.

**Keywords:** crop coefficient, evapotranspiration, remote sensing, stevia, water requirements.

## INTRODUCCIÓN

Bergkamp and Sadoff, (2008) señalan que más del 70% del agua a nivel mundial se emplea en la agricultura para la producción de alimentos y fibras a fin de garantizar la seguridad alimentaria; D'Urso, *et al.* (2010) mencionan que se requiere un manejo controlado y eficiente del riego en la agricultura. Por su parte Dugo, *et al.* (2010) resalta de una manera precisa que la gestión del riego, en el marco de un uso sostenible del agua, requiere una minuciosa comprensión de los flujos de agua que se producen en el sistema suelo-planta-atmósfera. Rivas and Caselles (2003), reconocen que el conocimiento de la evapotranspiración (ET) con un nivel suficiente de precisión es fundamental, entre muchos otros, en estudios hidrológicos, climáticos, agronómicos y ecológicos.

Uno de los métodos más sólidos para estimar la ET es la ecuación del balance de energía, que describe la distribución de la radiación neta recibida por la superficie terrestre en diferentes procesos. Esta ecuación deriva el denominado método residual que desde Choudhury (1994) se constituye en una de las aproximaciones más utilizadas en la determinación de ET instantánea y diaria. Más recientemente Allen, *et al.* (2007) planteó el método de Mapeo de la Evapotranspiración con Calibración Interna (METRIC, por sus siglas en inglés).

Según Allen, *et al.* (2007), las necesidades de agua de un cultivo se definen como la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del mismo, por lo tanto, es

indispensable el conocimiento de la evapotranspiración del cultivo. Er-Raki, *et al.* (2007, 2013) y Ojeda, *et al.* (2012), han aplicado el modelo de la FAO para estimar la evapotranspiración del cultivo y lo reconocen como una línea metodológica adecuada para aplicar en superficies menores de 1000 ha, siempre y cuando la caracterización del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) sea rigurosa.

El coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) integra las características que distinguen a un cultivo de otro y representa un factor que varía para cada cultivo según la etapa de desarrollo en que se encuentren. Bastiaanssen *et al.* (2000), han demostrado que a través de la teledetección y el principio de reflectividad espectral se puede proporcionar una estimación indirecta del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ). La estimación de  $K_c$ , a partir de mediciones espectrales, se hace posible porque los índices de vegetación y el  $K_c$  son referidos tanto a la hoja como a la fracción de área cubierta del suelo (Jackson and Huete, 1991).

El objetivo principal de este estudio es estimar el volumen de agua necesario para el riego del cultivo de Stevia Rebaudiana adoptando información adquirida principalmente a partir de sensores remotos y datos agrometeorológicos. Se estimó la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) para determinar inicialmente la demanda evapotranspirativa a partir de la metodología propuesta por la FAO-56, en la cual interviene el coeficiente del cultivo que se obtuvo a partir de un análisis estadístico de regresión lineal múltiple, lo que permitió generar el modelo predictivo del  $K_c$  de la Stevia a partir del índice de vegetación NDVI. Las necesidades hídricas de riego fueron obtenidas restando la precipitación efectiva ( $P_e$ ) de la  $ET_c$ .

## METODOLOGÍA

El área de estudio se encuentra ubicada dentro de la Provincia de Santa Elena, Ecuador, con coordenadas al centro Longitud: 80°32'5.21" W, Latitud: 2°13'48.48" S, recubriendo alrededor de 250 ha, en la Hacienda Adolfo Estpensa. Se utilizaron dos imágenes del sensor WorldView-2 obtenidas a través del concurso Desafío Geoespacial DigitalGlobe (ERDAS IMAGINE 2012). Las dos escenas de la zona de estudio tienen un nivel de procesamiento estándar básico, con valores en radiancia relativas y georreferenciadas al sistema de referencia WGS84 con proyección UTM zona 17S. Se utilizó la herramienta New\_LocClim de la FAO, la base de datos agroclimáticos FAOCLIM y los datos de precipitación de la estación Santa Elena de la Red Meteorológica del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador INAMHI, para determinar la evapotranspiración de referencia, la precipitación efectiva y el coeficiente de eficiencia del riego. En este proyecto se utilizaron datos de evapotranspiración obtenidos por González *et al.* (2009), a través de la metodología convencional y adicionalmente se asumen promedios por etapa de crecimiento.

Se realizó un análisis de las condiciones climáticas asociadas a la zona de estudio para reconocer los patrones climáticos y el comportamiento a lo largo del tiempo. Con las observaciones realizadas a partir del climograma y los factores que afectan el clima de una región, se consideró la clasificación climática del Ecuador realizada por Pierre *et al.* (1995), lo que permitió categorizar la zona de estudio dentro del clima tropical megatérmico árido a semiárido.

Los valores de radiancia relativa se corrigieron atmosféricamente, obteniendo así valores de radiancias absolutas (L) como lo indica Updike and Comp (2010). A partir de los valores de radiancias absolutas, se realizó el cálculo de la reflectancia al tope de la atmósfera que considera la posición

del ángulo solar y la fecha de captura (Updike and Comp 2010). Se calcularon los índices de vegetación NDVI y SAVI, que posteriormente fueron utilizados para la estimación del Kc del cultivo.

## Evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>)

ET<sub>0</sub> representa la pérdida de agua de una superficie cultivada estándar (Allen *et al.*, 2007). Se aplicó el método FAO Penman-Monteith para el cálculo de la ET<sub>0</sub>.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

Donde: R<sub>n</sub>= Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>); G= Flujo del calor de suelo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>); T= Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C); u<sub>2</sub>= Velocidad del viento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>); e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub>= Déficit de presión de vapor (kPa); Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>); γ= Constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>). La superficie de referencia es un cultivo hipotético de referencia con una altura asumida de 0.12 m, una resistencia superficial fija de 70 sm<sup>-1</sup> y un albedo de 0.23.

## Coficiente del cultivo (Kc)

Kc integra las características que distinguen a un cultivo típico de campo de la superficie de referencia. Se realizó un análisis de regresión lineal múltiple bajo la técnica de "un paso atrás" para definir un modelo de predicción del coeficiente del cultivo de Estevia a partir del NDVI y SAVI, verificando la confiabilidad y la bondad del modelo. Se realizó un análisis de varianza para valorar hasta qué punto es adecuado el modelo de regresión lineal para estimar los valores de la variable dependiente. Se seleccionó el modelo que presentó un R<sup>2</sup> mayor y menor error típico. Los coeficientes de regresión se obtuvieron a partir del criterio de

mínimos cuadrados; el modelo que se obtuvo se presenta en la ecuación (2)

$$Kc = -0.374 + 2.21NDVI \quad (2)$$

### Evapotranspiración del cultivo (ETc)

ETc se refiere a la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen en áreas grandes bajo condiciones óptimas de agua en el suelo con características adecuadas tanto de manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones climáticas dadas (FAO, 2006). Considerando Kc, la evapotranspiración del cultivo ETc se calcula como:

$$ETc = ET_0 * Kc \quad (3)$$

### Precipitación efectiva (Pe)

Es la fracción de la precipitación total que es aprovechada por las plantas. La FAO recomienda el método de USDA-SC como una manera simple de estimar indirectamente este valor (Fernández, *et al.*, 2009).

Si  $P \leq 250$  mm por periodo

$$Pe = \frac{1}{125}(125 - 0.2P) \quad (4)$$

Si  $P > 250$  mm por periodo

$$Pe = (125 + 0.1P) \quad (5)$$

P corresponde a la precipitación media en mm.

La cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo se define como necesidades de agua del cultivo y corresponde a la suma de la evaporación directa de agua desde el suelo y la transpiración de las plantas.

### Necesidades Hídricas Netas (NHN)

Se obtienen mediante la diferencia de la evapotranspiración del cultivo y la precipitación efectiva de la zona de estudio, representa la cantidad de agua que el riego debe aportar al sistema radicular de un cultivo para satisfacer sus necesidades de agua. (D'Urso, *et al.*, 2010).

$$NHN = ETc - Pe \quad (6)$$

### Necesidades Hídricas Brutas (NHB)

Representa la cantidad de agua que el riego debe aportar, de forma que, tras descontar las pérdidas que se produzcan durante la aplicación del riego, el sistema radicular del cultivo reciba una cantidad igual a las necesidades hídricas netas (González, *et al.*, 2002).

$$NHB = \frac{NHN}{CER} \quad (7)$$

El coeficiente de eficiencia del riego (CER), es un factor correctivo que se aplica a las necesidades hídricas netas al considerar que todo sistema de riego produce pérdidas de agua que son inherentes a la propia práctica de riego (Hellman, 2010). Si el sistema de riego es por goteo, CER = (0.85 – 0.95). Si el sistema de riego es por aspersión, CER = (0.60 – 0.75). Se consideró lo expuesto por Alfaro (2007) y Hellman (2010), y se eligió el valor de 0.90 que corresponde a un sistema por goteo utilizado para regar el cultivo de Estevia en la zona de estudio.

### Análisis de datos

En la Tabla 1 se presenta los promedios de NDVI, Kc y ETc en cada etapa del cultivo y se confirma la existencia de variaciones temporales en el cultivo, lo que permite destacar la importancia de realizar estudios diarios para hallar los patrones de comportamiento.

**Tabla 1.** Promedios estimados de NDVI, Kc y ETc para cada etapa del cultivo

	Periodo Inicial		Periodo de Desarrollo		Periodo Final	
	1	2	1	2	1	2
NDVI	0,284	0,309	0,404	0,394	0,525	0,536
Kc	0,189	0,222	0,474	0,434	0,732	0,712
ETc	0,838	0,765	1,656	1,447	2,205	2,113

1: 30-11-2011

2: 30-01-2012

Se puede observar que la etapa final presenta un mayor ETc, lo que indica una mayor pérdida de agua; por el contrario el menor ETc se presenta en ZZ la etapa inicial.

En la Tabla 2 se observa una gran diferencia entre los valores de NHN de las dos fechas en el periodo inicial, esto se debe a que la precipitación efectiva para el 30-01-2012 fue mayor que para el 30-11-2011 y, por lo tanto, necesita menos agua de riego. En cuanto a las NHB, se observa que el cultivo se va desarrollando hasta llegar a la cosecha, época que requiere de mayor cantidad de agua para satisfacer las necesidades del cultivo, esto se cumple para las dos fechas.

Sin embargo, en las diferencias entre fecha y fecha, el clima juega un papel muy importante en la necesidad de agua del cultivo; para el día 30-01-2012 a pesar de que el cultivo se encuentra también en una ambiente caluroso y soleado, las necesidades hídricas son menores debido a que es mayor el aporte de agua natural (Precipitación Efectiva).

## RESULTADOS

Conocida las necesidades hídricas brutas de riego, se realiza la transformación de unidades de altura de agua (mm/día), a unidades de volumen por unidad de área (m<sup>3</sup>/ha/día). Se generaron imágenes de volumen a partir de las obtenidas del cálculo de NHB, se aplicó un filtro de mayoría con el fin de minimizar la corrupción de los patrones espaciales celulares; de esta manera se obtuvieron las imágenes del volumen de agua necesaria para el riego del cultivo de Estevia (Figura 1).

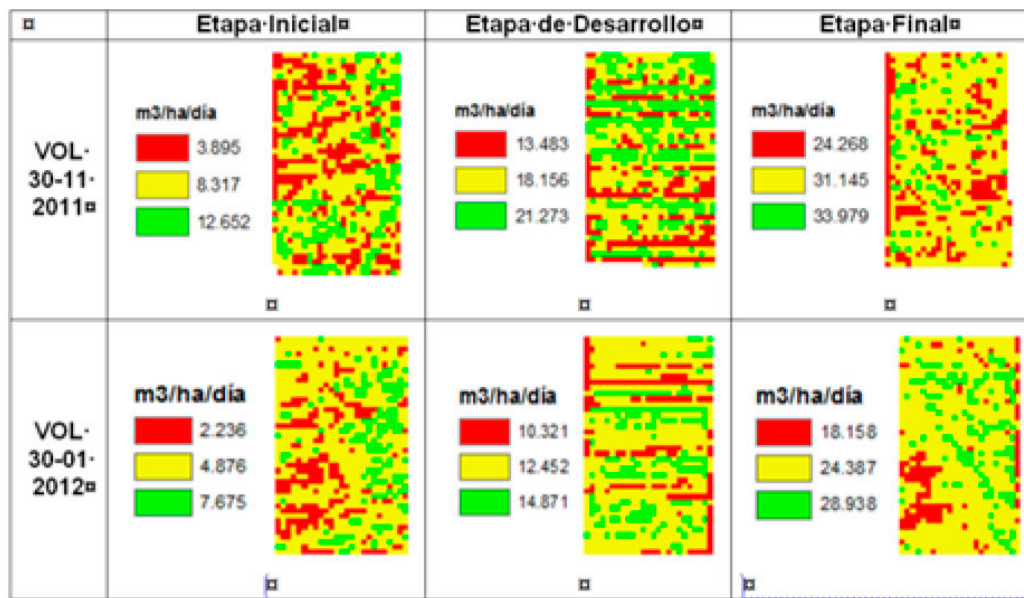
Indudablemente las variaciones espaciales y temporales se hacen presentes en la estimación del volumen de agua necesario para el riego del cultivo de Estevia; el resultado presentado en la Figura 1, aclara el carácter heterogéneo de las condiciones del cultivo. A partir de la Figura 1 se establecieron rangos que satisfacen las necesidades hídricas de riego del cultivo de Estevia, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 2.** Promedios estimados de NHN y NHB para cada etapa de crecimiento

mm/día	Periodo Inicial		Periodo de Desarrollo		Periodo Final	
	1	2	1	2	1	2
NHN	0,708	0,245	1,526	0,927	2,075	1,593
NHB	0,787	0,272	1,696	1,03	2,306	1,77

1: 30-11-2011

2: 30-01-2012



**Figura 1.** Volumen de agua requerido para el riego del cultivo de estevia por etapa de crecimiento

**Tabla 3.** Promedios estimados de NHN y NHB para cada etapa de crecimiento

	Etapa Inicial		Etapa de Desarrollo		Etapa Final	
	1	2	1	2	1	2
VOLUM. m3/ha/día	8-13	5-8	18-22	12-15	31-34	24-29

1: 30-11-2011

2: 30-01-2012

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al comparar los resultados de este estudio con los obtenidos en González, *et al.* (2002) y Fronza y Vinícius (2003), las diferencias promediadas entre cada una de las etapas del cultivo varían entre un 7%-10% y entre 17%-20% respectivamente. Estas diferencias no reflejan un error como tal ya que cada estudio fue realizado en diferentes zonas geográficas y, por lo tanto, el factor clima representado por las condiciones climáticas propias de cada zona genera esta diferencia. Aun así, las diferencias con los estudios de otros autores no superan el 20%, lo que permite inferir que con el enfoque metodológico propuesto se puede llegar a un nivel de certeza del 80%.

## CONCLUSIONES

El enfoque metodológico propuesto logra caracterizar los factores principales que influyen en la determinación del agua necesaria para un cultivo, no sólo para el cultivo de Estevia pues es válido para usarse en el análisis de cualquier cultivo, siempre y cuando se realice a detalle la interpretación de las particularidades representativas de cada uno y se definan las propiedades típicas y únicas del mismo.

Los resultados obtenidos ratifican que el comportamiento de una superficie cultivada no es homogéneo y, por lo tanto, se presentan variaciones espaciales en cada unidad de área que permiten detectar anomalías en el manejo

agronómico y en los elementos que conforman el sistema suelo-planta-atmosfera-topografía. Es importante señalar que a través de la estimación del volumen de agua requerido para el riego del cultivo de Estevia, se estableció el consumo de agua por etapa de crecimiento siendo la etapa final la que mayor agua requiere durante todo el ciclo fenológico.

## REFERENCIAS

- Alfaro, A. (2007). *Ahorro y eficiencia energética en agricultura de regadío*. España: Ministerio de Industria y Comercio e Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- Allen, R., Tasumi, M., and Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133, 380–394.
- Bastiaanssen, W., Molden, D. and Makin, I. (2000). Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*, 46, 137–155.
- Bergkamp, G. and Sadoff, C. (2008). Water in a Sustainable Economy. In *State of the World 2008: Innovations for a Sustainable Economy* (pp. 107-238). United States of America: The Worldwatch Institute.
- Choudhury, B. (1994). Synergism of multispectral satellite observations for estimating regional land surface evaporation. *Remote Sensing of Environment*, 49, 264–274.
- D'Urso, G., Richter, K., Calera, A., Osann, M.A., Escadafal, R., Garatuzza-Pajan, J., Hanich, L., Perdigão, A., Tapia, J.B., and Vuolo, F. (2010). Earth Observation Products for Operational Irrigation Management in the Context of the PLEIADES Project. *Agricultural Water Management*, 98, 271–282.
- Dugo, M., Gutiérrez, A., Íñiguez, L., Royo, S., Cano, F., Coello, J., Oyonarte, N. and Sánchez, V. (2010). Integración de los sensores remotos en la gestión sostenible del riego. Una aplicación en Andalucía. *Riegos del alto Aragón, Extra 1*, 10–12.
- Er-Raki, S., Rodríguez, J., Garatuzza-Payan, J., Watts, C. and Chehbouni, A. (2013). Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. *Agricultural Water Management*, 122, 12–19.
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO.
- Fernández, D., Martínez, M., Tavarez, C., Castillo, R., and Salas, R. (2009). *Estimación de las demandas de consumo de agua*. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Fronza, D., and Vinícius, M. (2003). Water consumption of the Estevia. *Stevia Rebaudiana (bert.) Bertoni*. Crop estimated Through microlysimeter. *Scientia Agricola*, 60, 595–599.
- González, R., Paniagua, J. & Mayeregger, E. (2002). Necesidad de agua para el cultivo de Estevia (*stevia rebaudiana, bert.*), calculado sobre la base de lectura de microlisímetro. *Revista Investigación Agraria*, 4, 14.
- Gonzalez-Dugo, M.P., Neale, C.M.U., Mateos, L., Kustas, W.P., Prueger, J.H., Anderson, M.C., and Li, F. (2009). A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1843–1853.
- Hellman, E. (2010). Irrigation Scheduling of Grapevines with Evapotranspiration Data. *AgriLife Extension*, 6.
- Jackson, R.D., and Huete, A.R. (1991). Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11, 185–200.
- Ojeda, W., Toledo, A., Balancan, A., Iñiguez, M., Hernández, M., and Ruiz, A. (2012). Estimación de los coeficientes de cultivo usando imágenes de satélite en grandes zonas de riego. *Agrociencia*, 49, 221-232.
- Pierre, P., Róvere, O., Romo, I. and Villacrés, H. (1995). El agua en el Ecuador. Clima, precipitaciones, escorrentía. En *Estudios de Geografía*, (pp. 13–24). Quito: Corporación Editora Nacional.
- Rivas, R. and Caselles, V. (2003). La ecuación de Penman-Monteith para su uso en teledetección. *Revista de Teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección*, 20, 65–72.
- Updike, T. and Comp, C. (2010). Radiometric Use of WorldView-2 Imagery. *Digital Globe*.