

# DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE UN CULTIVO DE VID (*VITIS VINIFERA* CV. *CABERNET SAUVIGNON*) MEDIANTE EL BALANCE DE ENERGÍA Y VALIDACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO (KC) A CAMPO

**DALMASSO, JULIETA<sup>a</sup> - MUNAFÓ, MARÍA VICTORIA<sup>b</sup> - FERRARI, FLORENCIA<sup>a</sup> -  
MONTOYA, MARCOS<sup>ab</sup>**

dalmasso.julieta@inta.gob.ar

<sup>a</sup> Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

<sup>a</sup>Laboratorio de Geomática y Agricultura de Precisión

San Martín 3853, Luján de Cuyo

Mendoza, Argentina.

<sup>b</sup> Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo

Departamento de Ingeniería Agrícola

Almirante Brown 500, Luján de Cuyo

Mendoza, Argentina.

## RESUMEN

Actualmente existen diversos métodos para estimar a escala local las necesidades hídricas de un cultivo agrícola, basadas en dos principios fundamentales: balance de energía y balance hídrico. El propósito del trabajo fue determinar la evapotranspiración (ET) de un cultivo de vid mediante el balance de energía, validar el coeficiente de cultivo (kc) comparando con los kc obtenidos a campo por el porcentaje de área sombreada y área foliar. El área de estudio consistió en un viñedo de seis hectáreas de vid (*Vitis vinifera* cv. *Cabernet sauvignon*) con un sistema de riego tecnificado y conducido en espaldero alto. El mismo está ubicado en Ugarteche, departamento de Luján de Cuyo, Mendoza, Argentina (33°12'43"S, 68°53'13"O, 960 msnm). Se determinaron seis estaciones de medición, aplicando la técnica de píxeles homogéneos coincidentes con seis píxeles *Landsat*. Las fechas de medición fueron en base a la resolución temporal del satélite y la cobertura nubosa. Se aplicó el modelo de balance de energía de la superficie (METRIC), implementado con el paquete 'water' de R Studio. Se realizó una interpolación temporal basada en los datos meteorológicos (modelo *splines*), para ajustar la curva de kc a la fenología del mismo, en función de la acumulación de grados días. Se obtuvieron y analizaron comparativamente durante dos años las curvas de kc a nivel parcelario para los sitios en estudio. Los métodos a campo presentaron resultados similares entre sí a lo largo del ciclo, con poca variación en los valores. A su vez, el modelo METRIC fue similar a los dos anteriores en los estadios iniciales del ciclo (alto crecimiento vegetativo), aunque luego la precisión en la estimación de la demanda evapotranspirativa decayó.

## 1.- INTRODUCCION

La utilización de las nuevas tecnologías en la planificación del riego es una práctica cada vez

más extendida con el fin de hacer esta actividad sostenible tanto ambiental como económicamente. El riego es una de las prácticas más importantes en la agricultura, pues consume entre el 70-80 % de los recursos hídricos mundiales disponibles [1].

Saber cuánta agua hay que aplicar es un factor clave en el proceso de riego. Una adecuada cuantificación de la evapotranspiración del cultivo (ETc) permite el desarrollo de estrategias de riego, mejorando la eficiencia del uso del agua y la producción. Esto puede realizarse mediante la estimación de la evapotranspiración de referencia (ETr) y el coeficiente de cultivo (kc). Si bien hay muchos coeficientes de cultivo publicados para la vid [1, 2], estos sólo aplican a determinadas condiciones ambientales y de la planta. Con lo cual, resulta imperioso obtener una metodología para la estimación de la evapotranspiración (ET) ajustada a las características específicas de cultivo, que permita la correcta planificación de la estrategia de riego.

Existen varios métodos para estimar la ET con una precisión razonablemente buena usando lisímetros de pesada, técnicas de *Eddy covariance* y relación de *Bowen*. Estos métodos son limitados, ya que proporcionan valores puntuales de ET para un lugar específico y no facilitan un valor a escala regional.

El modelo desarrollado por Allen *et al.* [3] “Mapeo de la evapotranspiración en alta resolución y con calibración internalizada (*Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration - METRIC TM*)”, calcula la ET como un residual en el balance de la energía de la superficie y es una variante del modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), desarrollado por Bastiaanssen *et al.* [4, 5, 6].

Con esta premisa y haciendo uso de la ecuación del balance de energía de la superficie para la estimación de la ET mediante imágenes satelitales [3, 7], se buscó generar una curva de coeficiente de cultivo para una parcela de *Vitis vinifera* cv. Cabernet sauvignon.

### Objetivo General

Determinar la ET de un cultivo de vid (*Vitis vinifera* cv. Cabernet sauvignon) mediante el balance de energía y construir la curva de kc.

### Objetivos Específicos

Construir la curva de kc a través del índice de área foliar (IAF) a campo.

Construir la curva de kc a través del porcentaje área sombreada (PSA) a campo.

Validar la determinación de kc a partir de imágenes satelitales (balance de energía) comparándolo con datos tomados a campo.

Determinar la ET de un cultivo de vid.

## 2.- METODOLOGIA

El área de estudio corresponde a una finca comercial, ubicada en la provincia de Mendoza, en el departamento de Luján de Cuyo, localidad de Ugarteche (33°12'43"S, 68°53'13"O, 960 msnm). La parcela tiene una superficie de aproximadamente seis hectáreas de vid (*Vitis vinifera* cv. Cabernet sauvignon) conducida en espaldero alto. Se realizan diferentes intervenciones sobre la parcela durante la temporada de crecimiento, tales como: poda de verano o despampanado, fertilización, fumigación, aplicación de herbicidas y planificación del riego (presurizado por goteo). Dentro de la parcela de vid, se determinan seis estaciones de medición, uniformes y representativas, aplicando la técnica de píxeles homogéneos [8] coincidentes con seis píxeles Landsat. Estas seis estaciones (numeradas de 1 a 6) se encuentran bajo el mismo régimen hídrico, proveyendo agua en cantidad suficiente para satisfacer las necesidades del cultivo (Figura 1). Las mediciones a campo se realizaron en el centroide de cada píxel para eliminar el efecto de borde. Se constató in situ la representatividad del claro para el píxel y se seleccionaron dos plantas contiguas en cada claro indicado.



Figura 1. Parcela de vid cv. Cabernet sauvignon seleccionada para el estudio, píxeles de Landsat 8 (cuadrículado) y estaciones de medición seleccionadas (puntos).

Las imágenes satelitales multiespectrales fueron obtenidas del satélite Landsat 8, el cual posee una resolución espacial de 30 metros. Estas imágenes (path =232, row = 83), libres de nubes, fueron descargadas del servidor USGS (*United States Geological Survey*) para su posterior análisis.

Los datos climáticos se obtuvieron de una estación meteorológica (EM) en condiciones de referencia (MiniMetosR). La misma registra cada 15 minutos datos de temperatura (°C), radiación solar ( $W m^{-2}$ ), presión de vapor (kPa), velocidad del viento ( $m s^{-1}$ ) y precipitación (mm). Los datos registrados en el momento de captura de la imagen o de paso del satélite Landsat fueron utilizados luego para el cálculo de balance de energía.

El índice de área foliar (IAF) es la relación entre la superficie foliar de una planta respecto a la superficie de suelo que ella ocupa (marco de plantación). Esta variable es la más usada para caracterizar el desarrollo foliar en un viñedo [9]. Para obtener la superficie foliar de la planta se utilizó un método no destructivo [10]. En coincidencia con el paso del satélite Landsat 8, se

midió la longitud de todos los brotes de las dos plantas contiguas seleccionadas en cada estación de medición. Luego, el IAF se calculó considerando la superficie foliar de la planta y el marco de plantación (1,5 m entre plantas y 2 m entre hileras). Finalmente, el coeficiente de cultivo  $kc\_IAF$  se estimó con la relación presentada por Johnson et al. [11]:

$$kc\_IAF = 0,115 + (0,235 * IAF)$$

El porcentaje de área sombreada (PSA) también se determinó en las estaciones definidas anteriormente. En primer lugar, se marcó en terreno una superficie equivalente al marco de plantación (con 4 estacas coloreadas), dejando en el centro los brazos adyacentes de las plantas contiguas seleccionadas. Luego, al mediodía solar (entre 12:30 y 1:30 pm) y para cada fecha de pasada del satélite Landsat 8, se tomaron fotografías del área sombreada procurando incluir siempre en la foto las cuatro marcas del suelo. Posteriormente, mediante el análisis de las fotografías y el uso del software GIMP 2.8, se calculó el PSA a partir de la relación entre la superficie sombreada de las plantas y el marco de plantación.

Finalmente, se calculó el  $kc\_PSA$  utilizando la relación empírica presentada por Williams y Ayars [12]:

$$kc\_PSA = -0,008 + (0,017 * PSA)$$

Uno de los modelos más citados para estimar la ET de la superficie terrestre a partir del balance de energía basado en satélites, es METRIC por sus siglas en inglés "*Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration*" (Allen et al. 2007) basado en el modelo SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998). En este modelo, la ET se estima como un residuo de la ecuación de energía superficial:

$$LE = R_n - G - H$$

Dónde:

LE: es la energía latente consumida por ET ( $W m^{-2}$ )

Rn: es radiación neta ( $W m^{-2}$ )

G: es el flujo de calor sensible conducido al suelo ( $W m^{-2}$ )

H: es el flujo de calor sensible del aire ( $W m^{-2}$ )

Con el fin de facilitar la implementación del modelo y el cálculo de las componentes del balance se utilizó el paquete "water" [7] publicado en el repositorio oficial de RStudio (CRAN) [13, 14].

Se calculó  $R_n$ ,  $G$  y  $H$  para cada píxel dentro de la escena satelital de Landsat con el soporte de la EM. Luego se estimó  $LE$  utilizando la ecuación anterior y se obtuvieron los valores de  $ET$  instantánea (de cada píxel) con la siguiente ecuación:

$$ET_{inst} = 3600 \cdot \frac{LE}{\Lambda \rho_w}$$

Dónde:

$ET_{inst}$ : evapotranspiración instantánea al momento de pasada del satélite (mm h-1)

3600: factor de conversión de segundos a horas

$\rho_w$ : densidad del agua =  $1000 \text{ kg m}^{-3}$

$\Lambda$ : calor latente de vaporización ( $J \text{ kg}^{-1}$ )

Finalmente, la  $ET$  diaria ( $ET_{24}$ ) se calculó píxel por píxel (en el caso de *Landsat 8*, cada uno mide  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ) con la siguiente ecuación:

$$ET_{24} = \frac{ET_{inst}}{ET_{r.inst}} ET_{r24}$$

Dónde:

$ET_{24}$ : evapotranspiración diaria

$ET_{inst}$ : evapotranspiración instantánea al momento de pasada del satélite (mm h-1)

$ET_{r.inst}$ : evapotranspiración instantánea de la estación meteorológica de referencia

$ET_{r24}$ : evapotranspiración diaria de la estación meteorológica de referencia

Una vez obtenida la  $ET_{24}$  píxel a píxel para cada fecha se calculó el  $kc$  también píxel a píxel. Para la interpolación temporal se ajustó un modelo de splines (interpolación polinómica) con el cual se predijo el  $kc$  para las fechas faltantes (o los días de la temporada de crecimiento de la vid, para los cuales no hay imágenes satelitales), de manera de poder obtener una curva continua de  $kc$ .

Todas las variables determinadas se graficaron en función de los grados día acumulados (GDD). Los GDD representan el tiempo fisiológico de las

plantas, ya que tiene en cuenta la temperatura ambiente, una de las variables que más influye en la velocidad de las reacciones bioquímicas. De esta manera, se correlacionan directamente con la fisiología (y fenología) de cada genotipo. Los GDD, se calcularon como la sumatoria del promedio de la temperatura máxima y temperatura mínima diaria, menos una temperatura base  $10^\circ\text{C}$  [15].

### 3.- DESARROLLO

Al comparar los valores de  $kc$ , podemos observar que las curvas obtenidas con datos a campo ( $kc_{IAF}$  y  $kc_{PSA}$ ), siguen un ritmo similar con más o menos desviación en los datos en ambas temporadas (Figuras 2 y 3). Los valores de  $kc_{IAF}$  son los más bajos y menos sensibles de modificación a lo largo de ambas temporadas. Los valores de  $kc_{PSA}$  son algo mayores que los anteriores, aunque no superan 0.6 y las desviaciones estándar de los datos son mayores. Estos  $kc$  registrados a campo muestran poca variabilidad durante la misma época de medición y siempre se encuentran por debajo de 1.

La evolución de  $kc_{BE}$  muestran mayor variación a lo largo de las temporadas, comparado con los  $kc$  medidos a campo. Estos  $kc$  obtenidos se ajustan al ritmo de crecimiento de la vid, iniciando con valores cercanos al 0.4, llegando a un máximo aproximado de 1.0 en plena temporada de crecimiento y finalmente, decayendo hacia el final del ciclo de crecimiento. En las gráficas, se puede observar que, hacia el final de ambas temporadas de medición, se registró un pico de crecimiento y un aumento del  $kc_{BE}$  (coincidente con las semanas posteriores a cosecha, a mediados del mes de marzo). Dicho aumento no fue registrado en los  $kc$  de campo, ya que no se realizaron mediciones durante dichas fechas.

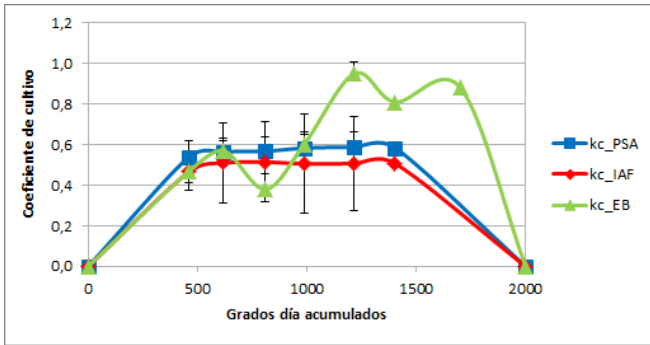


Figura 2. Comparación de las tres curvas de kc obtenidas por diferentes métodos: índice de área foliar (kc\_IAF), porcentaje de área sombreada (kc\_PSA) y balance de energía (kc\_BE) en función de los grados día acumulados (GDD) para la temporada 2018-2019.

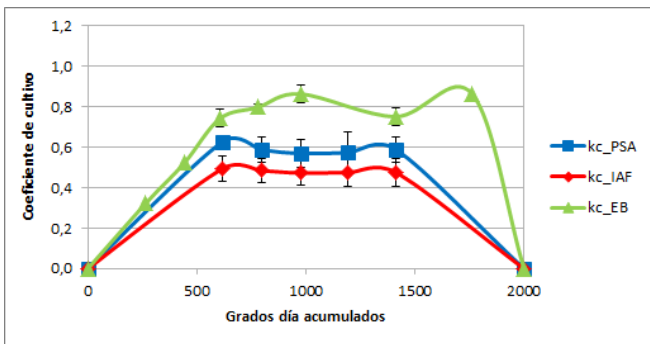


Figura 3. Comparación de las tres curvas de kc obtenidas por diferentes métodos: índice de área foliar (kc\_IAF), porcentaje de área sombreada (kc\_PSA) y balance de energía (kc\_BE) en función de los grados día acumulados (GDD) para la temporada 2019-2020.

En las Figuras 4 y 5 se observa la evolución de la ET24, calculada a partir de las imágenes satelitales, en las dos temporadas de medición. Se observan diferencias significativas entre las temporadas, aunque las variaciones estacionales fueron las esperadas. La evolución del kc\_BE también fue diferente en cada ciclo de crecimiento medido, ya que para el cálculo de dichos valores también se utilizan las imágenes satelitales y los datos climáticos.

En la Figura 4 se observa una disminución notable tanto en ET24 antes de la mitad de la temporada, aparentemente se trata de las condiciones ambientales particulares, las cuales fueron captadas por la imagen satelital de dicha

fecha. Esto también influyó posteriormente en el cálculo del valor de kc para dicha fecha.

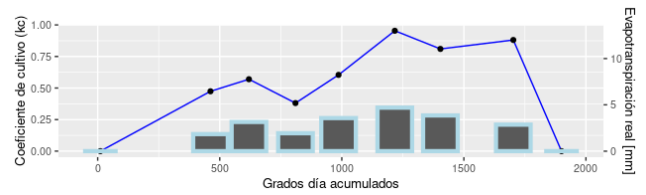


Figura 4. Valores de coeficiente de cultivo y evapotranspiración (ET24) en función de los grados día acumulados, obtenidos a partir del cálculo de balance de energía con imágenes satelitales, durante la temporada 2018-2019.

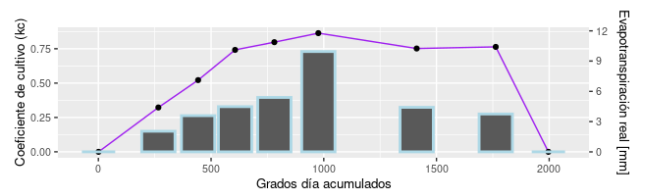


Figura 5. Valores de coeficiente de cultivo y evapotranspiración (ET24) en función de los grados día acumulados, obtenidos a partir del cálculo de balance de energía con imágenes satelitales, durante la temporada 2019-2020.

En la Figura 6 se detalla la evolución continua del kc, calculado a través del modelo de interpolación polinómica. Allí podemos observar cómo los modelos varían en función de las temporadas, ya que los mismos dependen de las condiciones ambientales de las fechas de pasada del satélite y de las condiciones ambientales de dichos días. También se presentan los valores de ET24 a lo largo del ciclo de cultivo.

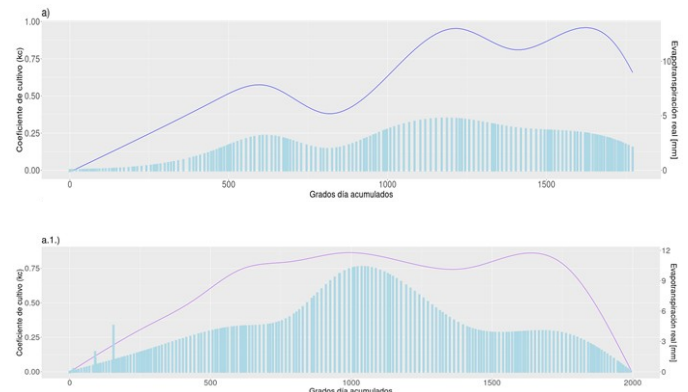


Figura 6. Evolución de la evapotranspiración (barras verticales) y del coeficiente de cultivo

(kc\_BE) (línea continua) por el método de balance de energía y modelo de interpolación (splines) para cada una de las temporadas evaluadas (2018-2019 y 2019-2020) en función de los grados día acumulados.

## CONCLUSIONES

Los métodos de determinación de kc a campo presentaron valores similares entre sí, con poca variabilidad, a lo largo de ambos ciclos de crecimiento de la vid.

Los valores de kc determinados por el método de balance de energía fueron similares a los de campo en los estadíos iniciales del cultivo, aunque luego la precisión en la estimación de la ET disminuyó, ya que los valores aumentaron y se mantuvieron por encima de los valores de campo.

Mediante el método de balance de energía es posible obtener una curva de kc continua ajustada a los datos reales de la temporada de crecimiento del cultivo.

Los valores de kc y de ETa obtenidos con el modelo de balance de energía se ajustan a los requerimientos hídricos de un viñedo durante un ciclo de crecimiento.

Se recomendaría realizar nuevas temporadas de medición y comparación con datos de campo para captar y verificar la fiabilidad de los datos obtenidos con el modelo de balance de energía.

## REFERENCIAS

[1] FAO 56 Estudio Riego y Drenaje. 2006. **Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua para los cultivos.**

[2] ORIOLANI M.J.C. 1981. **Requerimiento hídricos de los cultivos principales de**

**Mendoza. Resultados experimentales.** INTA – EEA de Mendoza – Argentina.

[3] ALLEN, R. G., TASUMI, M. Y TREZZA, R. (2007). **Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model.** *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133, 380.

[4] BASTIAANSEN, W. G. M. 1995. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies conditions in Mediterranean climates.** Ph. D. Wageningen Agricultural University, Netherlands. 273 pp.

[5] BASTIAANSEN, W. G. M. 1998. **Remote sensing in water resources management: the state of the art.** Int. Water Manag. Institute, Colombo, Sri Lanka. 118 pp.

[6] BASTIAANSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P. Y ALLEN, R. G. 2005. **SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions.** *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 131(1):85-93.

[7] OLMEDO, G. F., ORTEGA-FARÍAS, S., DE LA FUENTE-SÁIZ, D., FONSECA-LUEGO D. Y FUENTES-PEÑAILILLO, F.: **Water: Tools and Functions to Estimate Actual Evapotranspiration Using Land Surface Energy Balance Models in R** (2016)

[8] DALMASSO, J., Y OLMEDO, G. F.: **inta-gap/SpVarSampling: CAI 2019 (Version 0.7).** Zenodo. May 6 (2019) <http://doi.org/10.5281/zenodo.2669516>.

- [9] ARNÓ, J., VALLÈS, J. M., LLORENS, J., SANZ, R., MASIP, J., PALACÍN, J., Y ROSELL-POLO, J. R. (2013). **Leaf area index estimation in vineyards using a ground-based LiDAR scanner.** *Precision agriculture*, 14(3), 290-306.
- [10] COSTANZA, P., TISSEYRE, B., HUNTER, J. J., Y DELOIRE, A. (2004). **Shoot development and non-destructive determination of grapevine (*Vitis vinifera* L.) leaf area.** *South African Journal of Enology and Viticulture*, 25(2), 43-47.
- [11] JOHNSON, L., ROCZEN, D., YOUKHANA, S., NEMANI, R., Y BOSCH, D. (2003). **Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery.** *Computers and electronics in agriculture*, 38(1):33-44.
- [12] WILLIAMS, L. Y AYARS, J. (2005). **Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy.** *Agricultural and Forest Meteorology*, 132(3-4):201-211.
- [13] R CORE TEAM R: **A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria (2019) URL <https://www.R-project.org/>.
- [14] RSTUDIO TEAM. **RStudio: Integrated Development for R.** RStudio, Inc., Boston, MA (2015) URL <http://www.rstudio.com/>.
- [15] AMERINE, M., Y WINKLER, A. (1944). **Composition and quality of musts and wines of California grapes.** *Hilgardia*, 15(6), 493-675.