

Proyecto: Estimación de la evapotranspiración real de vid mediante modelos físicos y sensores remotos, a escala planta, parcelaria y regional

Postulante: Guillermo Federico Olmedo

Abstract

La estimación de las necesidades de agua de los cultivos a partir de la cuantificación de la evapotranspiración real (Etr) del cultivo es un paso importante en la producción agrícola, debido a que los rendimientos y los costos están directamente relacionados a esta. En general los métodos usados son de carácter local, como los coeficientes de cultivo, o el uso de lisímetros, sistemas de covarianza de los torbellinos o la relación de Bowen. Estos métodos, si bien son precisos, tienen limitaciones para ser extrapolados a escala parcelaria y/o regional. Bajo las hipótesis de que: los coeficientes duales permiten modelar el uso de agua de la planta; los sensores proximales permiten medir la variabilidad de consumo de agua en una parcela de vid; y que los sensores remotos, junto con modelos físicos permiten estimar la ETr de la vid, el objetivo general de este proyecto es estimar la evapotranspiración real de vid mediante modelos físicos y sensores remotos, a escala planta, parcelaria y regional. A escala planta, se estudiará la ETr mediante el uso de un lisímetro de pesada, y con esta información se ajustarán coeficientes de cultivo simples y duales. A escala parcelaria se estudiará la variabilidad en estos coeficientes estudiando la diferencias en crecimiento vegetativo, área foliar y fracción de cobertura. Para la estimación de estos parámetros se utilizarán sensores proximales terrestres y aéreos no tripulados. Finalmente se aplicarán modelos físicos para estimar a partir de sensores remotos, la ecuación de balance de energía y de esa forma conocer el consumo de agua de la planta a escala regional. Los resultados esperados son: obtener coeficientes de cultivo para plantas de vid, Malbec, conducidas en espaldera y su variabilidad espacial intraparcilaria; y conocer las necesidades de agua de la vid y su variabilidad a escala parcelaria y regional.

Keywords. evapotranspiración real, vid, riego, sensores remotos, balance de energía de la superficie

1 Identificación del proyecto

Postulante: OLMEDO, Guillermo Federico

Director: ORTEGA FARÍAS, Samuel (UTalca, Chile)

Co-director: VALLONE, Rosana (INTA – UNCuyo)

Disciplinas: Riego, Geomática, Viticultura de precisión, Modelos de balance de energía de la superficie.

2 Fundamentación del problema

El desarrollo de las actividades económicas en la Provincia de Mendoza, se encuentra limitado por la aridez y el pronunciado déficit hídrico (Departamento General de Irrigación, 2014). El escaso 3% de la superficie de Mendoza desarrollado bajo oasis artificiales, la aridez que caracteriza a la provincia y el pronunciado déficit hídrico, impiden o limitan el desarrollo de gran parte de las actividades económicas. El desarrollo se encuentra limitado por la ausencia de suficiente oferta de recurso hídrico para satisfacer el crecimiento del área sujeta a regadío o la expansión de otras actividades que, como la urbana, minera o industrial, requieren de la utilización del agua. Hoy la distribución de agua se basa fundamentalmente en la oferta existente.

De acuerdo al Departamento General de Irrigación (Departamento General de Irrigación (2014)) en el ciclo 2014-2015, los ríos de Mendoza, transportarán un volumen de agua que no superará la media histórica, debido a las escasas nevadas caídas hasta setiembre de este año. De esta manera los ríos Mendoza, Tunuyán, Diamante y Malargue, ingresarán en el quinto año consecutivo de emergencia hídrica, en tanto, el río Atuel, en el sexto. En general, los volúmenes a escurrir en todos los ríos de la provincia de Mendoza, se encuentran por debajo de las medias históricas, con porcentajes menores al 65% de las mismas, en casi todas las cuencas provinciales.

La determinación de la evapotranspiración real de cultivo (ET_r) a escala regional es de fundamental importancia para distribuir eficientemente el agua de riego en los oasis y facilitar la toma de decisiones de los administradores y usuarios del recurso. Permite, además, relacionándola con el agua entregada a nivel de canal, estimar indicadores de eficiencia en el uso del agua.

Tradicionalmente, la evapotranspiración real del cultivo (ET_r) ha sido estimada multiplicando la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) por un coeficiente de cultivo (K_c), determinado de acuerdo al tipo y estado de crecimiento del cultivo (Allen et al., 2006). Siempre está la pregunta sobre si el valor de K_c idealizado es aplicable al crecimiento vegetativo y estado de desarrollo reales, sobre todo en áreas de déficit de recurso hídrico. Por otro lado, es complicado determinar las condiciones actuales de crecimiento de cultivo en un área extendida como los oasis. Los datos satelitales son ideales para derivar datos continuos de ET_c usando técnicas de balance de energía. Hace más de una década atrás, regionalmente se abordaron algunas de estas técnicas, pero sin aplicación práctica (Bermejillo and Zuluaga, 1998).

La estimación de las necesidades de agua de los cultivos a partir de la cuantificación de la evapotranspiración real (E_{tr}) del cultivo es un paso importante en la producción agrícola, debido a que los rendimientos y los costos están directamente relacionados a esta. En general los métodos usados son de carácter local, como los coeficientes de cultivo, o el uso de lisímetros, sistemas de covarianza de los torbellinos o la relación de Bowen. Estos métodos, si bien son precisos, tienen limitaciones para ser extrapolados a escala parcelaria y/o regional. Además pueden existir grandes variaciones con la evapotranspiración real del cultivo al no considerar variaciones temporales y espaciales causadas por la heterogeneidad de la lluvia y el riego, el suelo, la densidad de las plantas, variabilidad microclimática y diferencias en el estado fenológico (Allen et al., 2011).

En este sentido, los sensores remotos son un aporte a la estimación de la ET utilizando sensores remotos, que consideran los patrones espacio temporales en el suelo. Los sensores remotos han permitido diferentes enfoques para estimar la E_{tr} siguiendo enfoques físicos o empíricos. Uno de los modelos mas citados para estimar la E_{tr} a partir del modelo de balance de energía de la superficie, es METRIC (en inglés Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration) (Allen et al., 2007b). METRIC fue desarrollado en base al reconocido modelo SEBAL (del inglés Surface Energy Balance Algorithm for Land) (Bastiaanssen et al., 1998a,b).

Estos métodos basado en procesamiento de imágenes satelitales para calcular la E_{tr} como un residuo del balance de energía de la superficie de la Tierra. Su gran innovación es que en el modelado del balance energético, usa el gradiente de temperatura cercano a la superficie, dT , íntimamente relacionado a la temperatura de superficie medida radiométricamente, eliminando la necesidad de un modelo de temperatura de la superficie aerodinámicamente preciso y absoluto y la necesidad de mediciones de la temperatura del aire para estimar el flujo de calor sensible en superficie. Además otras ventajas sobre los métodos tradicionales de balances de energía obtenidos con satélite:

- que su calibración se realiza utilizando solamente ET_o . El uso de esta variable para la extrapolación de la ET_r instantánea para periodos de 24hs o mayores, compensa los efectos de advección regional por no ligar ET_r a la radiación neta, dado que la ET_c puede exceder la radiación neta diaria en muchas áreas áridas o semiáridas.
- ni los estados de crecimiento ni el tipo de cultivo necesitan ser conocidos (K_c)
- el balance de energía también permite detectar ET_c restringida por déficit hídrico (K_h) y limitantes edáficas (K_s).

Los avances en la tecnología de la percepción remota, la modelización matemática y la instalación de un lisímetro de pesada en cultivo de vid en Luján de Cuyo, Mendoza, posibilitarían la estimación de la ET_r y el desarrollo de un sitio web

para la adquisición del dato en tiempo real. Los mapas de ET_r obtenidos, permitirían además comparar consumos entre parcelas y zonas, cuantificar el uso de agua mensual y por temporada, apoyar modelos de agua subterránea, determinar coeficientes y curvas medias de K_c para diferentes sistemas productivos.

3 Estado del arte

El uso de coeficientes duales.. .. bla. Empiezo por (Allen, 2000).

Aplicaciones en vid: (Poblete-Echeverría et al., 2012) y (Zhao et al., 2015).

Y apoyo con sensores remotos en (Er-Raki et al., 2007), y particion en (Er-Raki et al., 2010).

El enfoque de SEBAL (balance de energía de la superficie) utiliza datos de temperatura de la superficie mediante sensores remotos, la reflectividad y NDVI. Este modelo utiliza un esquema de transferencia con una fuente de resistencia, donde se deriva r_s , H , y λE a la humedad de suelos cercana a la superficie. Este esquema hace un uso explícito de la variabilidad espacial observada de la temperatura de la superficie, y su reflectancia en una escena completa libre de nubes.

Kalma et al. (2008) menciona que el error de unos 30 trabajos de validacion mediante métodos de flujo (eddy correlation, bowen ratio) publicados esta en torno a $50 Wm^2$ y los errores relativos son de entre 15% y 30%. Este autor también menciona que la comparación muestra que los métodos analíticos y físicos mas complejos no son necesariamente mas precisos que los enfoques empíricos / estadísticos. Se ha mejorado mucho el conocimiento de los procesos de evaporación, a escala local, a partir del trabajo con Eddy correlation / Bowen ratio. Pero estas observaciones raramente pueden extenderse a grandes areas, debido a la heterogeneidad de las superficies y la naturaleza dinámica de los procesos de transferencia del calor. En general lo métodos para estimar la E mediante sensores remotos difieren en: (i) tipo y extensión espacial de la aplicación; (ii) tipo de dato de sensores remotos; (iii) el uso de información (micro) meteorologica y de cobertura de suelos. De acuerdo a Su (2002, citado por Kalma et al. (2008)) hay 3 grandes enfoques en los métodos de balance de energía. El enfoque residual: como en METRIC donde se estima el LE , a partir de la diferencia entre la Rn , y H y G . El segundo enfoque utiliza el índice de estrés hídrico para estimar la evapotranspiración relativa (la relación entre la ETa/ETp) y luego estimar la ETa conociendo la ETp , a partir de datos meteorológicos. Y el tercer y último enfoque es calcular todos los componentes del balance de energía a nivel de superficie mediante modelos continuos de superficie (LSM, por sus siglas en inglés) que incluyen modelos de transferencia suelos-planta-atmósfera (SVAT). La temperatura del suelo superficial incide en los cuatro términos de la ecuación del balance de energía, y en la radiación de onda larga saliente en la ecuación de radiación neta. La temperatura radiativa de la superficie, medida por un radiómetro infrarrojo desde una plataforma espacial, se asume como aproximadamente la temperatura radiométrica hemisférica (Norman and Becker, 1995 citado por Kalma et al. (2008)). La temperatura de

la superficie medida por sensores remotos tiene efectos atmosféricos relacionados con la absorción de la radiación infrarroja por vapor de agua en la atmósfera.

3.1 Sensible heat flux

Table ?? shows a review of some errors reported about METRIC model. In this sense, net radiation (R_n) and soil heat flux (G) usually had the lowest estimation errors. Sensible heat flux (H), is the hardest component of surface energy balance to estimate. As Allen et al. (2007b) mentions, the computation of latent heat flux (LE) is only as accurate as the summed estimates for R_n , G , and H .

One reported weak of METRIC model is the selection of the anchor pixels. In ? and ? the differences in H estimation produced by different trained users were evaluated, showing important biases; while in ?? an analysis showed the high sensitivity of the model respect to the hot pixel.

The aforementioned causes that the METRIC estimation of H be very sensible to the selection of anchor pixels, due that a group of possible candidates could have minimal differences in some attributes, but these differences can generate important bias in the estimations.

In the early implementations of METRIC, the anchor pixels selection was done manually by an operator, but then a methodology to an automation procedure was proposed in ? using statistical conditions and expert knowledge. This method aiming to avoid the effect of human criteria that helps to increase the model robustness.

4 Marco teórico

METRIC ha sido aplicado en muchos países del mundo para estimar la ET de los cultivos, a escalas parcelarias en grandes superficies, utilizando imágenes satelitales. Este modelo se ha aplicado a diferentes cultivos como maíz, trigo, soja y alfalfa con excelentes resultados (errores de 3 a 20%) (Allen et al., 2007a; Choi et al., 2009; Mkhwanazi and Chávez, 2012). En años recientes se ha aplicado a cultivos leñosos con canopeos esparcidas como viñas y olivos (Poblete-Echeverría and Ortega-Farias, 2012; Carrasco-Benavides et al., 2014; Santos et al., 2012; Pôças et al., 2014). Y recientemente se a aplicado a superficies con mucha pendiente (Allen et al., 2013).

METRIC estima la ETr como residuo de la ecuación de balance de energía (Ec. 1), utilizando información de imágenes satelitales y de una estación meteorológica ubicada dentro del área de estudio.

$$LE = R_n - G - H \quad (1)$$

donde LE es el flujo de calor latente consumido en el proceso de evapotranspiración ($W \cdot m^{-2}$); R_n es la radiación neta ($W \cdot m^{-2}$); G es el flujo de calor al suelo ($W \cdot m^{-2}$); y H es el flujo de calor sensible transmitido por convección al aire ($W \cdot m^{-2}$).

La R_n es calculada considerando los valores de la imagen satelital y datos referidos al momento de captura. Algunos procesos de corrección son necesarios, como correcciones radiométricas y atmosféricas (Tasumi et al., 2008). G es estimado utilizando una ecuación empírica, propuesta por Allen et al. (2007b) y adaptada a vid por Carrasco-Benavides et al. (2014). Esta ecuación considera la R_n , la temperatura de superficie, índices de vegetación y el albedo.

Luego, H es estimada a partir de la selección de píxeles ancla en la imagen. La estimación de H considera la ecuación general de transporte de calor (Ec. 2), donde dT es la diferencia de temperatura entre la superficie y el aire, r_{ah} es la resistencia aerodinámica al transporte de calor ($s \cdot m^{-1}$), ρ es la densidad del aire ($kg \cdot m^{-3}$) y c_p es el calor específico del aire ($1004 \cdot J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$).

$$H = \frac{\rho \cdot c_p \cdot dT}{r_{ah}} \quad (2)$$

La estimación de dT es calculada utilizando la relación linear entre la temperatura del aire y los píxeles ancla, como es descripto en Bastiaanssen et al. (1998a). Para estimar r_{ah} , se extrapola la velocidad del viento (medida en la estación meteorológica) a una altura donde se lo considera constante (por ejemplo, 200 meters), y se le aplica un procesos de corrección de la estabilidad iterativo basado en las ecuaciones de Monin-Obhukov Allen (1996).

Luego, LE es estimado con la ecuación 1, y posteriormente, la evapotranspiración instantánea se calcula como:

$$ET_{inst} = 3600 \cdot \frac{LE}{\lambda \rho_w} \quad (3)$$

donde ET_{inst} es la evapotranspiración instantánea en el momento de pasada del satélite ($mm \cdot h^{-1}$); 3600 es un factor de conversión para pasar de segundos a hora; ρ_w es la densidad del agua = $1000 \cdot kg \cdot m^{-3}$; y λ es el calor latente de vaporización del agua ($J \cdot kg^{-1}$).

Finalmente la ETr diaria es calculada para cada píxel (30 x 30 m) mediante:

$$ET_{24} = \frac{ET_{inst}}{ET_r} ET_{r-24} \quad (4)$$

5 Hipótesis

- Los coeficientes duales permiten modelar por separado el proceso de evaporación del suelo y la transpiración de la planta.
- Los sensores proximales permiten medir la variabilidad de consumo de agua en una parcela de vid.
- Los sensores remotos, junto con modelos físicos permiten estimar la evapotranspiración real de la vid.

6 Objetivos

Objetivo General: Estimar la evapotranspiración real de vid mediante modelos físicos y sensores remotos, a escala planta, parcelaria y regional

Objetivo específicos:

1. Obtener coeficientes duales para la estimación de la evaporación y la transpiración en viñedos
2. Desarrollar un método que permita medir la variabilidad intraparcilaria del consumo de agua mediante sensores proximales
3. Evaluar las necesidades de agua de la vid mediante el empleo de modelos físicos y de balance de energía, a escala regional

7 Metodología

Este proyecto es de investigación aplicada, ya que se utilizarán bases teóricas físicas sobre el balance de energía de la superficie para aportar información en el consumo de agua de la vid.

El alcance de esta investigación es explicativo, ya que evaluará las interacciones entre la energía disponible y la vegetación para entender el proceso de evapotranspiración real de las plantas.

Se realizará un estudio observacional, mediante sensores proximales y remotos para estudiar viñedos a escalas parcelaria y regional e inferir el consumo de agua, a partir de un enfoque cuantitativo utilizando modelos físico-matemáticos.

Este estudio es diacrónico ya que se evaluarán las variables en estudio a lo largo del ciclo del cultivo y en diferentes años.

7.1 Objetivo Específico 1

Obtener coeficientes duales para la estimación de la evaporación y la transpiración en viñedos.

Los modelos de doble capa permiten modelar por separado el proceso de evaporación del suelo y la transpiración de la planta

7.2 Objetivo Específico 2

Desarrollar un método que permita medir la variabilidad intraparcilaria del consumo de agua mediante sensores proximales

Los sensores proximales permiten medir la variabilidad de consumo de agua en una parcela de vid

7.3 Objetivo Específico 3

Evaluar las necesidades de agua de la vid mediante el empleo de modelos físicos y de balance de energía, a escala regional

Los sensores remotos, junto con modelos físicos permiten estimar la evapotranspiración real de la vid

8 Resultados Esperados

References

- Allen, R., Irmak, A., Trezza, R., Hendrickx, J. M. H., Bastiaanssen, W., and Kjaersgaard, J. (2011). Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological Processes*, 25(26):4011–4027.
- Allen, R. G. (1996). Assessing Integrity of Weather Data for Reference Evapotranspiration Estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122(2):97–106.
- Allen, R. G. (2000). Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. 229:27–41.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*, volume 56. Food & Agriculture Org.
- Allen, R. G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J. L., Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I., and Robison, C. W. (2007a). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4):395–406.
- Allen, R. G., Tasumi, M., and Trezza, R. (2007b). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133:380.
- Allen, R. G., Trezza, R., Kilic, A., Tasumi, M., and Li, H. (2013). Sensitivity of Landsat-Scale Energy Balance to Aerodynamic Variability in Mountains and Complex Terrain. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49(3):592–604.
- Bastiaanssen, W., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J., Roerink, G., and van der Wal, T. (1998a). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 2. Validation. *Journal of Hydrology*, 212-213:213–229.
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. a., and Holtslag, a. a. M. (1998b). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. *Journal of Hydrology*, 212-213(1-4):198–212.

- Bermejillo, A. and Zuluaga, J. M. (1998). *Estimación de la evapotranspiración real regional a partir de datos satelitales*. PhD thesis, Universidad Nacional de Cuyo.
- Carrasco-Benavides, M., Ortega-Farías, S., Lagos, L., Kleissl, J., Morales-Salinas, L., and Kilic, A. (2014). Parameterization of the Satellite-Based Model (METRIC) for the Estimation of Instantaneous Surface Energy Balance Components over a Drip-Irrigated Vineyard. *Remote Sensing*, 6(11):11342–11371.
- Choi, M., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Allen, R. G., Li, F., and Kjaersgaard, J. H. (2009). An intercomparison of three remote sensing-based surface energy balance algorithms over a corn and soybean production region (Iowa, U.S.) during SMACEX. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(12):2082–2097.
- Departamento General de Irrigación (2014). Pronóstico de escurrimientos. Technical report.
- Er-Raki, S., Chehbouni, a., Boulet, G., and Williams, D. (2010). Using the dual approach of FAO-56 for partitioning ET into soil and plant components for olive orchards in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, 97(11):1769–1778.
- Er-Raki, S., Chehbouni, a., Guemouria, N., Duchemin, B., Ezzahar, J., and Hadria, R. (2007). Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*, 87:41–54.
- Kalma, J. D., McVicar, T. R., and McCabe, M. F. (2008). Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics*, 29:421–469.
- Mkhwanazi, M. M. and Chávez, J. L. (2012). Using METRIC to Estimate Surface Energy Fluxes over an Alfalfa Field in Eastern Colorado. *Environmental Engineering*, (970).
- Poblete-Echeverría, C. and Ortega-Farías, S. (2012). Calibration and validation of a remote sensing algorithm to estimate energy balance components and daily actual evapotranspiration over a drip-irrigated Merlot vineyard. *Irrigation Science*, 30(6):537–553.
- Poblete-Echeverría, C., Ortega-Farías, S., and Zuñiga, M. (2012). Estimation of Dual Crop Coefficients Over a Drip-Irrigated Merlot Vineyard Using Sap Flow Sensors and Eddy Covariance System. *Acta Horticulturae*, (951):269–275.
- Pôças, I., Paço, T. a., Cunha, M., Andrade, J. a., Silvestre, J., Sousa, A., Santos, F. L., Pereira, L. S., and Allen, R. G. (2014). Satellite-based evapotranspiration of a super-intensive olive orchard: Application of METRIC algorithms. *Biosystems Engineering*, 8.

- Santos, C., Lorite, I. J., Allen, R. G., and Tasumi, M. (2012). Aerodynamic Parameterization of the Satellite-Based Energy Balance (METRIC) Model for ET Estimation in Rainfed Olive Orchards of Andalusia, Spain. *Water Resources Management*, 26(11):3267–3283.
- Tasumi, M., Allen, R. G., and Trezza, R. (2008). At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(2):51–63.
- Zhao, P., Li, S., Li, F., Du, T., Tong, L., and Kang, S. (2015). Comparison of dual crop coefficient method and Shuttleworth–Wallace model in evapotranspiration partitioning in a vineyard of northwest China. *Agricultural Water Management*, 160(November):41–56.