

METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIANTE PROCESAMIENTO MASIVO DE IMÁGENES SATELITALES EN DISTINTAS RESOLUCIONES ESPACIALES, TEMPORALES Y SISTEMAS DE PROYECCIÓN.

1.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración corresponde al flujo de vapor de agua desde la superficie del suelo (evaporación) y la transpiración de las plantas hacia la atmósfera (transpiración). Los flujos de vapor desde la superficie son un elemento esencial en el balance hídrico, ya que representan uno de los mecanismos de conexión más importantes entre los procesos de la superficie terrestre con la dinámica atmosférica (Liu et al. 2016). A pesar de su importancia, desde el punto de vista metodológico, es una variable muy difícil de medir a escala regional (Rodell et al. 2004; Howell 1990).

El proceso mediante el cual tiene lugar la evapotranspiración, es el resultado de interacciones complejas entre fenómenos físicos, determinados principalmente por factores climáticos, composición y estado del suelo y condiciones de la cobertura vegetal presente. De manera de poder estudiar el fenómeno de forma más precisa, en la literatura se han propuesto definiciones y modelos conceptuales que buscan separar el efecto de las distintas componentes forzantes de la evapotranspiración, de modo de analizar los elementos que actúan como limitante del proceso. De esta forma, se define el concepto de evapotranspiración potencial (ET_P) como la máxima tasa de evaporación en condiciones óptimas de la vegetación y sin restricción de agua. Una de las ecuaciones fundamentales para el cálculo de ETP es la de Penman-Monteith (Shuttleworth, 1993), caracterizada por la ecuación:

$$\lambda_v ETP = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma}$$

Otro concepto de gran utilidad es el de evapotranspiración de referencia (ET_o). Este se introdujo para estudiar la demanda evapotranspirativa de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo de los cultivos y de las prácticas de manejo (Allen et al., 2005). Este concepto permite comparar valores medidos o estimados en diferentes localidades o en diferentes épocas del año, debido a que no depende del tipo de superficie analizada, siendo afectada únicamente por parámetros climáticos. La ecuación utilizada para calcular este parámetro es la ecuación FAO Penman-Monteith (Allen et al., 2005), según la ecuación: **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + (1 + 0,34 u_2)}$$

Tanto ET_P como ET_o son definiciones conceptuales para casos idealizados, fundamentalmente dependientes de las condiciones atmosféricas y de balance de energía en el sitio. Normalmente la tasa de evapotranspiración real por parte de la cobertura está por debajo de estos valores, debido a que las condiciones de la cobertura vegetal, tipo y estado del suelo y disponibilidad hídrica muchas veces difieren de manera importante a las consideradas por las ecuaciones precedentes.

Sin embargo, estos modelos conceptuales ofrecen la posibilidad de generar set de datos independientes útiles para evaluar el desempeño de modelos hidrológicos como los considerados en este estudio de balance hídrico.

1.2. METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA EL PRODUCTO DE VALIDACIÓN

Para validar los resultados del modelo hidrológico VIC respecto a las salidas del sistema por evapotranspiración, se desarrolló y aplicó una metodología basada en el balance de energía de la superficie, calculada a partir de información climática de superficie, complementada con información proveniente de plataformas satelitales.

Los de insumo para la metodología, se presentan en la Tabla 1 a continuación:

Tabla 1. Datos de entrada utilizados en la metodología de cálculo de ETr

Capas de información	Fuente	Resolución temporal	Disponibilidad temporal	Formato y resolución espacial
Información de superficie				
Temperatura máxima del aire	CR2MET V1.3	Diaria	1979 - 2015	Raster, 5km
Temperatura mínima del aire	CR2MET V1.3	Diaria	1979 - 2015	Raster, 5km
Radiación Global Horizontal	Explorador Solar (Depto. Geofísica U. Chile, Min. Energía)	Diaria	2004 - 2016	Raster, 1km
Información Satelital				
Albedo de superficie	MODIS (MCD19A3)	Cada 8 días	2001 - presente	HDF, 1km
Temperatura de superficie	MODIS (MYD11A1)	Diaria (día y noche)	2001 - presente	HDF, 1km
Clasificación de Cobertura de Suelo	Zhao et al., 2016	Año 2014, a temporal	2014	Raster, 30 m

Como primer paso de la metodología de cálculo, a partir de la ecuación general de radiación neta, se considera el cálculo de la radiación neta disponible en superficie, según la siguiente ecuación:

$$Rn_{i,j,k} = (1 - \alpha_{MOD\ i,j,k}) * Rg_{i,j,k} + 0.0864 * \varepsilon_{A\ i,j,k} * \sigma * (\bar{T}_{i,j,k} + 273)^4 - 0.0864 * \varepsilon_{C\ i,j,k} * \sigma * (\bar{T}_{s\ i,j,k} + 273)^4$$

Donde i, j, k corresponden al pixel i, día del año (día juliano j) y año k. De esta forma $Rn_{i,j,k}$ corresponde a la radiación neta disponible en el pixel i, día j y año k, $\alpha_{MOD\ i,j,k}$ al albedo de la superficie desde MODIS a nivel diario, $Rg_{i,j,k}$ la radiación global horizontal diaria obtenida desde el explorador solar, $\varepsilon_{A\ i,j,k}$ y $\varepsilon_{C\ i,j,k}$ la emisividad del aire y superficie respectivamente a escala diaria, $\bar{T}_{i,j,k}$ la temperatura promedio del aire diaria, $\bar{T}_{s\ i,j,k}$ la temperatura promedio de la superficie a nivel diario y σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 * 10^{-8}$).

La temperatura promedio del aire diaria está definida como:

$$\bar{T}_{i,j,k} = \frac{T_{x\ i,j,k} + T_{n\ i,j,k}}{2}$$

En donde $T_{x\ i,j,k}$ y $T_{n\ i,j,k}$ corresponden a las temperaturas del aire máximas y mínimas diarias a dos metros obtenidas del producto CR2MET.

Por su parte, la temperatura promedio de superficie está definida como:

$$\bar{T}_{s\ i,j,k} = \frac{T_{MOD-d\ i,j,k} + T_{MOD-n\ i,j,k}}{2}$$

En donde, T_{MOD-d} y T_{MOD-n} corresponden a las temperatura diurna (~13:50 hrs) y nocturna (~01:40 hrs) de la superficie captada por el sensor MODIS a nivel diario.

Por su parte, las emisividades de la cobertura y el aire, se definen, respectivamente como:

$$\varepsilon_{C\ i,j,k} = 0,95$$

$$\varepsilon_{A\ i,j,k} = 1,72 * \left(\frac{e_{A\ i,j,k}}{10 * (273 + \bar{T}_{i,j,k})} \right)^{1/7}$$

En donde $e_{A\ i,j,k}$ es la presión de vapor a saturación del aire a nivel diario en el pixel i , día j y año k , el cual se define como:

$$e_{A\ i,j,k} = 6,11 * e^{\left(\frac{T_{n\ i,j,k} * 17,27}{237,3 + T_{n\ i,j,k}} \right)}$$

A partir de la obtención de la radiación neta disponible en cada pixel, es necesario determinar la fracción de la energía utilizada en la generación de los flujos de calor sensible y latente. Este último será finalmente la evapotranspiración de la cobertura a considerar como elemento de validación del componente de validación obtenido desde el modelo VIC.

Esta metodología considera el análisis de las diferencias de temperatura entre la superficie y el aire circundante siguiendo lo propuesto por Jackson et al. (1981) y el trabajo seminal de Idso et al. (1981) . En términos simples, a mayor diferencia de temperatura, la energía disponible en la superficie se traduce en mayores flujos de calor sensible (calor), mientras que menores diferencias entre la temperatura de la superficie y el aire circundante indican mayor mayores flujos de calor latente en forma de evapotranspiración entre la superficie y la atmósfera.

En términos operativos, un primer paso consiste en identificar, para cada uso de suelo y por cada una de las cuencas, el píxel cuyo valor promedio de temperatura de superficie sea el máximo a nivel diario, a partir de la serie de temperatura superficial obtenida desde el sensor MODIS, tal como se presenta a continuación:

$$\bar{T}_{sx\ j,k} = \max(\bar{T}_{s\ i,j,k})$$

Debido a las diferencias entre las características y propiedades de las distintas coberturas existentes en las cuencas analizadas, una primera consideración, fue segmentar el análisis diferenciando las distintas coberturas de suelo presentes. Por lo anterior, el valor de $\bar{T}_{sx\ j,k,l}$ considera el término l , indicando que esa selección se realiza para los “ l ” tipos de coberturas presentes a partir del producto de cobertura de superficie.

Luego, a partir de las variables previamente definidas, y la obtención de la radiación neta para cada pixel, la resistencia aerodinámica de la cobertura es posible de obtener según la siguiente expresión:

$$ra_{i,j,k,l} = \frac{1200 * (\bar{T}_{sx\ j,k,l} - \bar{T}_{i,j,k,l})}{Rn_{i,j,k}}$$

Finalmente, la evapotranspiración real desde la superficie, será obtenida utilizando la siguiente expresión:

$$ET_{i,j,k,l} = \frac{Rn_{i,j,k} - \frac{1200 * (\bar{T}_{s\ i,j,k,l} - \bar{T}_{i,j,k,l})}{ra_{i,j,k,l}}}{2,5}$$

En donde $ET_{i,j,k,l}$ es la evapotranspiración real a nivel diario para todo el dominio considerado.

Para efectos del este proceso de cálculo, se considera j como variable entre valores 1 y 365 (día juliano) y k definido entre los años 2004 y 2015, definidos a partir de la disponibilidad de datos de radiación y producto grillado de temperatura, respectivamente.

El procedimiento fue realizado mediante un script escrito en lenguaje R a través de la interfaz RStudio con la ayuda de las librerías “ncdf4”, “phylin”, “data.table”, “rgdal”, “gdalUtils”, “raster”, “akima” y “parallel” para realizar el procedimiento de paralelización.

1.3. RESULTADOS

El algoritmo desarrollado, permite capturar la variabilidad espacial de la señal de evapotranspiración a nivel de cuenca, tal como se presenta en la Figura 1.

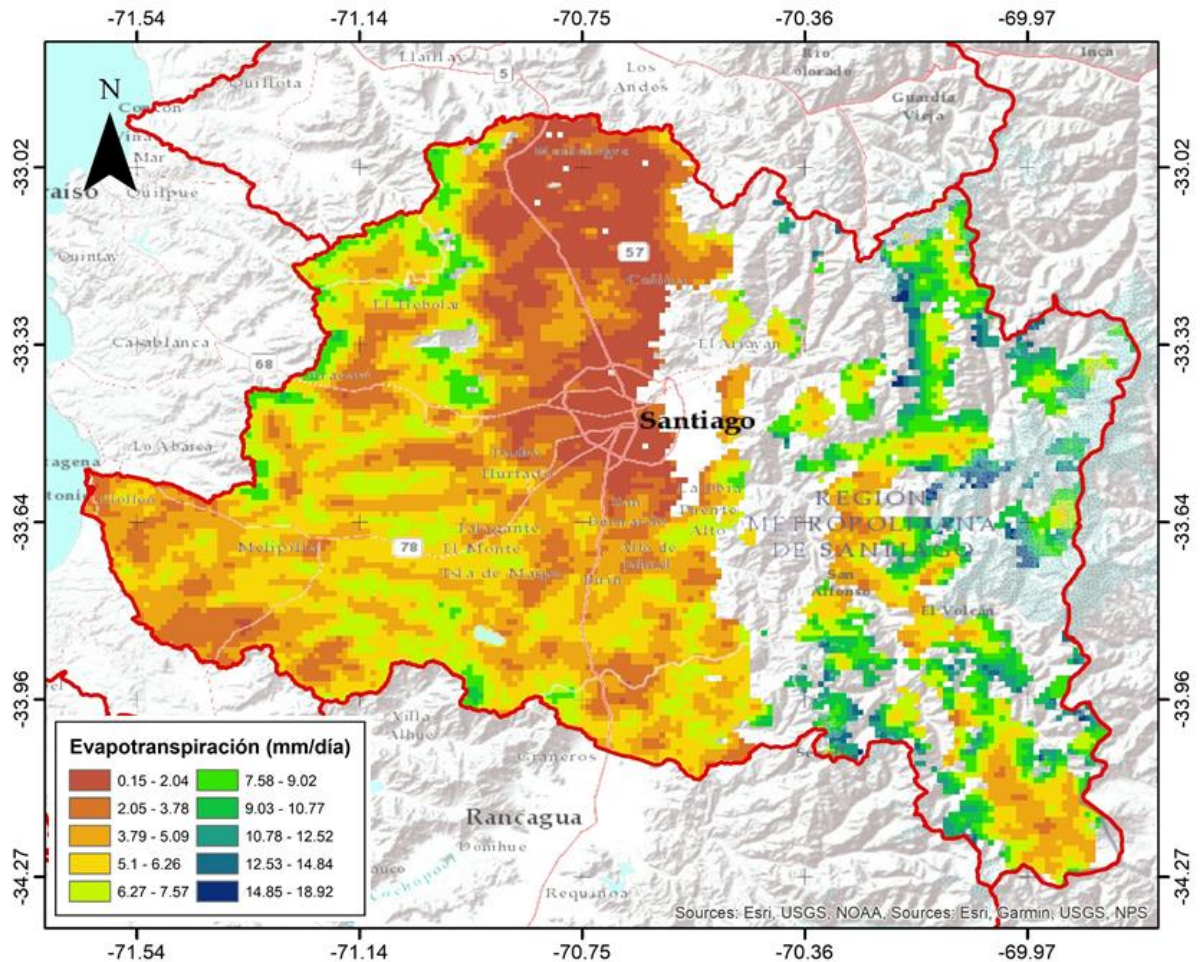


Figura 1. Evapotranspiración real estimada para en la cuenca del río Maipo para el día 25 de enero de 2008.

En lo que respecta a la variabilidad temporal, el proceso de cálculo responde a la temporalidad esperada para las variaciones de la evapotranspiración en función de la estacionalidad de las temperaturas, así como a la disponibilidad de agua, de manera particular, en zonas con cobertura vegetal importante.

Una primera validación del producto generado se implementó contrastando los valores obtenidos de Evapotranspiración real calculada (ETr) con la Evapotranspiración Potencial (ETo) reportada por la estación agrometeorológica de la red Agroclima para la localidad de Pirque¹ (Figura 2).

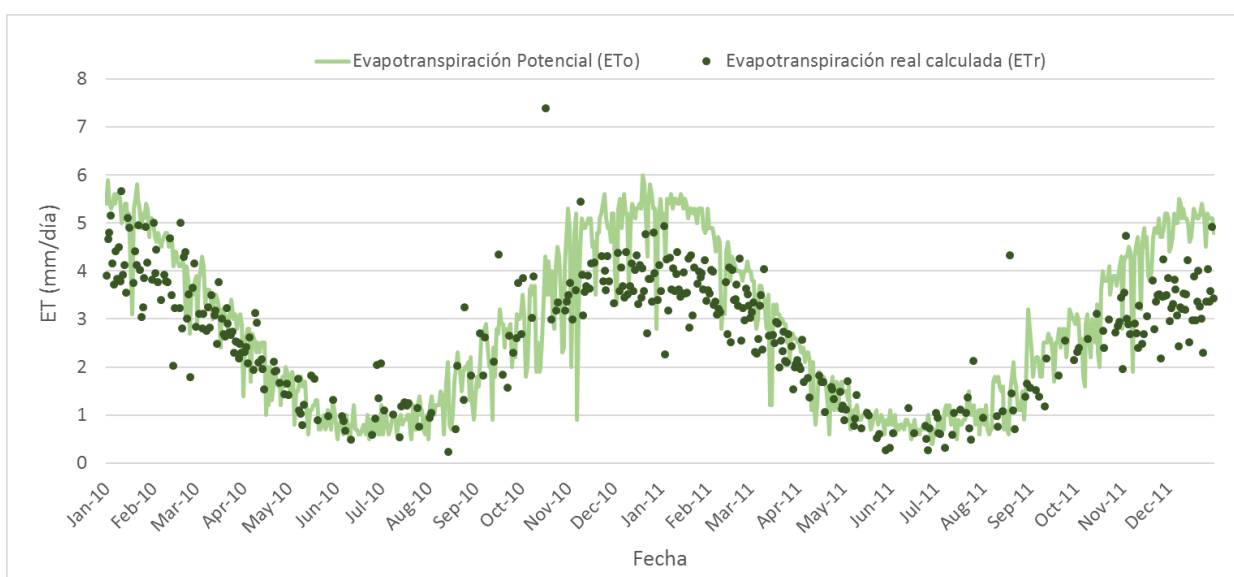


Figura 2. Series de evapotranspiración de referencia calculada por la estación agrometeorológica en la estación Pirque de la red Agroclima (ETo) y Evapotranspiración real calculada (ETr) en el pixel correspondiente a la estación para los años 2010 y 2011.

¹ <http://www.agroclima.cl/InformesAgroclima/InformesAgroclimaticos.aspx?IdEst=217&Infor=23>

2. REFERENCIAS

Allen, R. G., Pereira, L. S., Smith, M., Raes, D., & Wright, J. L. (2005). FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(1), 2-13.

Chao, Y.; Feng, D., Yua, L., Wang, X., Chen, Y., Hernández, H.J., Galleguillos, M., Estados, C., Biging, G., Radke, J. & Gong, P. 2016. Detailed dynamic land cover mapping of Chile: accuracy improvement by integrating multi-seasonal land cover data. *Remote Sensing of Environment* 183, 170–185.

R.D. Jackson, S.B. Idso, R.J. Reginato, P.J. Pinter Canopy temperature as a crop water stress indicator *Water Resource Res.*, 7 (1981), pp. 1133-1138

Howell, T. A. (1990). Relationships between crop production and transpiration, evapotranspiration, and irrigation. *Agronomy (USA)*.ISO 690.

S.B. Idso, R.D. Jackson, P.J. Pinter, J.L. Hatfield Normalizing the stress – degree – day parameter for environmental variability *Agric. Meteorol.*, 24 (1981), pp. 45-55

Liu, W., Wang, L., Zhou, J., Li, Y., Sun, F., Fu, G., Li, X. and Sang, Y.F., 2016. A worldwide evaluation of basin-scale evapotranspiration estimates against the water balance method. *Journal of Hydrology*, 538, pp.82-95.

Rodell, M., Famiglietti, J.S., Chen, J., Seneviratne, S.I., Viterbo, P., Holl, S. and Wilson, C.R., 2004. Basin scale estimates of evapotranspiration using GRACE and other observations. *Geophysical Research Letters*, 31(20).

Shuttleworth, W. J. (1993). *Handbook of hydrology*. Civil Engineering.