

TASA DIARIA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA UNA MACRÓFITA EMPLEANDO VARIABLES METEOROLÓGICAS

Carlos Marcelo Scuderi⁽¹⁾, Adolfo Villanueva⁽²⁾ y David da Motta Marques⁽³⁾

⁽¹⁾Departamento de Hidráulica / Centro Universitario Rosario de Investigaciones HidroAmbientales
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario
Riobamba 250 bis. (2000). Rosario. Santa Fe. Argentina

⁽²⁾Instituto de Hidrología de Llanuras. Universidad Nacional del Centro
República de Italia 780. Azul. Buenos Aires. Argentina

⁽³⁾Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves 9500. Porto Alegre. Rio Grande do Sul. Brasil
e_mail: cscuderi@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

La evapotranspiración (ET) es, generalmente, la principal variable de salida del ciclo hidrológico; siendo de importancia su cuantificación para el gerenciamiento del recurso hídrico. En este trabajo se presenta una metodología para estimar indirectamente la tasa diaria de ET de una macrófita bajo condiciones de clima templado húmedo. Paralelamente, se implementó un experimento con tanques enterrados donde se obtuvo una tasa de ET media diaria de 5.2 mm día⁻¹. Dado que la tasa de ET es función de características climáticas, de suelo y de la vegetación; y que de éstos usualmente se registran rutinariamente las primeras, se estudia la tasa de ET en función de 12 variables meteorológicas medidas in situ (entre ellas radiación solar, temperaturas, humedad relativa, velocidad del viento y presión atmosférica). Se implementaron modelos de regresión lineal simple y múltiple para evaluar el grado de correlación entre las tasas de ET medidas experimentalmente y las variables meteorológicas. El análisis de las regresiones indica que la radiación solar recibida es la variable individual que mejor explica el proceso de ET ($R^2 = 0.54$), mientras que cuando se considera mayor número de variables, además de la radiación, intervienen variables relacionadas con la temperatura del aire (temperatura mínima, temperatura del punto de rocío y temperatura máxima) incrementando apreciablemente el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.72$). La introducción de un número de variables mayor a cuatro no produce mejoras sustanciales en los resultados.

Palabras clave: Evapotranspiración, variables meteorológicas, macrófitas.

ABSTRACT

Evapotranspiration (ET) is usually the main output of hydrological cycle hence its quantification is important for water resources management. This paper presents a methodology for estimating indirectly the daily ET rates from a macrophyte under humid temperate weather. Simultaneously was implemented an experiment where the mean daily measured ET rate was 5.2 mm day⁻¹. Because the ET rate is a function of climatic, soil and vegetation characteristics, and that usually only the first one are recorded routinely, the daily ET rates were studied based on 12 measured meteorological variables (including solar radiation, temperature, relative humidity, wind speed and atmospheric pressure). Single and multiple linear regression models was implemented to assess the correlation between measured ET rates and weather variables. The regression analysis indicates that solar radiation is the variable that best explains the process of ET ($R^2 = 0.54$). When more variables are considered in addition to radiation, appear variables related to air temperature (minimum temperature, dew point temperature and maximum temperature). Use of multiple variables increased significantly the coefficient of determination ($R^2 = 0.72$). Using more variables does not improve results.

Keywords: Evapotranspiration, meteorological variables, macrophytes.

INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración (ET) constituye, en la generalidad de los casos, la mayor variable de salida del ciclo hidrológico. Dado que el agua es un recurso escaso y debido a la sobreexplotación a la que es sometido actualmente (Sanij et al., 2004), la comprensión del ciclo hidrológico requiere la cuantificación precisa de todos sus componentes, entre ellos la ET. Se puede definir el proceso de ET como la suma de dos fenómenos que suceden en forma conjunta en la naturaleza: la evaporación y la transpiración; sin embargo, dada la dificultad para medirlos separadamente se evalúan como uno solo.

Huschke (1970) apud Berlatto y Molion (1981) puntualiza que la evaporación es el proceso físico por el cual un líquido (en este caso agua) se transforma en gas (en este caso vapor de agua). Allen et al. (1998) consideran la evaporación (E) como la sucesión de dos etapas: la primera, en la que el agua líquida es convertida en vapor de agua la llaman vaporización; mientras que la segunda, en la que el agua es removida de la superficie evaporante, la denominan remoción de vapor. Cuando el agua líquida que se encuentra en el tejido vegetal se vaporiza y luego es removida hacia la atmósfera, la evaporación se denomina transpiración. El cambio de estado del agua de líquido a vapor requiere de energía externa, la misma procede principalmente del sol y la atmósfera y en menor grado de la temperatura ambiente. Esta energía recibe el nombre de calor latente de evaporación o vaporización λ , variando levemente en función de la temperatura (Allen et al., op cit.).

El proceso de evaporación puede ser sintetizado de la siguiente manera (Zimmermann, 2000): las moléculas de agua están en continuo movimiento dentro de la masa de agua líquida. Las moléculas que alcanzan la superficie del líquido son calentadas por la radiación solar; esta ganancia de energía incrementa la temperatura, velocidad y por lo tanto la energía cinética de las mismas hasta que algunas de ellas se liberan de la atracción molecular, atravesando la interfaz líquido-gas y convirtiéndose en vapor. Por otro lado, la capa de aire que se halla encima de la superficie se satura, ocurriendo en forma conjunta con la evaporación el fenómeno inverso; las moléculas se condensan volviendo al estado líquido. Si la diferencia entre las moléculas que abandonan el líquido y las que retornan a él es mayor a cero, estamos en presencia de evaporación; caso contrario se habla de condensación.

Para completar el proceso y garantizar su continuidad temporal, es necesario que la capa de aire que se halla encima de la superficie evaporante tenga la capacidad de admitir vapor de agua (Zimmermann, op cit.); ya que a medida que el agua se evapora el aire circundante incrementa su contenido de humedad progresivamente. Esta capacidad se denomina poder evaporante de la atmósfera y se define como la diferencia de presiones de vapor de agua entre la superficie evaporante y la atmósfera circundante; siendo la fuerza impulsora que da continuidad al proceso (Allen et al., op cit.). La sustitución del aire húmedo con un aire más seco depende en gran medida de la velocidad del viento.

La transpiración (T) se define como el fenómeno físico-biológico por el cual el agua, absorbida desde el suelo a través de las raíces, cambia de estado líquido a vapor por medio del metabolismo de las plantas, siendo posteriormente removida hacia la atmósfera (Zimmermann, op cit.). El proceso puede dividirse en dos etapas: en la primera, el agua es convertida de líquido a vapor en el interior de la planta y es eliminada a través de los estomas, que son pequeñas aberturas o poros en los cuales se producen los intercambios gaseosos (Sutcliffe, 1980), que se encuentran en la superficie de la planta. La segunda etapa se produce desde la superficie de la planta y corresponde a la difusión del vapor hacia la capa fronteriza y posteriormente a la atmósfera (Larcher, 1986).

En la fotosíntesis, la planta expone al aire una amplia superficie de paredes celulares húmedas para facilitar la absorción de CO_2 ; por lo que las hojas adquieren gran cantidad de energía que provoca su calentamiento. La respuesta desarrollada por la planta para evitar dicho calentamiento excesivo es la transpiración (Sutcliffe, op cit.; Larcher, 1986; Blad et al., 1988). La mayor parte del agua absorbida por la planta es eliminada en la transpiración; por ejemplo Miller (1938) apud Sutcliffe (1980) calculó para una planta de maíz (*Zea mays*) que el 98% es transpirado, el 1.8% queda retenido en el tejido vegetal y solamente el 0.2% es utilizado en la fotosíntesis. El uso consuntivo indica la sumatoria del agua transpirada por las plantas, el agua evaporada por el suelo y el agua retenida en el tejido vegetal debido a la actividad metabólica. Dado que esta última cantidad es del orden del 2% del agua consumida por la planta, en la práctica los términos evapotranspiración y uso consuntivo se consideran sinónimos (Berlatto y Molion, 1981).

Tanto la evaporación como la transpiración dependen del aporte de energía al sistema, otorgado fundamentalmente por la radiación y la temperatura del aire, y en menor medida de la humedad del aire y de la velocidad horizontal del viento. Cuando se estudia la transpiración, intervienen además parámetros del suelo y de la vegetación propiamente dicha. Entre los primeros, pueden citarse principalmente al contenido de humedad del suelo, permeabilidad, capilaridad y profundidad de la freática (Gangopadhyaya et al., 1966; Larcher, 1986). Mientras que de los parámetros de la vegetación pueden enumerarse: índice de área foliar, albedo, tipo y estadio fenológico, altura, grado de dispersión y flexibilidad, profundidad de la zona activa de las raíces y presencia de enfermedades (Ziemer, 1979; Sutcliffe, 1980; Berlato y Molion, 1981; Allen et al., 1998).

Un breve comentario merece la terminología referida a evaporación o evapotranspiración que ofrece cierto grado de incertidumbre cuando se utiliza. Thornthwaite, en la década de 1940, acuña el término evapotranspiración potencial (ETp) dentro de una propuesta para una nueva clasificación climática (Granger, 1989). La ETp se define como el agua utilizada por una extensa superficie vegetada en crecimiento activo, que cubre totalmente el terreno sin restricciones de humedad (Pereira et al., 1997). El requisito de superficie extensa garantizaría que el proceso de ET sea producto de intercambios de energía verticales solamente, despreciando efectos de advección. En el año 1956, Penman, redefine la ETp como el total de agua transferida a la atmósfera, por unidad de tiempo, de una superficie extensa completamente cubierta de vegetación de porte bajo y altura uniforme sin limitación de agua (Berlato y Molion, 1981). Mientras que la expresión evapotranspiración real o efectiva (ET) refiere a la pérdida de agua hacia la atmósfera, por evaporación y evapotranspiración, bajo las condiciones atmosféricas y de contenido de humedad del suelo existentes (Gangopadhyaya et al., 1966).

Doorenbos y Pruitt (1977) definieron la evapotranspiración de referencia (ETo) como la tasa de evapotranspiración producida por una superficie extensa cubierta con césped verde de altura entre 8 y 15 cm, uniforme y en crecimiento activo, que cubre totalmente el suelo y sin deficiencia de agua. Smith (1991) apud Pereira et al. (1997) basado en la definición anterior, promueve el uso de un cultivo hipotético con 12 cm de altura, albedo igual a 0.23 y resistencia al transporte de vapor de agua igual a 69 s m^{-1} . El concepto de ETo expresa el poder eva-

porante de la atmósfera para un sitio y periodo del año específicos, independientemente de las características del cultivo y del suelo, siendo un índice climático que puede ser estimado a partir de variables meteorológicas (Allen et al., 1998).

Los autores anteriores emplean también los términos evapotranspiración de cultivo en condiciones estándar (ETc) y no estándar (ETcaj). El primero constituye la evapotranspiración de un cultivo libre de enfermedades, bien fertilizado, creciendo en un campo amplio en condiciones óptimas de humedad y de suelo y que alcanza la máxima producción para las condiciones climáticas dadas. Como la ETc es función del tipo y estado de crecimiento del cultivo, la relación entre ETo y ETc es un coeficiente adimensional (coeficiente de cultivo Kc), que se determina empíricamente y es diferente para cada cultivo y etapa de crecimiento. Evett et al. (1998) citan que los coeficientes Kc no son extrapolables entre regiones sin considerar el método de cálculo de la ETo. El segundo concepto (ETcaj) representa la evapotranspiración de un cultivo creciendo en condiciones de manejo y ambientales diferentes a las condiciones estándar. Este valor se calcula utilizando un coeficiente de estrés hídrico (Ks) y ajustando el coeficiente Kc según otros estreses y restricciones ambientales y de manejo.

Pereira et al. (1997) señalan que se está en presencia de evapotranspiración de oasis cuando se producen condiciones de advección (transporte horizontal de calor sensible debido al viento), obteniendo valores exageradamente altos de evapotranspiración. Por lo general la advección se produce en áreas pequeñas bien húmedas rodeadas de un área seca (Tanner, 1957 apud Dugas y Bland, 1989).

La expresión evapotranspiración máxima (ETm) genera vaguedad, ya que para Tanner y Jury hace referencia a la condición potencial ETp, para Villa Nova y Reichardt indica la condición de oasis (ambos citados en Pereira et al., 1997), mientras que Doorenbos y Kassam (1980) la relacionan con la ETc. Por lo tanto, para evitar interpretaciones erróneas, se desalienta el uso de este término.

Valores diarios de tasas de ET confiables son escasos y de difícil obtención, debido a la interrelación existente entre variables climáticas, parámetros del suelo y características de la vegetación. Además, la necesidad de instalaciones y equipamientos especiales y de alto costo (Pereira et al., 1997) hace que su uso se justifique solamente a nivel de investigación.

Por otra parte, la medición de esta variable precisa de largos períodos de tiempo (como mínimo una estación de crecimiento completa), personal técnico para mantenimiento de las instalaciones y personal científico capacitado para el tratamiento e interpretación de los resultados.

Existen varios enfoques para la determinación de la tasa de ET, basados tanto en principios físicos y fisiológicos, como en ecuaciones empíricas (Berlato y Molion, 1981); sin embargo el análisis de la literatura permite obtener dos conclusiones: a) no existe unanimidad en la comunidad científica respecto a la superioridad de un método sobre otro, y b) cuanto más preciso sea el método, mayor será la demanda de datos requeridos para su implementación. A este respecto, Wallace (1995) indica que gran parte de los modelos de evaporación se basan en variables atmosféricas, estimando habitualmente dicha magnitud a una tasa estándar, es decir, con demanda atmosférica sin limitación de humedad en la superficie.

Teniendo presente esta observación y, dado que generalmente los datos que se encuentran disponibles en los sitios de medición de los Servicios Meteorológicos son las variables meteorológicas determinadas en forma rutinaria; es válido pensar en estimar el valor de la tasa diaria de ET solamente en función de estas últimas. El objetivo de este trabajo es estudiar, a escala diaria, el grado de correlación existente entre la tasa de ET (determinada experimentalmente) para una cierta especie vegetal sometida a condiciones climáticas particulares y las variables meteorológicas rutinarias medidas por una estación meteorológica automática.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio y materiales empleados

La medición de la tasa diaria de ET se realizó a través de un experimento, en el predio del Instituto de Pesquisas Hidráulicas, situado en la ciudad de Porto Alegre (Brasil), de coordenadas 30° 02' S y 51° 22' O, a una altitud de 47 m sobre el nivel del mar. El clima del lugar es templado húmedo con ausencia de periodo seco, siendo la temperatura media anual de 19.5 °C y la precipitación media de 1347 mm año⁻¹ (INMET, 1992). Las fechas de inicio y finalización de la experiencia fueron el 23/06/2004 y el 12/03/2005 respectivamente, con

una duración de 263 días; comprendiendo las estaciones de invierno y primavera de 2004 y el verano del bienio 2004-2005.

Para determinar la tasa diaria de ET se utilizó un tanque enterrado de forma cilíndrica de 775 mm de profundidad y 1471 mm de diámetro (1.70 m² de superficie de boca); conteniendo suelo, agua y vegetación. Paralelamente se dispuso otro tanque similar conteniendo solamente agua y un tanque clase A, que sirvieron como comparación (Figura 1). Todos los resultados que se presentarán en este trabajo solamente involucran las mediciones realizadas en el primero de los tanques.



Figura 1. Experimento: tanques enterrados y tanque clase A.

La especie vegetal empleada es una macrófita acuática emergente (*Zizaniopsis bonariensis*) de amplia difusión en el sur de Brasil, Uruguay y el este de la Argentina. En cuanto a los aspectos morfológicos, Cook (1974) destaca que es una planta perenne, de hojas con anchos entre 10 y 30 mm, alcanzando alturas entre 1 y 3 m y terminando en forma puntiaguda (Figura 2).



Figura 2. Detalle de la *Zizaniopsis bonariensis*.

Para medir las fluctuaciones diarias del nivel de agua en el tanque y así calcular en forma indirecta la tasa de ET, se utilizó un sensor transductor de presión (marca WIKA, modelo S-10). Además se midió la temperatura superficial del agua en el tanque mediante una sonda de temperatura sumergible. El tiempo de muestreo de los sensores es de 1 minuto, sin embargo se graba un dato cada 15 minutos obtenido como el promedio de las 15 mediciones efectuadas en dicho intervalo. El dato es registrado en un logger y la descarga de los mismos se hace mensualmente a través de una computadora portátil. La energía requerida por los sensores se suministra por medio de una batería eléctrica.

Las variables meteorológicas fueron determinadas empleando una estación meteorológica automática que se halla en el predio del Instituto de Pesquisas Hidráulicas (marca DAVIS, modelo GroWeather.), que es alimentada a través de un panel solar (Figura 3). La frecuencia de registro de la estación es de 15 minutos siendo las variables meteorológicas medidas las siguientes: temperaturas mínima, media y máxima del aire, radiación solar, presión atmosférica, velocidad horizontal del viento, precipitación, humedad y temperatura del punto de rocío. Mayor información acerca del experimento se puede consultar en Scuderi (2010).



Figura 3. Estación meteorológica automática.

Un aspecto importante a considerar es la distancia entre el lugar donde se mide la tasa de ET y el sitio donde está instalada la estación meteorológica, ya que habitualmente no es el mismo. En este caso la distancia es de 700 m aproximadamente, valor coherente con los indicados en la literatura consultada, que abarcan desde los 500 m hasta los 24 km (Russell, 1980; DeBusk et al., 1983; Herbst y Kappen, 1999; Pauliukonis y Schneider, 2001).

Respecto de la representatividad de los registros de la estación meteorológica, los datos que pueden verse afectados por la proximidad de edificios son principalmente el viento (más precisamente su velocidad) y la humedad del aire. El movimiento del viento es perturbado por los edificios de los alrededores (Figura 3), sin embargo el lugar de experimentación se sitúa en una depresión del terreno y además se encuentra rodeado por vegetación con una altura promedio de entre 40 a 80 cm; razón por la cual puede suponerse que los tanques están en una condición de abrigo del viento.

Por otro lado, la falta de recambio del aire debido al efecto de abrigo del viento provocado por las construcciones, puede incrementar el contenido de humedad del aire. No obstante, el sitio de experimentación se encuentra adyacente a un cuerpo de agua importante que puede llegar a producir efectos semejantes a los citados anteriormente.

Análisis de calidad de los datos meteorológicos

Precipitación

La precipitación diaria medida en la estación meteorológica fue contrastada con una observación cualitativa (del tipo llueve/no llueve) que registraba diariamente el autor; el día en el cual se "mide" lluvia es eliminado para la evaluación de la tasa de ET. En este sentido, distintos autores fijan diferentes límites o umbrales para realizar este descarte; por ejemplo Pauliukonis y Schneider (2001) no consideran días con más de 2.5 mm de lluvia, mientras que Koerselman y Beltman (1988) eliminan los días con registros mayores a 0.5 mm, en tanto que Howell et al. (1998) fijan 0.1 mm como límite. El criterio adoptado en este trabajo fue descartar días con lluvias superiores a 0.2 mm día⁻¹, por ser éste un valor obtenido con cierta frecuencia en la estación meteorológica, que puede ser indicativo de procesos de condensación de agua dentro del sistema registrador de lluvia.

El día 22/12/2004 se registró una irregularidad en la medición de lluvia, entre el valor dado por la estación meteorológica de 195.2 mm y el dato de no ocurrencia de lluvia constatado por el autor. Para solucionar este inconveniente, fueron contrastados los datos de precipitación mensual de la estación meteorológica automática con la estación del Instituto Nacional de Meteorología (INMET) situada en la ciudad de Porto Alegre; distante unos 6 km de la anterior, a través de la utilización del método de dobles acumulaciones.

Temperaturas del aire

Los datos diarios de temperaturas máxima ($T_{\text{máx}}$), media (T_{med}), mínima ($T_{\text{mín}}$) y de rocío (T_{roc}) fueron sometidos a la técnica del intervalo intercuartílico o 'box-plot' (Montgomery y Runger, 2003) para detectar posibles outliers, es decir valores que se alejan significativamente del conjunto de valores medidos (Liu et al., 2004). Además de aplicar dicho procedimiento, fue verificado que para cada día se cumpliera la siguiente relación: $T_{\text{máx}} > T_{\text{med}} > T_{\text{mín}} > T_{\text{roc}}$.

Radiación solar

Los valores diarios de radiación solar medidos fueron contrastados con la radiación solar para cielo limpio R_{so} , es decir considerando una situación de cielo sin nubes; utilizando este parámetro como indicativo de un 'límite máximo'. Para realizar esta comparación se aplicó la metodología sugerida por Allen (1996) apud Jensen et al. (1997), empleando la siguiente ecuación empírica:

$$R_{\text{so}} = (0.75 + 0.0002 z) R_a \quad (1)$$

donde R_{so} es la radiación solar de onda corta ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), z es la altitud de la estación meteorológica con relación al nivel del mar (m), y R_a es la radiación extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) que puede ser calculada en forma teórica (ver Anexo).

Humedad, presión, y velocidad del viento

Los registros de valores medios diarios de presión atmosférica, humedad del aire y velocidad horizontal del viento fueron analizados por inspección visual, con el objetivo de verificar la ocurrencia de algún valor anómalo.

Correlación entre tasas de ET y variables meteorológicas

Con motivo de establecer el grado de correlación entre la tasa diaria de ET medida experimentalmente y los parámetros meteorológicos que se registran rutinariamente en las estaciones automáticas, fueron consideradas las siguientes 12 variables: temperatura mínima, temperatura media, temperatura máxima, temperatura del punto de rocío, radiación solar, presión atmosférica, velocidad horizontal del viento, humedad relativa mínima, humedad relativa media, humedad relativa máxima, la temperatura diaria media (valor medio de las temperaturas medidas durante la parte del día donde se registran datos de radiación solar) y cantidad de horas diarias con luz

solar (definida como la relación entre la cantidad de horas diurnas de un día específico y el total de horas de luz solar anual).

Por otra parte, fueron calculados el déficit de presión de vapor y la radiación solar extraterrestre como otras variables a ser correlacionadas con las tasas de ET. Las ecuaciones necesarias para obtener estas variables son presentadas en el Anexo Procedimientos de Cálculo.

Los modelos propuestos para realizar la correlación fueron el de regresión lineal simple (RLS) y el de regresión lineal múltiple (RLM). El primero de ellos relaciona la tasa de ET con cada variable meteorológica en forma aislada, adoptando la siguiente expresión:

$$ET_i' = aV_i + b \quad (2)$$

siendo ET_i' la tasa de ET para el día i que se obtiene de aplicar la ecuación de regresión a la variable meteorológica considerada; a y b las constantes de regresión (pendiente y ordenada al origen, respectivamente); y V_i la variable meteorológica analizada para el día i .

El modelo RLM relaciona la tasa de ET con más de una variable meteorológica en forma simultánea. En este estudio se calcularon regresiones múltiples con 2, 3 y 4 variables como máximo. Las expresiones resultantes son las indicadas a continuación:

$$ET_i' = aV1_i + bV2_i + c \quad (3)$$

$$ET_i' = aV1_i + bV2_i + cV3_i + d \quad (4)$$

$$ET_i' = aV1_i + bV2_i + cV3_i + dV4_i + e \quad (5)$$

en que $V1_i$, $V2_i$, $V3_i$ y $V4_i$ son las variables meteorológicas consideradas para el día i ; y a , b , c , d y e son las constantes de regresión. Cabe destacar que las constantes y las variables son diferentes en cada una de las ecuaciones.

El método utilizado para realizar el ajuste de las regresiones fue el de mínimos cuadrados. Por otro lado, los parámetros estadísticos que se utilizaron para evaluar la calidad de las regresiones fueron el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el test de Fisher (F),

este último para testear la significancia del modelo aplicado (Goldenfum, 2000). Las expresiones para cada uno de ellos son las siguientes:

$$R^2 = \frac{[\sum (ET_i - \overline{ET}) \cdot (ET_i' - \overline{ET}')^2]}{\sum (ET_i - \overline{ET})^2 \cdot \sum (ET_i' - \overline{ET}')^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (ET_i - ET_i')^2}{n - gl}} \quad (7)$$

$$F = \frac{\sum (ET_i' - ET)^2}{\sum (ET_i - ET_i')^2} (n - gl) \quad (8)$$

en las cuales ET_i es la tasa diaria de ET medida, \overline{ET} es el valor medio de la tasa diaria de ET medida para todo el período, ET_i' es la tasa diaria de ET calculada a partir de la/s variable/s meteorológica/s usada/s en la regresión, \overline{ET}' es el valor medio de la tasa diaria de ET calculada mediante regresión para todo el período, n es el tamaño de la muestra, y gl son los grados de libertad (la suma del número de variables en juego más 1).

RESULTADOS

Datos meteorológicos

En esta sección se presentan los valores medidos de las variables meteorológicas en la estación automática, realizando para cada una de ellas algunas observaciones particulares.

Precipitación

La precipitación diaria medida entre las fechas 20/jun/04 y 12/mar/05 en la estación automática situada en cercanías del predio experimental se exhibe en la Figura 4. Seguidamente se analiza el valor anómalo registrado de 195.2 mm correspondiente al día 22 de diciembre (no representado en la figura anterior). Para realizar este análisis fue contrastada la estación automática con la estación del INMET de Porto Alegre; los registros de precipitación mensual de ambas estaciones son transcritos en la Tabla 1, mientras que la aplicación del método de dobles acumulaciones a ambas estaciones se presenta en la Figura 5. De la observación de esta figura surge que en el mes de noviembre se produce

una discontinuidad (dado que solo una de las estaciones registró lluvia) que puede deberse a un error en la estación del INMET. Si nos centramos en el mes de diciembre veremos que ambas estaciones registraron una cuantía de lluvia mensual parecida (del orden de 19 mm), razón por la cual se decide remover el valor registrado de 195.2 mm de la serie de precipitaciones.

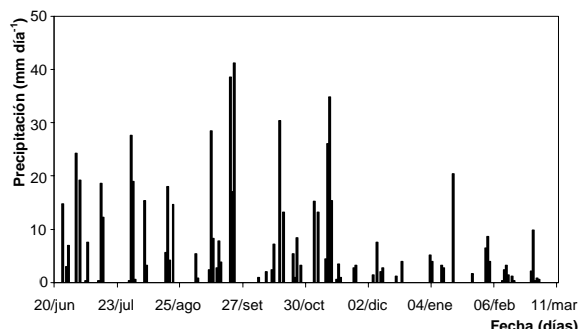


Figura 4. Precipitación diaria entre 20/06/04 y 12/03/05.

Tabla 1. Precipitación mensual (comparación).

mes	IPH (mm)	INMET (mm) ⁽¹⁾
jun/04	97.4	97.4
jul/04	129.6	137.6
ago/04	61.6	38.4
set/04	156.4	142.0
oct/04	74.2	62.8
nov/04	120.0	0.0
dic/04	19.0	18.4
ene/05	37.2	28.8
feb/05	41.2	30.3
mar/05	119.4	135.6

(1) Fuente: <http://www.agriempo.gov.br>

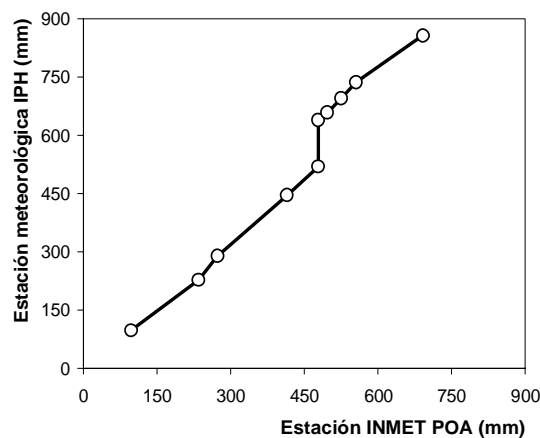


Figura 5. Método de dobles acumulaciones.

Temperaturas del aire

Analizando las series de datos de las diferentes temperaturas del aire registradas (máxima, media, mínima y de punto de rocío) a través de la técnica de 'box-plot' se determinó la ausencia de 'outliers'.

En la Figura 6 se muestra la evolución temporal, durante la realización del experimento, de la temperatura media diaria del aire (las otras temperaturas presentaron un comportamiento semejante); con la presencia de un mínimo de 6.1 °C (11 de julio) y un máximo de 28.5 °C (9 de enero).

A modo de resumen, en la Figura 7, se representan las temperaturas máxima, media, mínima y de rocío medias mensuales junto con el número de días con datos; en la misma se evidencia el cumplimiento de la relación $T_{max} > T_{med} > T_{min} > T_{roc}$. Las tendencias presentadas en las dos últimas figuras coinciden con los valores normales del período 1961-1990, registrados en la estación meteorológica del INMET en Porto Alegre.

Radiación solar

La radiación solar diaria recibida medida es contrastada con la radiación solar de cielo sin nubes R_{so} ; en la Figura 8 se muestran los valores medidos junto con la curva representativa de R_{so} . El valor empírico de R_{so} (ecuación (1)) no puede usarse rigurosamente como límite máximo de la radiación solar recibida; sin embargo si observamos la Figura 8 puede concluirse que prácticamente es una envolvente máxima de los valores medidos (solamente se registraron 4 valores mayores al respectivo valor de R_{so}).

De la comparación de las Figuras 7 y 8, se infiere que tanto la temperatura como la radiación presentan una tendencia semejante; valores mínimos en invierno que evolucionan en forma creciente hasta alcanzar los máximos en verano y disminuyendo posteriormente. Este comportamiento coincide con la apreciación citada por Berlato y Molion (1981) de que ambas magnitudes se encuentran casi en fase a lo largo de todo el año.

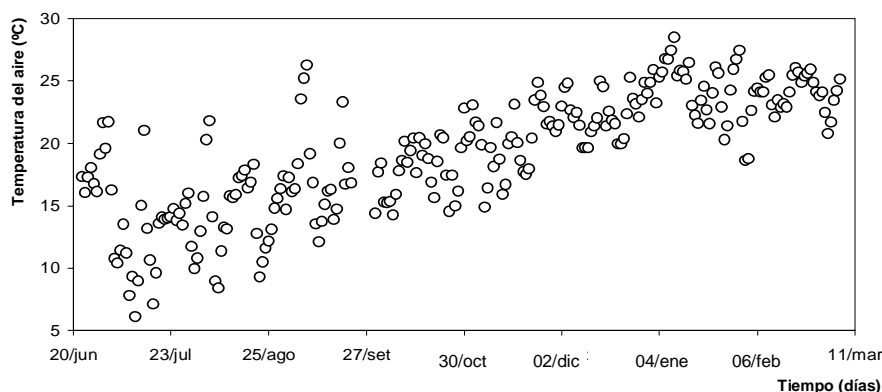


Figura 6. Temperatura media diaria del aire.

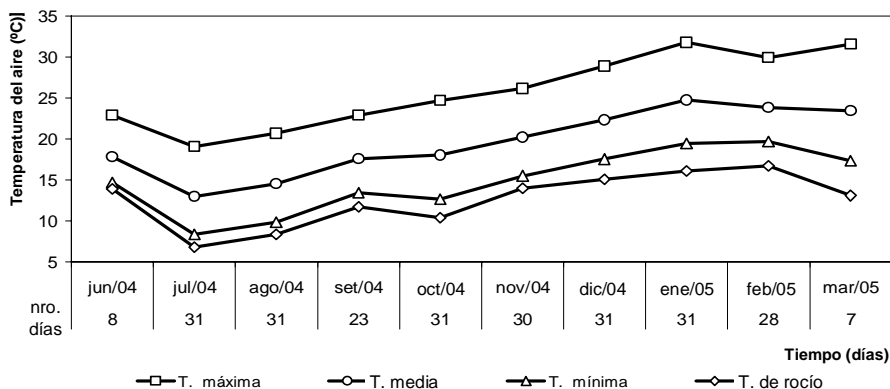


Figura 7. Temperaturas máxima, media, mínima y de punto de rocío medias mensuales.

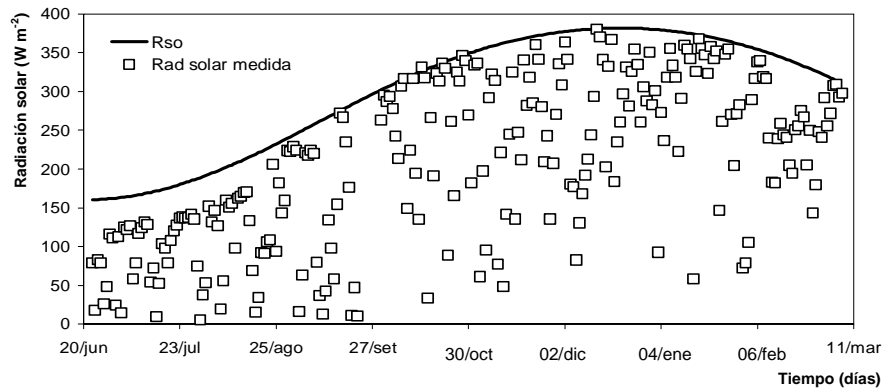


Figura 8. Comparación entre radiación solar diaria medida y Rso.

Humedad relativa

En la Figura 9 se presentan los registros de humedad relativa media diaria del aire. La misma fluctúa entre un mínimo de 54.1% (26 de diciembre) y un máximo de 97.3% (21 de setiembre). Una verificación simple que se efectuó con estos datos (todos los registros tomados cada 15 minutos) fue constatar que los valores medidos se encontraran comprendidos entre 0 y 100%, obteniendo un mínimo de 27% y un máximo de 98%.

Se observa que los valores de humedad relativa media diaria, además de tener un comportamiento variable, presentan una leve tendencia en alcanzar los mayores valores en la época de invierno e inversamente los menores en la estación de verano. Hecho que se corrobora en la Figura 10, donde se comparan los valores medios mensuales de temperatura y humedad relativa del aire.

Presión atmosférica

La presión atmosférica media diaria se muestra en la Figura 11, junto con el valor de la presión normal para una altura de 80 m snm, altura correspondiente a la estación meteorológica (en línea de trazos). La corrección de la presión atmosférica en función de la altura (Allen et al., 1998) se efectuó mediante la ecuación (9), obteniendo un valor de 1003.6 mbar:

$$P = 1013 \left(\frac{293 - 0.0065 z}{293} \right)^{5.26} \tag{9}$$

La variación de la presión atmosférica comprendió un mínimo de 990.4 mbar (11 de noviembre) y un máximo de 1021.6 mbar (17 de julio). Las tendencias seguidas durante el período de evaluación de la presión atmosférica y de la humedad relativa medias diarias son semejantes.

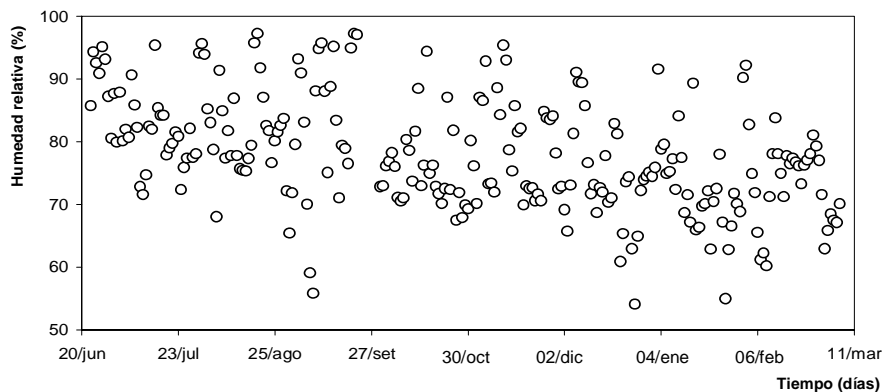


Figura 9. Humedad relativa media diaria del aire.

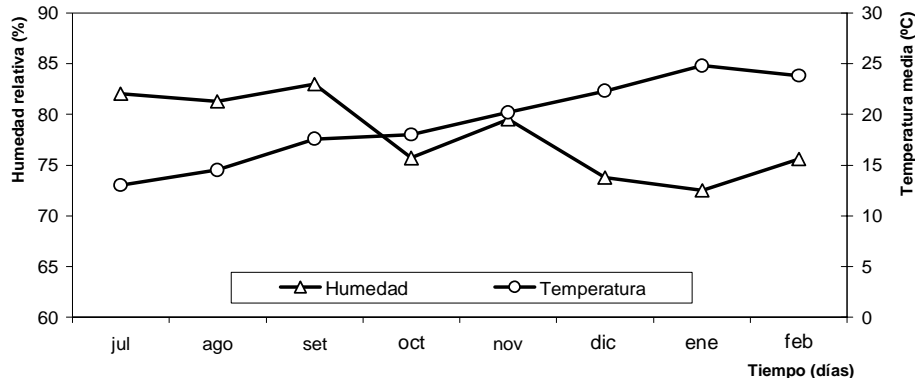


Figura 10. Temperatura y humedad relativa medias mensuales.

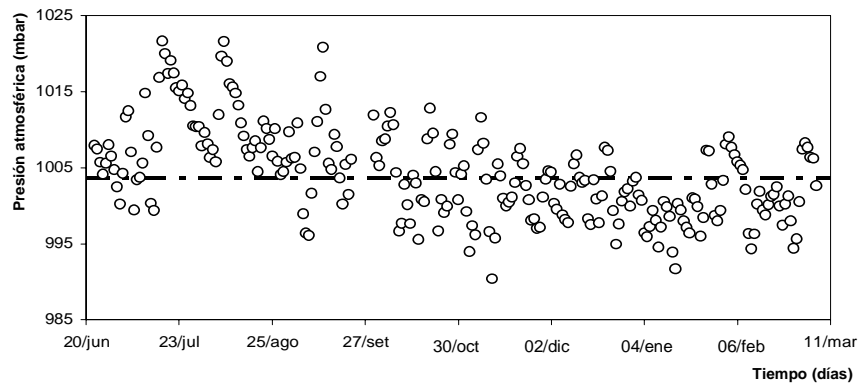


Figura 11. Presión atmosférica media diaria medida a 80 m snm.

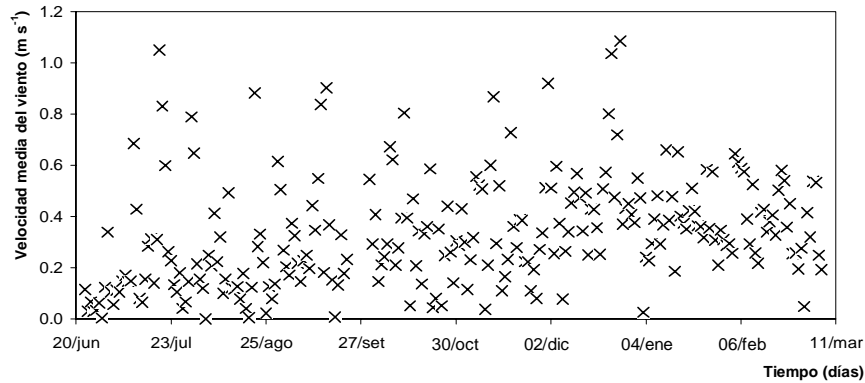


Figura 12. Velocidad horizontal media diaria del viento.

Velocidad horizontal media del viento

Los registros de velocidad media horizontal del viento (medidos a 2 m de altura sobre el nivel del suelo) son transcriptos en la Figura 12. Una particularidad de estos registros es que presentan un valor muy bajo (valor medio de 0.33 m s^{-1}) cuando son comparados con la clasificación dada por Doorenbos y Pruitt (1977), que define al viento como débil cuando la velocidad se encuentra por debajo de 2 ms^{-1} . Esta circunstancia puede ser explicada por la localización de la estación meteorológica, la cual se encuentra

rodeada por edificios que ofrecen abrigo a la influencia del viento.

Correlación entre tasas de ET y variables meteorológicas

Cada variable meteorológica, considerada en forma individual, es empleada para calcular la tasa de ET asociada; como función objetivo se utilizó la minimización de la diferencia cuadrática entre los valores medidos y calculados de la tasa de ET. Obteniendo,

de esta forma, las constantes de regresión a y b (pendiente y ordenada al origen, respectivamente) asociadas a cada variable meteorológica. Para establecer un orden de prioridad de las variables meteorológicas, se efectuó un análisis de varianza (ANOVA), calculando los siguientes parámetros estadísticos: coeficiente de determinación (R^2), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el valor del test F de Fisher (con el objeto de evaluar la significancia estadística de la regresión). Como indicador para el ordenamiento se utilizó el valor del test F, de manera que a un mayor valor de F le corresponde

una variable de mayor jerarquía. A continuación, en la Tabla 2, se presentan los resultados obtenidos. Por cuestiones de espacio, se muestran en las Figuras 13 y 14 (que corresponden a las mejores dos variables que explican los valores medidos de ET) las tasas diarias de ET medidas en función de los valores de ET calculados para la radiación solar y para la radiación extraterrestre, respectivamente. Todas las regresiones calculadas son estadísticamente significativas, para un nivel de significancia de 0.05, debido a que los valores de F fueron mayores que el crítico ($F = 3.9$).

Tabla 2. Regresión lineal simple entre tasas de ET y variables meteorológicas medidas.

Orden	Variable meteorológica	a	b	R^2	RMSE	$F^{(1)}$
1	Radiación solar ($W m^{-2}$)	0.02	-1.78	0.54	1.55	113.7
2	Radiación extraterrestre ($W m^{-2}$)	0.02	-4.09	0.52	1.58	104.6
3	Horas diurnas (% anual)	48.31	-10.02	0.43	1.72	74.4
4	Humedad relativa media (%)	-0.23	21.75	0.34	1.85	50.7
5	Temperatura media ($^{\circ}C$)	0.33	-2.11	0.31	1.89	44.9
6	Déficit de presión de vapor (kPa)	3.17	0.50	0.31	1.89	44.2
7	Temperatura mínima ($^{\circ}C$)	0.28	0.48	0.27	1.94	36.6
8	Presión atmosférica media (hPa)	-0.23	239.70	0.26	1.95	35.1
9	Temperatura máxima ($^{\circ}C$)	0.26	-2.64	0.24	1.99	30.2
10	Temperatura media diurna ($^{\circ}C$)	0.32	-2.94	0.28	1.93	28.7
11	Humedad relativa mínima (%)	-0.12	10.30	0.21	2.03	25.3
12	Velocidad media del viento ($m s^{-1}$)	4.77	3.07	0.15	2.10	16.7
13	Temperatura del punto de rocío ($^{\circ}C$)	0.17	2.55	0.10	2.17	10.5
14	Humedad relativa máxima (%)	-0.20	23.36	0.09	2.17	10.0

(1) $n = 100$, test $F(1, 98, 95\%) = 3.9$

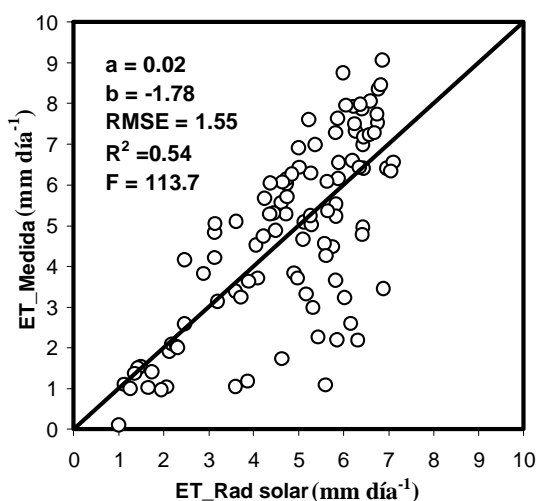


Figura 13. Tasa de ET en función de la radiación solar.

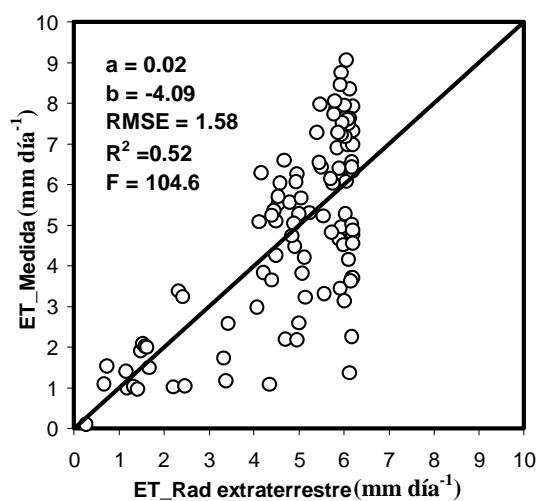


Figura 14. Tasa de ET en función de la rad. extraterrestre.

Identificada la variable que mejor explica el proceso de ET para esta especie vegetal bajo las condiciones climáticas particulares del sitio de experimentación (radiación solar recibida), se investigó si el aporte conjunto de otra variable mejoraba el grado de correlación entre valores medidos y calculados de ET. Para este fin, se realizaron trece regresiones lineales múltiples con dos variables, tomando a la radiación solar recibida como primer variable y agregando en forma individual cada una de las restantes; resultando como segunda variable en importancia la temperatura mínima del aire.

Repitiendo este procedimiento y tomando como base las dos variables anteriores (radiación solar y temperatura mínima), se calcularon doce nuevas regresiones lineales resultando en esta oportunidad que la temperatura del punto de rocío era la tercera variable que mejor contribuía a la regresión. En este trabajo, se propusieron regresiones lineales de hasta cuatro variables en forma simultánea, debido a que la consideración de una cuarta variable no proveyó de mejoras sustanciales en los resultados hallados.

A continuación, en la Tabla 3 y Figuras 15 a 17, se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de los distintos modelos de regresión lineal múltiple a las variables meteorológicas registradas; considerando dos, tres y cuatro variables en forma simultánea. En dicha tabla, también se presentan los valores del coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el valor del test F de Fisher (F). Los valores críticos de F para cada regresión son de 3.943, 3.944 y 3.945; por lo que todas las regresiones son estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 95%.

Tabla 3. Regresión lineal múltiple entre tasas de ET y variables meteorológicas medidas.

VARIABLES	Ecuación	R^2	RMSE	F
2	$0.021 RS + 0.186 T_{Mi} - 3.867$	0.65	1.35	91.1
3	$0.018 RS + 0.523 T_{Mi} - 0.365 T_R - 3.501$	0.71	1.24	79.0
4	$0.020 RS + 0.580 T_{Mi} - 0.342 T_R - 0.104 T_{Ma} - 2.161$	0.72	1.22	61.7

RS: radiación solar recibida ($W m^{-2}$), T_{Ma} : temperatura máxima ($^{\circ}C$), T_{Mi} : temperatura mínima ($^{\circ}C$), T_R : temperatura del punto de rocío ($^{\circ}C$).

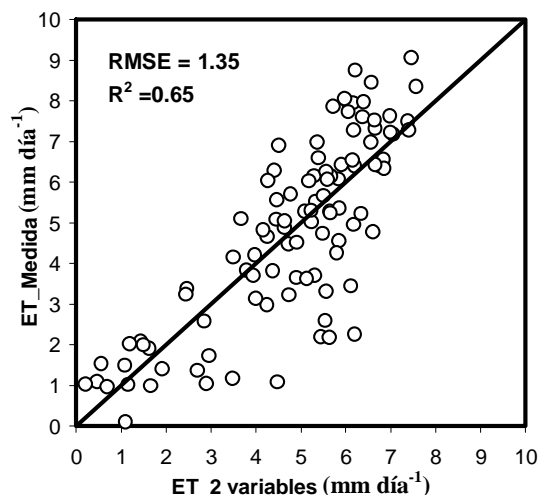


Figura 15. Tasa de ET en función de dos variables.

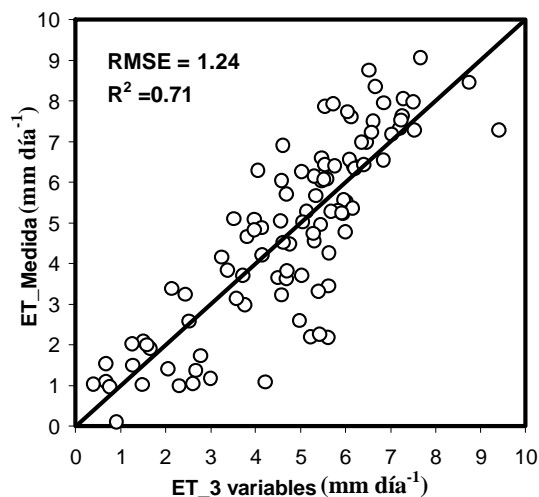


Figura 16. Tasa de ET en función de tres variables.

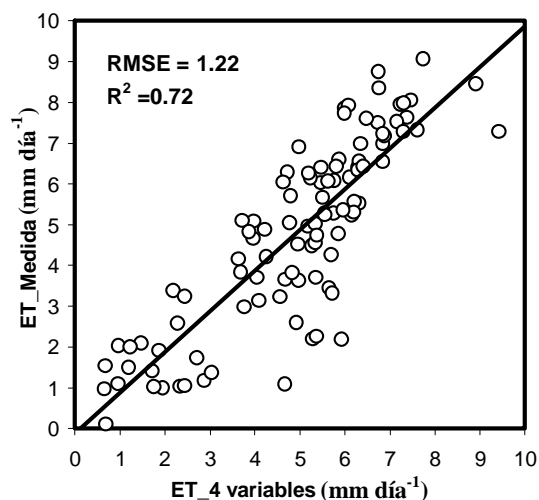


Figura 17. Tasa de ET en función de cuatro variables.

Análisis y discusión de resultados

Con relación a las variables climáticas registradas en la estación automática, una forma de disminuir la incertidumbre, especialmente relacionada con la velocidad del viento y la humedad relativa (dado las condiciones particulares de ubicación, comentadas anteriormente) sería la instalación de otro aparato en el propio local del experimento.

Un primer análisis que puede hacerse a partir de los resultados presentados en la Tabla 2 es que la variable meteorológica que consigue representar mejor el proceso de evapotranspiración medido es la radiación solar recibida. Este resultado coincide con las observaciones halladas por distintos autores (Timmer y Weldon, 1967; DeBusk et al., 1983; Abtew 1996; de Bruin y Stricker, 2000).

Respecto de la segunda variable con mejor desempeño, la radiación solar extraterrestre, puede decirse que constituye una variable práctica y económica, ya que puede ser calculada en forma teórica, es decir, conociendo solamente la latitud del lugar y la época del año, no requiriendo de instrumental adicional. Continuando con la evaluación individual de las variables, la tercera variable con mejor correlación es el porcentaje de horas diurnas, que por definición, se encuentra relacionada con la radiación solar recibida.

Si se considera lo enunciado en ambos párrafos anteriores, queda evidenciado que la radiación solar recibida es la principal variable que rige el proceso de evapotranspiración. En el otro extremo, es decir dentro de las variables que menos contribuyen al fenómeno estudiado, se encuentran la velocidad horizontal del viento, la temperatura del punto de rocío y las humedades relativas mínima y máxima. En general, se observa que los valores medios de las variables temperatura y humedad relativa están mejor correlacionados que sus respectivos valores extremos (máximos y mínimos).

Evaluando ahora la regresión lineal múltiple con dos variables, se observa que la variable que introduce una mejora importante en la correlación (del orden del 20% del R^2) es la temperatura mínima del aire. Mientras que para la regresión con tres variables, se agrega la temperatura del punto de rocío (mejora del 9% del R^2 , respecto a la regresión con 2 variables). Por último, se obtuvo como cuarta variable, que genera una mejora muy pequeña de la correlación (incremento de 1.4% del R^2 , respecto de la regresión

con tres variables) a la temperatura máxima del aire. Los resultados correspondientes a las distintas regresiones múltiples efectuadas se muestran en la Tabla 3; donde se presentan además de las variables, las constantes asociadas a las mismas que fueron obtenidas durante la regresión.

La mejora de los parámetros estadísticos calculados (coeficiente de determinación R^2 y raíz del error cuadrático medio RMSE) es evidente cuando se utilizan dos variables en lugar de una, para hacer las regresiones entre datos meteorológicos y tasas de ET medidas. Sin embargo, el empleo de una tercera variable tiene un impacto mucho menor que el anterior y la introducción de una cuarta variable al análisis no logra casi ninguna mejora. Por esta razón, solamente fueron estudiadas regresiones con hasta cuatro variables conjuntas.

A partir de estos resultados, si se considera el uso de más de una variable en forma conjunta, puede afirmarse que las variables que se encuentran mejor correlacionadas con la tasa de ET son, además de la radiación solar recibida, alguna variable asociada con la temperatura del aire (en este trabajo temperatura mínima, temperatura del punto de rocío y temperatura máxima). La presión atmosférica, la velocidad horizontal del viento y la humedad relativa del aire, no aparecen como variables que mejoren sustancialmente la correlación con las tasas de ET registradas experimentalmente.

En cuanto a la velocidad horizontal del viento y la humedad relativa del aire, ambas variables son fundamentales en el proceso de remoción de vapor del aire circundante a la superficie evaporante, garantizando de esta forma la continuidad en el tiempo de la evapotranspiración. En este sentido, la baja correlación que se tuvo en este trabajo entre las mismas y las tasas de ET medidas, puede estar influenciada por la ubicación de la estación meteorológica automática y la cercanía de edificaciones en sus alrededores.

CONCLUSIONES

El cálculo de la tasa de evapotranspiración, en este caso de una especie particular de macrófita acuática, constituye un trabajo complejo dada la gran cantidad de variables (meteorológicas, del suelo, biológicas) involucradas en el proceso. Además la interacción entre las mismas agrega cierta dificultad adicional a la comprensión del fenómeno.

Para el período evaluado, comprendido entre el 23 de junio de 2004 y el 12 de marzo de 2005, la tasa media diaria de ET (medida por medio de un tanque enterrado con suelo, agua y vegetación) para la especie *Zizaniopsis Bonariensis*, en las condiciones climáticas particulares de Porto Alegre, fue de 5.2 mm día⁻¹. Si se considera la tasa de ET en forma estacional, los valores registrados fueron de 1.7 mm día⁻¹, 5.7 mm día⁻¹ y de 6.2 mm día⁻¹ para invierno, primavera y verano, respectivamente.

La obtención de series de valores de ET consistentes implica el desarrollo de un programa de mediciones de larga duración (por ejemplo un período de crecimiento o un año completo). Este programa debe comprometer en forma permanente instrumental y personal adecuados para llegar a resultados satisfactorios; en este sentido, la instalación de una estación meteorológica en el lugar del experimento es de suma importancia.

A partir de la regresión lineal simple efectuada entre consumos de agua y variables meteorológicas, la radiación solar recibida es la variable que presentó mejor correlación ($R^2 = 0.54$, RMSE = 1.55). En general, se evidencia una mejor correlación para valores medios de las variables (temperatura y humedad relativa) que sus respectivos valores extremos máximos y mínimos; cuando se hace referencia al análisis con variables meteorológicas en forma independiente.

Al estudiar el grado de correlación entre consumo de agua por parte de esta macrófita en particular y diferentes variables meteorológicas, en forma individual, adquiridas rutinariamente; los resultados indican que la radiación solar recibida es la variable que mejor explica el proceso de evapotranspiración. Por otra parte, la radiación solar extraterrestre, variable que puede ser calculada en forma teórica, conociendo solamente la latitud del lugar y la época del año; resultó ser sumamente práctica ya que no requiere de ningún instrumental adicional para su estimación. Esta variable presentó un grado de correlación semejante al de la radiación solar recibida, que precisó ser medida con instrumental.

Si consideramos ahora las regresiones lineales múltiples con dos, tres y cuatro variables en forma conjunta los resultados fueron los siguientes: $R^2 = 0.65$ y RMSE = 1.35 para dos variables, $R^2 = 0.71$ y RMSE = 1.24 para tres variables y $R^2 = 0.72$ y RMSE = 1.22 para cuatro variables. Cuando se hace referencia a las regresiones efectuadas para más

de una variable, aparecen otras variables que mejoran los resultados basados solamente en la radiación solar; estas nuevas variables se encuentran asociadas con la temperatura del aire. Estos resultados son consistentes con la literatura relacionada con el tema.

La explicación del proceso de evapotranspiración en función de variables meteorológicas tiene una mejora evidente cuando se utilizan dos variables (radiación solar recibida y temperatura mínima del aire) en lugar de una (sólo radiación solar recibida). Sin embargo, el empleo de una tercera variable tiene un impacto mucho menor que el anterior, demostrando que la complicación excesiva de las ecuaciones a veces no ofrece beneficios sustanciales.

Investigaciones de este tipo requieren una disponibilidad de registros de evapotranspiración y meteorológicos, tanto en calidad como en cantidad, que raramente se encuentra; por lo que resulta sumamente útil lograr correlaciones entre tasas de ET y variables meteorológicas de registro rutinario para poder ser utilizadas en distintos ámbitos. Sin embargo, debe prestarse especial atención a dos cuestiones particulares: la primera es conocer las condiciones climáticas y características de la vegetación con que fueron desarrolladas las metodologías empleadas y obtenidas las ecuaciones de regresión entre tasas de ET y variables meteorológicas medidas. La segunda es obtener una ecuación que sea operativa, es decir que tenga uso práctico; ya que una ecuación que presente una alta correlación pero que necesite datos que raramente se encuentran disponibles no es fácilmente aplicable.

ANEXO. Procedimientos de cálculo

1. Presión de saturación de vapor $e_o(T)$:

$$e_o(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.2T}{T + 237.3}\right) \quad (A.1)$$

donde $e_o(T)$ se expresa en kPa y T es una temperatura expresada en °C (T puede ser la temperatura mínima, media o máxima del aire).

Como es un proceso no lineal, si es necesario calcular la presión de saturación de vapor a lo largo de un día, es conveniente calcular las presiones de vapor asociadas a la temperatura máxima y a la temperatura mínima y realizar la semisuma.

2. Presión real de vapor e_a :

$$e_a(T_R) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.2T_R}{T_R + 237.3}\right) \quad (\text{A.2})$$

en que T_R es la temperatura del punto de rocío (°C).

3. Déficit de presión de vapor ($e_s - e_a$):

$$e_s - e_a = \left[\frac{e_o(T_{Ma}) + e_o(T_{Mi})}{2} \right] - e_a \quad (\text{A.3})$$

siendo T_{Ma} la temperatura máxima del aire (°C) y T_{Mi} es la temperatura mínima del aire (°C).

4. Radiación solar extraterrestre (R_a): es la radiación solar recibida al tope de la atmósfera sobre una superficie horizontal (Allen et al., 1998).

$$R_a = \frac{1440}{\pi} G_{SC} d_R [\omega_S \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}(\omega_S)] \quad (\text{A.4})$$

$$d_R = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (\text{A.5})$$

$$\delta = 0.409 \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (\text{A.6})$$

$$\omega_S = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (\text{A.7})$$

en las cuales R_a es la radiación solar extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), G_{SC} es la constante solar ($0.082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$); d_R es la inversa de la distancia relativa entre el Sol y la Tierra (adimensional), ω_S es el ángulo de radiación a la puesta del sol (rad), φ es la latitud del lugar (rad), δ es el ángulo de declinación solar (rad) y J es el número de día del año, que vale ente 1 y 365 o 366 (tener en cuenta en hemisferio donde se encuentra el lugar).

REFERENCIAS

Abtew, W. 1996. Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in south Florida. *Water Resources Bulletin*, 32 (3): 465-473.

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. 1998. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO, Irrigation and Drainage Paper 56*. Roma. 300 p.

Berlato, M. A. y Molion, L. C. 1981. Evaporação e evapotranspiração. *Boletim Técnico 7*. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Agronômicas, 95 p.

Blad, B. L.; Bauer, A.; Hatfield, J. L.; Kanemasu, E. T.; Major, D. J.; Reginato, R. J. y Hubbard, K. G. 1988. Influence of water and nitrogen levels on canopy temperatures of winter wheat grown in the North American Great Plains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 44: 159-173.

Cook, C. D. 1974. *Water Plants of the World. A manual for the identification of the genera of freshwater macrophytes*. The Hague, Dr. W. Junk b. v., Publishers, 561 p.

de Bruin, H. A. y Stricker, J. N. 2000. Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions. *Hydrological Sciences*, 45 (3): 391-406.

DeBusk, T. A.; Ryther, J. H. y Williams, L. D. 1983. Evapotranspiration of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms and *Lemna minor* L. in central Florida: relation to canopy structure and season. *Aquatic Botany*, 16: 31-39.

Doorenbos, J. y Kassam, A. H. 1980. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. *FAO, Irrigation and Drainage Paper 33*. Roma. 212p.

Doorenbos, J. y Pruitt, W. O. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. *FAO, Irrigation and Drainage Paper 24*. Roma. 179 p.

Dugas, W. A. y Bland, W. L. 1989. Effect of bordering soil surface moisture conditions on evaporation from soybean. *Field Crops Research*, 21: 161-166.

Evelt, S. R.; Howell, T. A.; Todd, R. W.; Schneider, A. D. y Tolk, J. A. 1998. Evapotranspiration of irrigated alfalfa in a semi-arid environment. Paper No. 982123. ASAE Annual International Meeting, Orlando, Flórida, July 12-16. 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659, USA. 14 p.

Gangopadhyaya, M.; Harbeck Jr., G. E.; Nordenson, T. J.; Omar, M. H. y Uryvaev, V. A. 1966. Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration. *WMO, Technical Note 83*. Geneva. 121 p.

Goldenfum, J. A. 2000. Hidrologia Estatística II. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Volume do curso de Recursos Hídricos e Meio Ambiente, 27 p.

Granger, R. J. 1989. An examination of the concept of potential evaporation. *Journal of Hydrology*, 111: 9-19.

- Herbst, M. y Kappen, L. 1999. The ratio of transpiration versus evaporation in a reed belt as influenced by weather conditions. *Aquatic Botany*, 63: 113-125.
- Howell, T. A.; Evett, S. R.; Schneider, A. D.; Todd, R. W. y Tolk, J. A. 1998. Evapotranspiration of irrigated fescue grass in a semi-arid environment. Paper No. 982117. ASAE Annual International Meeting, Orlando, Flórida, July 12-16. 2950 Niles Rd., St. Joseph, MI 49085-9659 USA.
- INMET. 1992. Instituto Nacional de Meteorología. Normais Climatológicas do Brasil (1961-1990). Brasília, 1992. En soporte digital.
- Jensen, D. T.; Hargreaves, G. H.; Temesgen, B. y Allen, R. G. 1997. Computation of Eto under Nonideal Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123 (5): 394-400.
- Koerselman, W. y Beltman, B. (1988). Evapotranspiration from fens in relation to Penman's potential free water evaporation (E0) and pan evaporation. *Aquatic Botany*, 31: 307-320.
- Larcher, W. 1986. *Ecofisiologia Vegetal*. São Paulo, Editora Pedagógica e Universitária Ltda., 319 p.
- Liu, H.; Shah, S. y Jiang, W. 2004. On-line outlier detection and data cleaning. *Computers and Chemical Engineering*, 28: 1635-1647.
- Montgomery, D. C. y Runger, G. C. 2003. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 3rd edition, New York, John Wiley & Sons Inc., 706 p.
- Pauliukonis, N. y Schneider, R. 2001. Temporal patterns in evapotranspiration from lysimeters with three common wetland plant species in the eastern United States. *Aquatic Botany*, 71: 35-46.
- Pereira, A. R.; Villa Nova, N. A. y Sedyama, G. C. 1997. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba, Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 183 p.
- Russell, G. 1980. Crop evaporation, surface resistance and soil water status. *Agricultural Meteorology*, 21: 213-226.
- Sani, H. D.; Yamamoto, T. y Rasiyah, V. 2004. Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments. *Agricultural Water Management*, 64: 91-106.
- Scuderi, C. M. 2010. Estimativa da taxa de evapotranspiração da macrófita aquática "Zizaniopsis bonariensis". Aplicação à simulação do nível de água do longo período do Banhado do Taim (RS). Tesis de Maestría. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Porto Alegre. Brasil. 141 p.
- Sutcliffe, J. F. 1980. *As plantas e a água*. São Paulo, Editora Pedagógica e Universitária Ltda., 126 p.
- Timmer, C. E. y Weldon, L. W. 1967. Evapotranspiration and Pollution of water by Water Hyacinth. *Hyacinth Control Journal*, 6: 34-37.
- Wallace, J. S. 1995. Calculating evaporation: resistance to factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 73: 353-366.
- Ziemer, R. R. 1979. Evaporation and Transpiration. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 17 (6): 1175-1186.
- Zimmermann, E. D. 2000. Evaporación, Transpiración y Evapotranspiración. En: *Hidrología: Procesos y Métodos*. Orsolini, H. E.; Zimmermann, E. D. y Basile, P. A. (Eds.). Rosario, UNR Editora, 319 p.

Artículo recibido el 03/2011 y aprobado para su publicación el 08/2011.