**UNIVERSIDAD DE TALCA**
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**
**ESCUELA DE AGRONOMÍA**

# ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA DE LA VID A TRAVÉS DE LA ECUACIÓN DE PENMAN MONTEITH Y BANDEJA DE EVAPORACIÓN.

**MEMORIA DE TITULO**

**JOSÉ ANDRÉS CASTILLO BRAVO**

**Talca - Chile**
**2003**

## RESUMEN

Con el objetivo de determinar el consumo de agua de la vid en un viñedo cv. Cabernet sauvignon, ubicado en el valle de Pencahue, VII región (35º 22' LS; 71º 47' LW; 300 m.s.n.m.), mediante la ecuación de Penman-Monteith y bandeja de evaporación, se realizó un ensayo durante la temporada agrícola 2000-2001 y 2001-2002. El consumo de agua de la vid ($ET_{real}$) a través del modelo de Penman-Monteith, se determinó mediante el uso de una estación meteorológica automática (EMA), la cual fue ubicada al interior del viñedo, mientras que para los datos de evaporación de bandeja se utilizó un coeficiente de bandeja (kp) igual a 0,69 y los coeficientes de cultivos (Kc) de la vid propuestos por Doorembos y Pruitt (1977). Además, se mantuvo un constante monitoreo del contenido de la humedad del suelo a través de la técnica de la reflectometria en el tiempo (TDR), la cual fue utilizada para estimar el balance hídrico. Los resultados obtenidos en este estudio revelaron que el modelo de Penman-Monteith subestimó la $ET_{real}$ de la vid con un error de 1,3%, mientras que la bandeja la sobrestimó con un error de 16%.

## ABSTRACT

In order to establish the water consumption of the vine in a vineyard cv. Cabernet sauvignon, located in the Pencahue Valley, VIIth. Region (35º 22' SL; 71º, 47'WL; 300 mtrs. amsl), through the Penman-Monteith ecuation and evaporation tray, an essay was carried on during the 2000-2001 and 2001-2002 agricultural seasons. The vine's water consumption ($ET_{real}$) through the Penman-Monteith model was determined by the use of an automatic meteorologic station (AMS) that was placed in the vineyard, and for the the pan evapotarion data, a tray coeficient was used (kp) as equal to 0.69. The crop coeficients (kc) for vine proposed by Doorembos and Pruitt (1977) were also used. A permanent supervision of the ground's moisture content was observed as well, through the time reflectometry tecnique (TDR), wich was used in order to get an hidric balance estimation. The results obtained from this study revealed that the Penman-Monteith model underestimated the $ET_{real}$ of the vine with an 1.3% margin of error, while the tray overestimated it with an 16% margin of error.

**INDICE**

**Pág.**


**I. INTRODUCCIÓN** 1-2

**II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

2.1. Programación del riego 3

2.2. Estimación de la evapotranspiración real por el método de Penman-Monteith 3-4

2.3. Estimación de la evapotranspiración real por el método de bandeja de evaporación 5

2.3.1. Coeficiente de Bandeja (Kp) 6

2.3.2. Coeficiente de cultivo (Kc) 6

2.4. Determinación de la evapotranspiración real por el método del balance hídrico del suelo 8-9

2.5. Consumo de agua de la vid 9

**III. MATERIALES Y MÉTODOS** 10-11

3.1 Instrumentación 11-13

3.2 Análisis estadístico 14-15

**IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN** 16-21

**V. CONCLUSIONES** 22

**VI. BIBLIOGRAFÍA** 23-26

VII. **ANEXOS** 27

## INDICE DE CUADROS

**Pág.**

**CAPITULO II**

**Cuadro 1.** Diferentes valores de coeficientes de cultivos. 7

**CAPITULO III**

**Cuadro 2.** Propiedades físico hídricas del ensayo. 11

**Cuadro 3.** Variables y sensores de la estación meteorológica automática. 12

**CAPITULO IV**

**Cuadro 4**. Análisis estadístico para la evapotranspiración real estimada por el modelo de Penman-Monteith y el método de la bandeja de evaporación. 17

**Cuadro 5**. Evapotranspiración real acumulada por periodos fenológicos de la vid para el modelo de Penman-Monteith, método de bandeja de evaporación y balance hídrico. 19

**Cuadro 6.** Coeficientes de riego (Kr) para cada estado fenológico de la vid**.** 20

**CAPITULO VII**

**Cuadro 7.** Datos semanales de los cálculos de ET a través de los modelos de ETB, ETPM y ETBH. 30

## INDICE DE FIGURAS

**Pág.**

**Figura 1**. Comparación semanal entre la evapotranspiración real medida por el balance hídrico (ETBH) y estimada por la ecuación de Penman-Monteith (ETPM), para las temporadas 2000/2001 y 2001/2002. 17

**Figura 2**. Comparación semanal entre la evapotranspiración real medida por el balance hídrico (ETBH) y estimada por la bandeja de evaporación (ETB), para las temporadas 2000/2001 y 2001/2002. 19

**Figura 3**. Coeficientes de riego por estado fenológico para las temporadas 2000/01 y 2001/02 20

**Figura 4**. Evapotranspiración real promedio de ambas temporadas por periodos fenológicos de Penman-Monteith (ETPM), balance hídrico (ETBH) y bandeja de evaporación calibrada ETBc). 21

# I. INTRODUCCIÓN

Considerando la creciente competitividad en el mercado de exportación vitivinícola, surgen demandas para mejorar los estándares de rendimiento y sobretodo la calidad de los vinos. Consecuente con esto se ha demostrado que el manejo del riego, o programación del mismo, demuestra una relación directa con el crecimiento, desarrollo, maduración, rendimiento y calidad de la uva. Por lo tanto, una buena estimación de las necesidades hídricas del cultivo permitirá obtener un producto de mejor calidad y, a la vez, incrementar los retornos a los productores. En términos generales, entre el rendimiento y los parámetros de calidad del vino, se da una relación inversa: a mayor producción menor calidad, lo que se debe en gran medida al tamaño de las bayas. (Tosso y Torres, 1986). Para lograr este objetivo de mejora en la calidad de la producción, se requiere de tecnologías modernas, dentro de las que destacan el uso de sistemas computacionales de agroclimatología que utilizan redes de estaciones meteorológicas automáticas (EMA), sistemas de riego localizados y una adecuada programación del riego para satisfacer los requerimientos reales de la vid (Ortega, 1999; Ferreyra, 2002).

La evapotranspiración real, ($ET_{real}$), es el componente fundamental para la programación del riego al determinar la cantidad de agua consumida por el cultivo entre dos riegos consecutivos. Así, tenemos que en Chile el método más usado para determinar el consumo de agua de la vid lo constituye la bandeja de evaporación que es corregida por un coeficiente de bandeja (Kp) para determinar de esta manera una evapotranspiración de referencia ($ET_r$) que a su vez se corrige mediante un coeficiente de cultivo (Kc) (Doorenbos y Pruitt, 1977; Ortega y Acevedo, 1999; Varas, 1991; Miranda, 1982).

El Kc presenta una gran incertidumbre y agrega un importante error a la estimación final del consumo de agua de la vid ya que se usan coeficientes obtenidos del extranjero que no han sido validados para las diferentes zonas productoras de vino. Por tal razón, la calibración de la bandeja juega un rol fundamental debido a que mediante la utilización de coeficientes de riego (Kr) es posible evitar sobreestimar o subestimar los volúmenes de agua aplicados en el viñedo. (Muñoz 2001)

Por otro lado, diversos investigadores han propuesto utilizar el modelo de Penman-Monteith para estimar el consumo de agua en la vid a través del uso de estaciones meteorológicas automáticas que miden de forma simultánea la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, posibilitando la determinación de la $ET_{real}$ a partir de parámetros físicos, fisiológicos y climáticos (Jensen *et al*, 1990 y Ortega *et al*, 1996).

En base a lo anterior, el objetivo de esta investigación se centra en estimar el consumo de agua de la vid vinífera (cv *Cabernet Sauvignon*), a través de la ecuación Penman-Monteith y la bandeja de evaporación.

# II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## 2. 1. Programación del riego

Consiste en determinar la frecuencia y tiempo de riego, acorde a las interacciones especificas entre clima, suelo y planta, constituyendo una metodología que permite determinar el nivel de riego optimo al aplicar a los cultivos de acuerdo a los objetivos de producción (Ortega y Acevedo, 1999; Varas, 1991). Así, se ha visto que el manejo del riego en la viña tiene una relación directa con la calidad del producto final que se desea lograr, ya que la utilización de estrategias de riego está enfocadas a la optimización de la producción y de la calidad de frutos. Desde este punto de vista, la estimación correcta de la evapotranspiración real de la vid ($ET_{real}$), es primordial tanto en lo que se refiere a la frecuencia de la aplicación, como la cantidad de agua a aplicar en cada una de las etapas de desarrollo de la vid (Ortega-Farias *et al*., 2000; Gurovich, 1985). El consumo total de agua de la vid o evapotranspiración real ($ET_{real}$) puede ser estimado, a través de varios métodos destacando la ecuación de Penman-Monteith, la evaporación de bandeja y el balance hídrico.

## 2.2. Estimación de la evapotranspiración real de la vid usando la ecuación de Penman-Monteith

Recientemente, con los avances tecnológicos han salido al mercado estaciones meteorológicas automáticas (EMA) que permiten calcular el consumo de agua de la vid a través de la ecuación Penman Monteith (Ortega *et al,* 1996; Allen *et al*, 1998; Sellés y Ferreyra, 1999). La estimación de la ETreal por la ecuación mencionada se puede definir como:

$$ETreal = \frac{\Delta \times (Rn - G) + \gamma \times Ea}{\Delta + \gamma \times (1 + rcv \times ra^{-1})} \quad (1)$$

donde ETreal = evapotranspiración real o flujo de calor latente (W $m^{-2}$); Rn = radiación neta o energía disponible en la superficie de la cubierta vegetal (W $m^{-2}$); G = flujo de calor del suelo (W $m^{-2}$); $\Delta$ = pendiente de la curva de presión de vapor en saturación versus temperatura (kPa $ºC^{-1}$); $\gamma$ = constante psicrométrica (kPa $ºC^{-1}$); $E_a$ = poder secante de la atmósfera (W $m^{-2}$); $r_a$ = resistencia aerodinámica a la transferencia de vapor y calor (s $m^{-1}$); $r_{cv}$ = resistencia de la cubierta vegetal a la transferencia de vapor de agua (s $m^{-1}$). Todos los parámetros de entrada de la ecuación de Penman-Monteith se muestran en el anexo 1.

Esta ecuación requiere necesariamente de estaciones meteorológicas automáticas (EMA), las cuales por ser de alto costo son poco utilizadas. Además, para lograr mediciones precisas de $ET_{real}$ mediante este modelo, se requiere de un buen conocimiento de la fisiología estomática de los cultivos y una correcta determinación de la resistencia de la cubierta vegetal a la transferencia de vapor de agua. Debido a esto, en 1993, Ortega propuso un modelo para estimar la resistencia de la cubierta vegetal y estimar en forma directa la $ET_{real}$. Así, investigaciones realizadas en soya por Rana *et al*., (1997), indican que el modelo de Penman Monteith puede estimar en forma directa la evapotranspiración real con errores inferiores al 5%, además Ortega-Farias *et al*., (2000) y Argote, (2001) observaron que este modelo tiende a subestimar la $ET_{real}$ en tomate con un error absoluto de 4,23% y 3,5 % respectivamente. De igual forma Jensen, (1990) en comparaciones realizadas con lisímetros encontró un adecuado comportamiento del modelo de Penman Monteith, observando errores inferiores al 3% sobre una cubierta de alfalfa.

Estos parámetros observados en literatura, indican que el modelo de Penman Monteith, puede ser una buena herramienta para estimar la evapotranspiración real, sin necesidad de usar coeficientes de cultivos (Kc) convirtiéndose en una ventaja fundamental para la estimación de la evapotranspiración de la vid.

## 2.3. Estimación de la evapotranspiración real por el modelo de bandeja

La estimación de la evapotranspiración real ($ET_{real}$) usando la bandeja de evaporación se puede cuantificar del siguiente modo; (Ramírez y Valenzuela, 1998; Allen *et al*, 1998; Ortega y Acevedo, 1999; Sellés y Ferreyra, 1999)

$$ETreal = Eb \times Kp \times Kc \qquad (2)$$

donde $ET_{real}$ = evapotranspiración de real (mm/día); Eb = evaporación de bandeja (mm/día); Kp = coeficiente de bandeja (adimensional) y Kc = coeficiente de cultivo (adimensional)

Investigaciones recientes han señalado que el método de evaporación de bandeja para estimar la $ET_{real}$ diaria, presenta serios problemas de precisión dado que no integra en forma adecuada las interacciones de los factores climáticos que afectan la evapotranspiración (Argote, 2001). Sin embargo, este método es de bajo costo y fácil funcionamiento, convirtiéndose en una de las herramientas más usadas en viñedos para estimar el consumo de agua en la vid. (Doorembos y Pruit, 1977; Jensen *et al*, 1990).

2.3.1. Coeficiente de Bandeja (Kp)

El coeficiente de bandeja (Kp) puede ser calculado por la siguiente ecuación:

$$Kp = 0.475 - 0.24 \times 10^{-3} \times U + 0.00516 \times HR + 0.00118 \times d - 0.016 \times 10^{4} \times HR^{2} - 0.101 \times 10^{-5} \times d^{2} - 0.8 \times 10^{-8} \times HR^{2} \times U - 1.0 \times 10^{-8} \times HR^{2} \quad (3)$$

donde U = velocidad del viento en el día a 2 m de altura, (km/día); HR = humedad relativa media,(%); d = distancia del cultivo, (m)

En general, el coeficiente de bandeja (Kp) varía con el clima de cada región pues su valor depende de la humedad relativa y la velocidad del viento (Allen *et al*, 1998). La validación numérica del coeficiente de bandeja (Kp) es errática, situación que produce al no considerar la variable de la planta con vientos fuertes y baja humedad relativa, donde el control estomático es más eficaz, permitiendo una menor pérdida de agua por parte de la planta (Ortega, 1999).

2.3.2. Coeficiente de cultivo (Kc)

El efecto del estado fenológico sobre el consumo de agua de un cultivo está representado por el coeficiente de cultivo (Kc), el cual depende además del índice de área foliar, la localidad, la variedad, sistema de riego y manejos agronómicos (Sellés y Ferreyra, 1999; Jensen, 1990). Debido a lo anterior, este parámetro representa una gran incertidumbre y agrega un importante error en la estimación final del consumo de agua de la vid cuando no es calibrado localmente (Ortega, 1999).

Así, por ejemplo el cuadro 1 señala valores de Kc para la vid en pleno crecimiento de 0,4 (Mitchell and Goodwin, 1996), 0,69 (Grattan, 1998) y 0,9 (Doorenbos y Pruitt, 1976).

**Cuadro 1**; Diferentes valores de coeficientes de cultivos para la vid

| Autores | | Etapas de desarrollo | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Inicial** | **Desarrollo** | **Medio** | **Final** |
| Tosso | 1976 | 0,1-0,3 | 0,4-0,5 | 0,6 | 0,3-0,1 |
| Doorenbos y Pruitt | 1977 | 0,4 | 0,7 | 0,9 | 0,7 |
| Grattan | 1988 | - | - | 0,69 | - |
| Steward y Nielsen | 1990 | 0,3-0,5 | - | 0,8-0,9 | 0,6-0,7 |
| Mitchell y Goodwin | 1996 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 |
| Fuentes | 1996 | 0,5 | - | 1 | 0,3 |

La bandeja de evaporación presenta altos errores de estimación de la $ET_{real}$, ya que no integra en forma adecuada las interacciones de los factores climáticos que afectan la evapotranspiración, debiéndose en gran medida a que se suelen utilizar coeficientes empíricos tanto de cultivos, como de bandeja (Kc y Kp) los cuales no han sido validados para condiciones locales. (Jensen *et al*.,1990; Santa Olalla y de Juan Valero, 1993; Ortega *et al.,* 1996).

Estudios realizados en Talca por Antonioletti *et al*., 1998, arrojaron errores que varían entre 20,8 y 54,5% en la estimación de la $ET_{real}$ a través de este método, por otra parte, Jensen, (1990) en estudios realizados en USA con lisímetros, determinó que el método de bandeja subestima la evapotranspiración en épocas cálidas y zonas áridas, llegando hasta un 32% de error y en el mejor de los casos, la puede estimar con un error de 14%. Por otra parte, estudios realizados en tomate por Argote (2001), observaron que la evaporación de bandeja subestima en gran medida la $ET_{real}$, presentando errores del 18%. Así, mismo Jones (2001) encontró que este método sobreestimó la $ET_{real}$ en un 36%, en cultivos de tomate. Similares estudios realizados en vides viniferas, por Muñoz (2001), determinaron que este método sobrestimó la evapotranspiración real de la vid en un 15%. Estas investigaciones plantean la necesidad de buscar coeficientes de ajuste para cada etapa de desarrollo. Así, Ortega *et al,* 1996, propuso obtener un coeficiente de riego (Kr), que integre el efecto de Kc y Kp resultando la fórmula de la siguiente manera:

$$ETreal = EB \times Kr \qquad (4)$$

donde $ET_{real}$ = evapotranspiración real (mm/día); Eb = evaporación de bandeja (mm/día);

Kr = coeficiente de riego (adimencional)

2.4. Estimación de la evapotranspiración real de la vid a través del balance hídrico

La estimación de la $ET_{real}$ se basa en el balance hídrico del sistema suelo-planta-atmósfera, en el cual se registran cuidadosa y sistemáticamente el contenido de humedad en el suelo, salidas y entradas de agua en el sistema suelo-planta (Argote, 2001). Bajo estas condiciones, la $ET_{real}$ puede ser estimada por medio de la siguiente expresión:

$$ET_{real} = (P+R) - Pp - Es - \theta \qquad (5)$$

donde **$ET_{real}$** = evapotranspiración real (mm); **P** = precipitaciones (mm); **R** = riego (mm); **Pp** = percolación profunda (mm); **Es** = escurrimiento superficial (mm); **θ** = variación contenido humedad del suelo (mm).

Una de las ventajas de este método, es que requiere de instrumentos de precisión para cuantificar cuidadosamente la precipitación, el volumen de agua aplicado en el riego, variaciones del contenido de humedad del perfil del suelo hasta la zona radicular y el escurrimiento superficial. Pero estos instrumentos de precisión son de elevados costos, lo que explicaría el poco uso de este modelo para estimar la evapotranspiración real de la vid.

## 2.5. Consumo de agua de la vid

Con relación al requerimiento de agua por estado fenológico, Burgos *et al*., (1996), observó que en brotación las necesidades hídricas son mínimas, superando el 1,5% del total, al igual que en floración. De floración a cuaja el consumo de agua es del 10%, de cuaja a pinta un 44% y de pinta a cosecha un 45% del total. Estos resultados concuerdan con los observados por de Ferreyra y Sellés (1999); Giner y Revuelto (2002), quienes encontraron que las necesidades hídricas de la vid para los períodos de pinta a cosecha corresponde a un 44 % del consumo total de agua de la vid. Así, Muñoz (2001), Burgos *et al*., (1996) y Puyo (1992) aplicaron tasas de riego en el periodo de cuaja a pinta de 873, 1709 y 1892 $m^3$/ha. Con respecto al caudal total estos autores aplicaron 1815, 4762 y 4408 $m^3$/ha, respectivamente. En general las vides para producción de vinos tintos se riegan con aproximadamente 2000 $m^3$/ha en zonas donde la lluvia es de 200 a 300 mm (Ferreyra y Sellés, 2002). Esta variación depende por un lado del crecimiento vegetativo anual y por otro lado de las condiciones climáticas, las cuales a su vez están determinadas por variaciones de temperatura, humedad atmosférica y viento (Muñoz, 2001).

# III. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de evaluar la evapotranspiración real de la vid ($ET_{real}$) estimada por los métodos de Penman-Monteith y bandeja de evaporación, se realizó un ensayo en un viñedo ubicado en el valle de Pencahue, VII región (35º 22' LS; 71º 47' LW; 300 m.s.n.m), durante la temporada agrícola 2000-2001 y 2001-2002. El viñedo utilizado correspondió al cv. Cabernet Sauvignon de 7 años de edad, plantado a una densidad de 3 metros entre hilera por 1,2 metros sobre hilera, regado por goteo (3,5 l/h) y conducido en espaldera simple (orientación norte sur) podada en cordón apitonado.

El clima es de tipo templado semiárido con temperaturas, máxima y mínima durante el año de 27,6 y 5,5 ºC. El régimen hídrico presenta una precipitación promedio anual de 709 mm, un déficit hídrico de 863 mm con un período seco de 7 meses. El período libre de heladas es de 301 días con un promedio de 3 heladas por año. Registra anualmente 1.685 días grado y 660 horas de frío. El suelo pertenece a la serie Cunculen, siendo un suelo plano a moderadamente ondulado, con pendiente que varia entre 1% a 5%, de drenaje imperfecto con permeabilidad moderadamente lenta y escurrimiento superficial moderadamente lento a moderadamente rápido. La profundidad de suelo varia entre 25 a 95 cm, presentando suelos derivados de arenisca compactada de textura franco arenosa en superficie y franco arcillosa a arcillosa en profundidad, según el análisis de suelo.

Con el objetivo de definir la capacidad de estanque del ensayo se realizó un muestreo de suelo excavando 4 calicatas en posición cercana a la espaldera. Posteriormente, se procedió a describir los distintos horizontes del perfil del suelo extrayendo las muestras respectivas con las cuales se efectuó la determinación de las propiedades físico hídricas del suelo (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Propiedades físico hídricas del suelo

| Profundidad (cm) | **Textura (%)** | | | **Clase** | **D.A** | **W (%)** | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Arena** | **limo** | **Arcilla** | **Textura** | **(g*cm$^{-3}$)** | **CC** | **PMP** |
| 0-60 | 51.9 | 30.0 | 18.1 | Fa | 1.44 | 25 | 12 |

donde D.A = densidad aparente; W = humedad gravimetrica; CC = capacidad de campo; PMP = punto de marchitez permanente

## 3.1. Instrumentación

En la parte central de la parcela experimental, se instaló una Estación Meteorológica Automática (EMA) Adcon Telemetry A730, que fue usada para medir temperatura del aire (Ta), humedad relativa (HR), velocidad del viento (Vv), radiación solar (Rs) y precipitaciones (Pp), en intervalos de 15 minutos (Cuadro 3). Estos datos climáticos, fueron utilizados para estimar el consumo de agua de la vid. Adicionalmente se realizaron las mediciones del contenido volumétrico de agua del suelo con un Time Domain Reflectometry (TDR), que fueron realizadas con una frecuencia de 2 veces por semana (desde septiembre a marzo). Para esto se instalaron 27 pares de guías de 60 cm de largo, insertando un par de guías en cada unidad experimental.

**Cuadro 3**. Variables y sensores de la estación meteorológica automática, ubicada en el viñedo.

| Variable | Instrumento | Rango Operación | Unidad | Ubicación (m) |
|---|---|---|---|---|
| Radiación solar | Piranómetro | 0-2.000 | $W/m^2$ | Sobre la superficie 3,5 |
| Temperatura y Humedad relativa | Combi | -40-60<br>0-100 | °C<br>% | En el follaje 1,2 |
| Velocidad del viento | Anemómetro | 2,5-100 | Km/h | Sobre la superficie 3,0 |
| Precipitaciones | Pluviómetro | 2,4 | mm | Sobre la superficie 3,8 |

Paralelamente se realizaron mediciones diarias de evaporación de bandeja, las cuales fueron utilizadas para estimar la $ET_{real}$ en forma tradicional (ETB). Para lograr este propósito se utilizó un coeficiente de bandeja (kp) igual a 0,69 y los coeficiente de cultivo (Kc) propuestos por Doorembos y Pruitt, 1977(Cuadro 1)

Para estimar la $ET_{real}$ de la vid se utilizó el balance hídrico, lo cual queda expresado del siguiente modo:

$$ET_{real} = (P + R) - \theta \qquad (6)$$

donde $\mathbf{ET_{real}}$ = evapotranspiración real (mm); **P** = precipitaciones (mm); **R** = riego (mm); $\theta$ = variación contenido humedad del suelo (mm)

En la ecuación del balance hídrico (Ecuación 5) el escurrimiento superficial (Es) se considera mínimo debido al sistema de riego utilizado (goteo) y, en el caso de las pérdidas por percolación profunda (Pp) fueron despreciadas debido a que se realizaron mediciones del cambio de humedad sin encontrarse variaciones relevantes en el contenido de humedad del suelo. Por lo tanto la ecuación 5 queda de la siguiente manera:

La variación del contenido de humedad en el suelo se expresó como lámina de agua de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\theta = \left[ \left( \frac{\theta_1 - \theta_2}{100} \right) \right] \times L \qquad (7)$$

donde **Θ** = variación contenido humedad del suelo (mm); $\Theta_1$= contenido de humedad después del riego(%); $\Theta_2$ = contenido de humedad antes del riego (%); L = longitud de la guía (mm).

Para obtener el coeficiente de riego (Kr) para cada periodo fenológico se realizó la siguiente relación:

$$Kr = \frac{ETBH}{Eb} \qquad (8)$$

donde ETBH = evapotranspiración real estimada por el modelo del balance hídrico (mm/día); Eb = evaporación de bandeja (mm/día); Kr = coeficiente de riego (adimencional)

3.2. Análisis estadístico

La evapotranspiración real ($ET_{real}$) calculada por la ecuación de Penman–Monteith (ETPM) y el método de bandeja de evaporación (ETB) fueron comparados con la $ET_{real}$ obtenida del balance hídrico (ETBH). La comparación incluyó la desviación estándar del error (DEE), el error absoluto (Ea) y la pendiente de la curva de la regresión a través del origen (b). Además, se incluyó un análisis a través del test Z, con el propósito de determinar si la relación de (b) fue estadísticamente diferente a uno, con un nivel de confianza del 95%.

La cuantificación de la DEE y Ea fueron estimadas a través de las siguientes ecuaciones;

$$DEE = \sqrt{\frac{\sum \left(\gamma_o - \gamma_e\right)^2}{n-1}} \qquad (9)$$

donde DEE= desviación estándar del error; Yo = observado (ETBH), (mm/semana); Ye = estimado (ETPM y ETB), (mm/semana); n = numero de observaciones

$$E\,a = \left|1-b\right| \qquad (10)$$

donde Ea = error absoluto, (%); b = pendiente (Ye / Yo)

Para evaluar si los métodos de predicción de la $ET_{real}$ subestiman o sobrestiman los valores de $ET_{real}$, se establecieron las siguientes hipótesis:

**Hi: b=1 (Hipótesis verdadera)**

**Ho: b≠1 (Hipótesis falsa)**

Estas Hipótesis se pueden verificar con el test Z del siguiente modo;

$$Z = \frac{(1-b)}{DEEb} \qquad (p \angle 0.05) \qquad (11)$$

donde DEEb es la desviación estándar de la relación b.

Si Z calculado es igual o mayor al que aparece en la tabla Z, se acepta Ho. Pero si nuestro valor calculado es menor al que aparece en tabla, se acepta Hi.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El análisis estadístico para el modelo de Penman-Monteith (ETPM) es presentada en el Cuadro 4, donde se puede observar que existió una buena correlación entre los valores de (ETBH) y (ETPM). En este caso, el coeficiente de determinación ($r^2$), la pendiente de la curva de regresión a través del origen (b) y la desviación estándar del error (DEE) fueron 0,86, 1,01 y 2,75 mm/semana, respectivamente. Además, el test Z indicó que el valor de b fue significativamente igual a 1, indicando que los valores de ETPM y ETBH fueron similares en ambas temporadas. Lo anterior es ilustrado en la Figura 1, donde la distribución de puntos se encuentran próximos a la línea 1:1 en las temporadas 2000/01 y 2001/02. En este caso, los valores acumulados de ETPM y ETBH para el crecimiento de la vid fueron 611 mm y 623 mm, respectivamente. Los mayores errores fueron observados entre pinta y cosecha, pero estos no superaron el 9% (ver cuadro 5). Los parámetros estadísticos encontrados en este estudio coinciden con otras investigaciones realizadas en diferentes cubiertas vegetales tales como soya, alfalfa, tomate y vid. Al respecto Rana *et al*., (1997), informaron que el modelo de Penman Monteith fue capaz de estimar la evapotranspiración real de soya con errores inferiores al 5%. Similares resultados fueron observados por Jensen, (1990) sobre una cubierta de alfalfa, en comparaciones realizadas con lisímetros, encontró un adecuado comportamiento del modelo de Penman Monteith, para estimar la $ET_{real}$ de alfalfa con errores inferiores al 3%. Otro estudio llevado a cabo por Ortega-Farias *et al*., (2000), observó que este modelo subestimo la $ET_{real}$ en tomate con un error absoluto de 4,23% y una desviación estándar del error (DEE) de 0,51 $mmdia^{-1}$. Similares resultados fueron observados por Argote, (2001) para un cultivo de tomate sometido a condiciones de invernaderos. Otro estudio llevado a cabo por Muñoz, (2001), indicó que es factible emplear el modelo de Penman Monteith para estimar la $ET_{real}$ de un viñedo con un error de 0,85% y una DEE de 1.31mm.

**Cuadro 4**. Análisis estadístico para la evapotranspiración real estimada por el modelo de Penman-Monteith y el método de la bandeja de evaporación. (Temporadas 2000/01 y 2001/02)

| Método | $r^2$ | DEE (mm/semana) | b | Test – Z |
|---|---|---|---|---|
| **ETPM** | 0,86 | 2,75 | 1,01 | V |
| **ETB** | 0,79 | 4,95 | 1,16 | F |

ETB = evapotranspiración de bandeja, (mm); ETPM = evapotranspiración de Penman-Monteith, (mm); $r^2$ = coeficiente de determinación; DEE = desviación estándar del error; b = pendiente de la regresión a través del origen; V = hipótesis nula (b=1); F = hipótesis alternativa (b≠1)

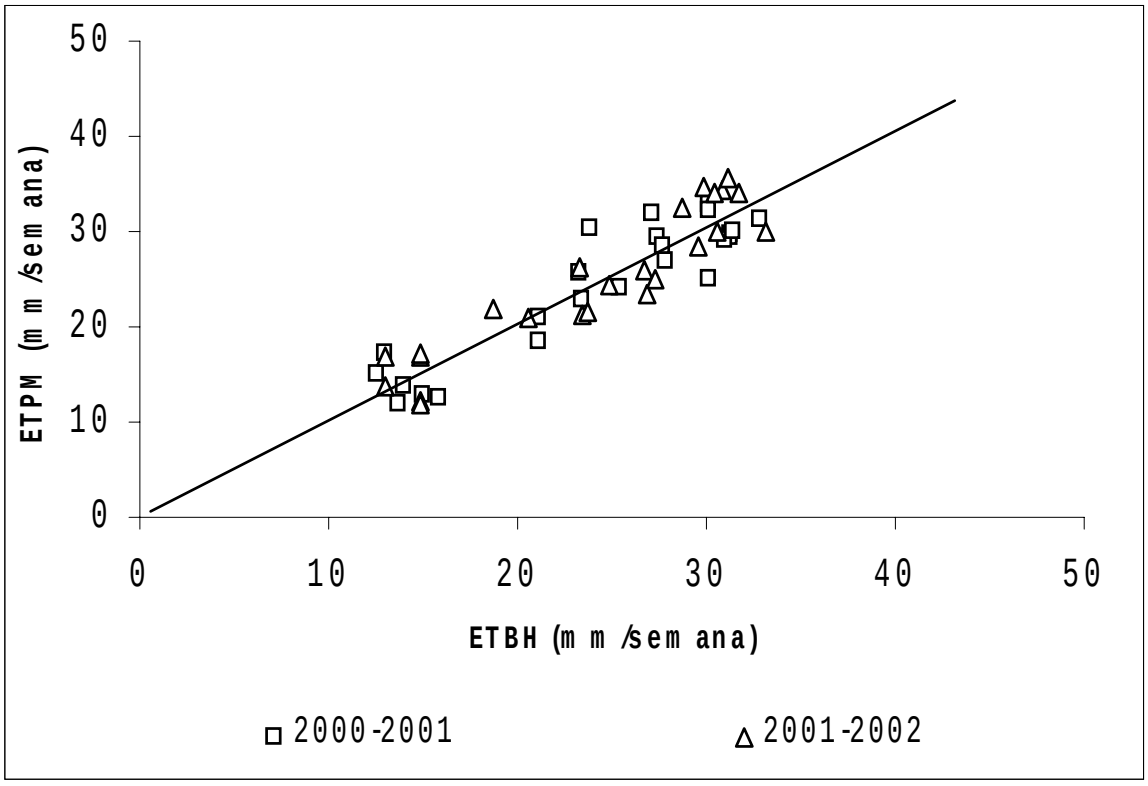



**Figura 1**. Comparación semanal entre la evapotranspiración real medida por el balance hídrico (ETBH) y estimada por la ecuación de Penman-Monteith (ETPM), para las temporadas 2000/2001 y 2001/2002.

Este estudio indicó una buena asociación entre los valores de ETBH y ETB, con valores de $r^2$ y b equivalentes a 0,79 y 1,16, respectivamente (cuadro 5). Sin embargo, el test Z indicó que el valor de la pendiente (b=1,16) fue estadísticamente diferente de uno, sugiriendo que la bandeja de evaporación tendió a sobreestimar la $ET_{real}$. Lo anterior, es ilustrado en la Figura 2, donde la mayor dispersión de puntos se encuentra entre los 15 y 25 mm por semanas. En este caso, el valor acumulado de ETB para el periodo de crecimiento de la vid fue de 686 mm, lo que representa un error de 14%. Los mayores errores fueron observados en los periodos de cuaja - pinta (28%) y pinta - cosecha (16%) (Cuadro 5). Donde la ETB tiende a subestimar la $ET_{real}$ en los primeros periodos fenológicos y a sobrestimar en los últimos (cuaja a pinta y pinta a cosecha) concordando con los observados por Muñoz, (2001). Este fenómeno se debe a que la planta alcanzó su mayor expresión vegetativa en el periodo de cuaja a pinta y ha comenzado el proceso de maduración de frutos recién cuajados.

Las discrepancias entre ETBH y ETB, observadas en este estudio, están asociada a la elección de los valores de Kp y Kc. Al respecto, Antonioletti *et al.*, (1998) indicaron que la bandeja puede presentar errores en la estimación de la evapotranspiración de referencia ($ET_r$)que pueden variar entre 21 y 55%. Estudios similares realizados en EE.UU. por Jensen *et al.*, (1990) indicaron que la bandeja puede presentar errores entre un 14 y 32% dependiendo del grado de aridez. Por otra parte, el Kc depende directamente de las interacciones no lineales del suelo, clima y planta, agregando un importante error en la estimación final del consumo de agua de la vid. Así por ejemplo el cuadro 1 señala valores de Kc para la vid en pleno crecimiento de 0,4 (Mitchell and Goodwin, 1996), 0,69 (Grattan, 1998) y 0,9 (Doorenbos y Pruitt, 1976). Asimismo en Chile, Corfo, (1987) plantea Kc para vides entre un rango de 0,1 a 0,15, por su parte el INIA en 1997 estimo los coeficientes de cultivos par vid en relación con el porcentaje de su estado de desarrollo.

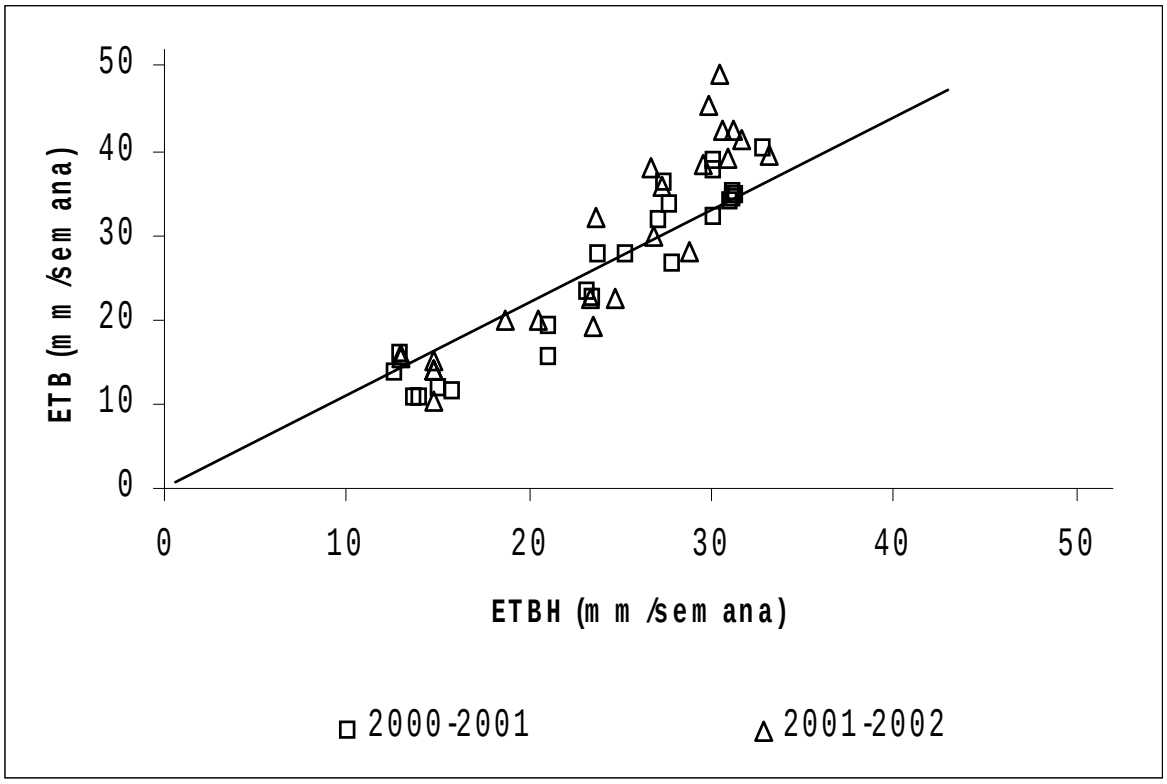



**Figura 2**. Comparación semanal entre la evapotranspiración real medida por el balance hídrico (ETBH) y estimada por la bandeja de evaporación (ETB), para las temporadas 2000/2001 y 2001/2002.

**Cuadro 5**. Evapotranspiración real acumulada por periodos fenológicos de la vid para el modelo de Penman-Monteith, método de bandeja de evaporación y balance hídrico.

| Método | B-F (mm) | F-C (mm) | C-P (mm) | P-C (mm) | Total (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| **ETB** | 96 | 59 | 264 | 271 | 687 |
| **ETPM** | 102 | 67 | 214 | 229 | 611 |
| **ETBH** | 107 | 58 | 207 | 251 | 623 |

ETB = evapotranspiración de bandeja; ETPM = evapotranspiración de Penman-Monteith; ETBH = evapotranspiración de balance hídrico; B-F = brotación - floración; F-C = floración - cuaja; C-P = cuaja - pinta; P-C = pinta - cosecha.

Al respecto, Ortega y Acevedo (1997) sugieren calibrar localmente la bandeja de evaporación para reducir el error en la estimación del consumo del agua de la vid, a través de un coeficiente de riego (Kr) que integre el efecto del Kp y Kc. Lo anterior es presentado en la Figura 3, donde se presenta los principales periodos fenológicos de la vid. En este caso el máximo valor de Kr fue observado para el periodo pinta – cosecha (Cuadro 7), en general estos Kr se ajustan de mejor forma a los Kc planteados por Doorenbos y Pruitt, 1976.

**Cuadro 6.** Coeficientes de riego (Kr) para cada estado fenológico de la vid**.**

| Estado fenológico | 2000/2001 | 2001/2002 | Promedio |
|---|---|---|---|
| **Brotación - Floración** | 0,35 | 0,39 | 0,37 |
| **Floración - Cuaja** | 0,43 | 0,52 | 0,47 |
| **Cuaja - Pinta** | 0,53 | 0,45 | 0,49 |
| **Pinta - Cosecha** | 0,57 | 0,51 | 0,54 |

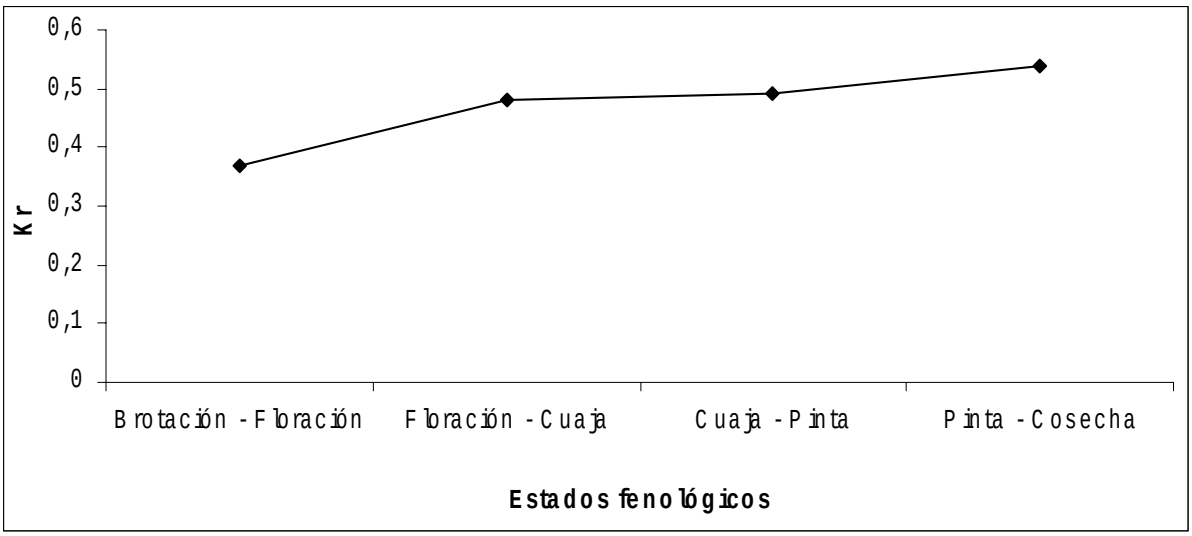
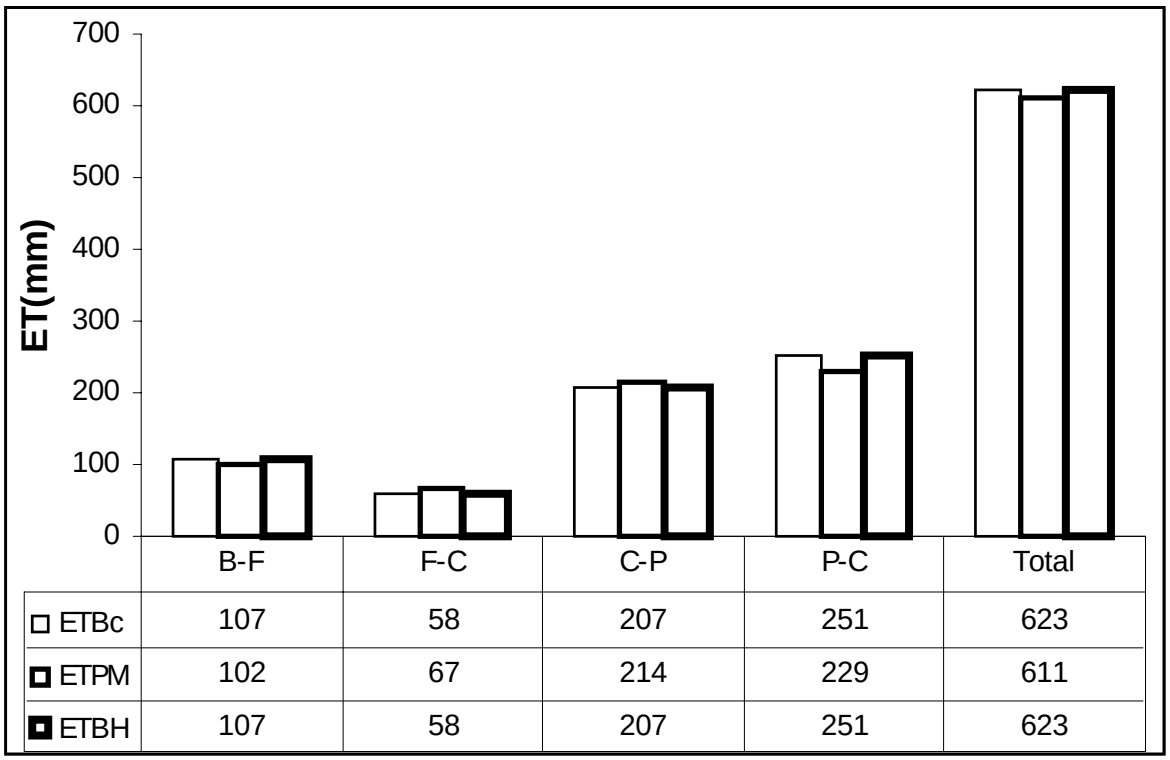



**Figura 3**. Coeficientes de riego por estado fenológico para las temporadas 2000/01 y 2001/02

La $ET_{real}$ acumulada estimada por el balance hídrico (ETBH), Penman-Monteith (ETPM) y bandeja calibrada (ETBc) para las principales etapas de crecimiento de la vid, es presentada en la Figura 4. En esta figura se puede observar que un 40 % del consumo total de agua (623 mm) corresponde al periodo entre pinta y cosecha. Estos resultados concuerdan con los observados por de Ferreyra (1996); Burgos *et al*., (1998) y Giner y Revuelto (2002), quienes encontraron que las necesidades hídricas de la vid para los períodos de pinta a cosecha corresponde a un 44 % del consumo total de agua de la vid. Además, en este cuadro se observa que el consumo de agua de la vid, estimada por los tres métodos en estudio (ETPM, ETBH y ETBc), son similares a los observados por Ferreyra (1996), Ojeda (2002), Burgos *et al*., (1998) y Muñoz, (2001) quienes determinaron que la vid necesita entre 600 y 700 mm de agua por temporada.




| | B-F | F-C | C-P | P-C | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| ETBc | 107 | 58 | 207 | 251 | 623 |
| ETPM | 102 | 67 | 214 | 229 | 611 |
| ETBH | 107 | 58 | 207 | 251 | 623 |

**Figura 4**. Evapotranspiración real promedio de ambas temporadas por periodos fenológicos de Penman-Monteith (ETPM), balance hídrico (ETBH) y bandeja de evaporación calibrada ETBc).

# V. CONCLUSIONES

1. El modelo de Penman-Monteith, estimó la evapotranspiración real de la vid con un error absoluto del 1.3% y un DEE de 2,75 mm semanas$^{-1}$ para las dos temporadas (2000-2001 y 2001-2002). Los resultados de este análisis sugieren que la ecuación de Penman-Monteith puede ser utilizada para estimar directamente la evapotranspiración real del cultivo cuando se disponen de sistemas meteorológicos automáticos.

2. El modelo de evaporación de bandeja presenta un DEE = 4.95 mm semanas$^{-1}$ y un error absoluto de 16 % lo que plantea que la evapotranspiración de bandeja (ETB) no fue capaz de estimar en forma adecuada el consumo de agua en la vid en ninguna de las etapas fenológicas, ya que subestima la $ET_{real}$ en los períodos iniciales de Brotación a cuaja y los sobreestima de cuaja a cosecha.

3. La importancia de ajustar la evaporación de bandeja (EB) con los coeficientes de riego, permiten reducir considerablemente los riegos excesivos en las etapas de cuaja a pinta y pinta a cosecha. Por otra parte estos coeficientes de riego (Kr) pueden ser ocupados en forma directa con los datos de evaporación de bandeja, sin necesidad de tener que ocupar Kp y Kc extraídos de literatura.

## VI. BIBLIOGRAFÍA


1. Aceituno, L. 2000. Efecto de distintos niveles de reposición hídrica post cuaja sobre distintas variables productivas y de calidad en mostos y vinos cv Cabernet Sauvignon. Tesis Ing Agr Universidad de Talca. Facultad de Cs Agrarias. Escuela de Agronomía. 2000
2. Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Water resources, development and management service. FAO - food and agriculture organization of the United Nations Rome, 1998
3. Antonioletti, R., González, P. y Ortega, S. 1998. Sobre la Evapotranspiración: Análisis Comparativo de Algunos Métodos de Estimación en la Región del Maule. Agrociencia Vol. 14 (2): 20-32.
4. Argote, M. 2001. Estimación de la evapotranspiración real de un cultivo de tomate (Lycopersicon esculentum Mill), usando el modelo de Penman-Monteith y bandeja modificada. Memoria de Título Ing. Agr. Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Agrarias. Escuela de Agronomía.
5. Burgos, L.; Ferreyra, R.; Sellés, G.; Valenzuela, B. 1996 manejo del riego y calidad del vino. Revista Tierra Adentro nº 7. p 30-33.
6. Cabas, N.; Sotomayor, J.; Lavín, A. 1996. Secano interior riego en viñas. Serie Quilamapu Nº 61. Instituto de investigación Agropecuaria. Centro experimental Cauquenes – Chile. p38
7. Cabas, N.; Sotomayor, J.; Lavín, A. 1996. Secano interior riego en viñas. Serie Quilamapu Nº 61. Instituto de investigación Agropecuaria. Centro experimental Cauquenes – Chile. p38
8. Calderón, R. 2000. Estimación directa del flujo de calor latente y evapotranspiración real de un cultivo de tomate (Lycopersicon esculentum Mill), usando el modelo de Penman-Monteith. Memoria de Título Ing. Agr. Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Agrarias. Escuela de Agronomía.
9. Chonél, X; Tregoat1, O; Van Leeuwen, C; Dubourdieu, D. 2000. Vine water deficit : among the 3 applications of pressure chamber, stem water potential is the most sensitive indicator. International Journal of Vine and du Wine Sciencies. Vol 34. N°4. October 2000

10. Doorenbos, J.; Pruitt, W. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje N° 24, Roma. p194
11. Ferreyra, R.; Sellés, G. 1999. Viñedos y vinos. El riego en vides viniferas. Chile agricola. Julio-Agosto 1999 p133-135
12. Ferreyra, R.; Sellés, G. 2002. Estrategias para manejar el riego en viñedos. Aconex n° 75, Abril-Junio, 2002 p5-9
13. Fuentes, J. 1996. Técnicas de riego. Ediciones Mundi Prensa. Ministerio de Agricultura, Pesca y alimentación.
14. Gallardo, I. 1987. El riego programado. Un método para calcular las necesidades de regadío. IPA Quilamapu, Nº 34, 1987 p10-14
15. Giner, J y Revuelto, J. 2002. Como realizar una correcta fertirrigación en viñedo. Vida rural n° 143, febrero 2002, Madrid-España.
16. Goowin, I. 1995. Irrigation of vineyards. Intitute of sustainable irrigated agriculture p8-13
17. Gurovich, A. 1998. Aplicaciones del riego deficitario controlado en vid, efecto sobre la calidad de la uva y el vino. Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía, p106
18. Gurovich, L. 1985. Fundamentos y diseño de sistemas de riego. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa rica.
19. Gurovich, L. 1997. Respuesta de la vid a condiciones de humedad del suelo restringida, por motivos de sequía. Revista Aconex nº 54. p 5-10
20. Hardie, W.; Considine, J.1976. Response of grapes to water deficit stress in particular stage of development. Am, J. Enol. Viticult., Vol, 27, Nº.2, p55-60
21. Jensen, M.; Burman, R.; Allen, R. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. Ed. American society of civil Engineers, New York, USA. p111-117
22. Jones, A. 2001. Evaluación de tres metodologías para estimar el consumo de agua en tomate (Licopersicon esculentum, Mill) y su efecto sobre la frecuencia de riego. Memoria de Título Ing. Agr. Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Agrarias. Escuela de Agronomía.
23. Martínez, A. Hera, L. Gutiérrez, L. 2000. Consideraciones sobre el riego de la vid. Equipo de Viticultura y Enología. CIDA La Alberca (Murcia)

24. Matthews, M.; Anderson, M. 1989. Reproductive development in grape (Vitis Vinifera L.): responses to seasonal water deficits. Am. J. Enol., Vol40, Nº1.1989 p52-59
25. Matthews, M.; Anderson, M.; Schultz, H. 1987. Phenologic and growth responses to early and late season water deficits in Cabernet franc. Department of viticulture and enology, University of california, Davis, Ca, USA. Vitis 26, p147-160
26. Miranda, O.1982. Riego programado. Revista el campesino. Diciembre 1985 p 8-10
27. Muñoz, M.J.2001. Estimación del consumo de agua en vid vinífera c v Cabernet sauvignon. Usando la bandeja de evaporación y el modelo de Penman Monteith. Tesis Ing Agr Universidad de Talca. Facultad de Cs Agrarias. Escuela de Agronomía.
28. Ojeda, H. 2002. El uso de la restricciones hídricas en los viñedos como regulador de rendimiento y calidad, Tópicos de actualización en viticultura y enología. Mendoza. Argentina. P144
29. Ortega, S. 1999. Servicio de programación del riego en vides vinifera. Seminario innovaciones en viticultura. Centro Tecnológico de la Vid y el Vino. Universidad de Talca. p 44-59
30. Ortega, S.; Acevedo, C. 1999. Programación del riego. Programación del riego en sistemas por surco y goteo. Servicio Integrado de Agroclimatología y Riego. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad de Talca.
31. Ortega, S.; Cuenca, R.; Soliz, B.; Ortiz, C.1996. Evaluación del calor latente usando la ecuación de Penman-Monteith, con un valor variable de la resistencia de la cubierta vegetal a la transferencia de vapor de agua. Facultad de Agronomía de la P. Universidad Católica de Chile. Vol. 23. N°2 - 3, 1996
32. Ortega-Farias, S., Calderon, R., Acevedo, C. y Fuentes S. 2000. Estimación de la evapotranspiración real diaria de un cultivo de tomates usando la ecuacion de Penman-Monteith. Ciencia e investigacion agraria. Vol 27 Nº 2. Mayo-Agosto, 2000
33. Ortega-Farias, S.; Cuenca, R. y English, M. 1995. Hourly grass evapotranspiration in modified martime enviroment. Journal of irrigation and drainage engineering, november/december 1995. p369-373

34. Ortíz, C. 1999. Análisis de la evapotranspiración usando la ecuación de Penman-Monteith bajo diferentes condiciones atmosféricas y dos niveles de humedad en el suelo. Memoria de Título Ing. Agr. Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Agrarias. Escuela de Agronomía.
35. Puyo M.A. 1992. Influencia de diferentes regimenes de riego sobre el desarrollo vegetativo productivo maduración y calidad de vinos Cabernet sauvignon. Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía pp 106
36. Ramírez, J.; Valenzuela, A. 1998. Necesidades de agua de los cultivos. Comisión Nacional de riego y Universidad de Concepción. Chillan, Febrero 1998. p14-18
37. Santa Olalla, F.; De Juan Valero, J. 1993. Agronomía del riego. En: López, P.; López, H. Servicio de asesoramiento de riego. España, Madrid, Editorial Cordillera. p 600
38. Sellés, G.; Ferreyra, R. 1999. Revista Chile riego. Aproximaciones para determinar el momento oportuno del riego, ventajas e inconvenientes, Diciembre 1999
39. Solís, B. 1995. Evaluación de la Evapotranspiración de Referencia Mediante el Método de Penman-Monteith. Memoria de Grado Ing. Agr. Universidad de Talca. Facultad de Ciencias Agrarias. Escuela de Agronomía
40. Steel, C.; Keller, M. 2000. Vine stress, cropping and berry composition. National Wine and Grape Industry Centre, School of Wine and Food Sciences, Charles Sturt University, Australia.
41. Stewart, B.; Nielsen, D. 1990. Irrigation benchmarks and best management practices for winwgrapes. Primary industries and resources SA. Technical report N° 259
42. Tosso, J. 1976. determinación de evapotranspiración y coeficientes K para varios cultivos. Agricultura Técnica. Chile, 1976. p151-155
43. Tosso, J. y Torres, J.J. 1986. Relaciones hídricas de la vid, bajo diferentes niveles de riego, usando goteo, aspersión y surco. II. Efecto sobre el crecimiento vegetativo y la producción. Agricultura Técnica 46 (3): 282 - 289.
44. Varas, E. 1991. Tecnologías del riego. Estación experimental Quilamapu, boletín técnico Nº 168, mayo 1991. Chillan Chile, p62-75

# VII. ANEXOS

**1.- Parámetros de entrada de la ecuación de Penman-Monteith.**

En la ecuación de Penman-Monteith, la pendiente da la curva de presión de vapor en saturación puede ser calculada usando las ecuaciones

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T_a + 237{,}3)^2}$$

$$e_s = \exp\left[\frac{16{,}78 \cdot T_a - 116{,}9}{237{,}3 + T_a}\right]$$

donde $e_s$ = presión del vapor en saturación del aire (kpa), $T_a$ = temperatura del aire (ºc).

El poder secante de la atmósfera representa el efecto combinado de velocidad del viento, temperatura del aire, déficit de presión de vapor y estabilidad atmosférica sobre la cubierta del cultivo, y puede ser definido como;

$$E_a = \frac{L_v \cdot \varepsilon \cdot \rho_a (e_s - e_a)}{r_a \cdot P}$$

donde $L_v$ = calor latente de vaporización (j $kg^{-1}$)

$\varepsilon$ = relación entre el peso molecular del agua y el peso molecular del aire seco (0,622);

$\rho_a$ = densidad del aire (kg $m^{-3}$)

$e_a$ = presión actual del vapor de agua (kpa)

p = presión atmosférica (kpa)

El calor latente de vaporización, densidad del aire y presión atmosférica pueden ser calculadas a través de las ecuaciones;

$$L_v = [2500,78 - 2,3601 \cdot T_a] \cdot 10^3$$

$$\rho_a = 3,4839 \cdot \left[ \frac{P - 0,378 \cdot e_a}{273,16 + T_a} \right]$$

**P = 101,3 - 0,01055 E**

donde E = elevación (m).

La resistencia aerodinámica ($r_a$) es la resistencia del aire al flujo de calor y vapor de agua desde la superficie de la cubierta vegetal a una altura de referencia, y depende de la velocidad del viento, estabilidad atmosférica y arquitectura foliar del cultivo. Este parámetro puede ser expresado como;

$$r_a = \frac{\ln[(z-d)/z_{om}] \cdot \ln[(z-d)/z_{ov}]}{k^2 \cdot V}$$

donde z = altura del sensor (m)

$z_{om}$ = altura de rugosidad aerodinámica al movimiento del aire (m)

$z_{ov}$ = altura de rugosidad aerodinámica al movimiento del calor y del vapor de agua (m)

d = altura de desplazamiento del plano de referencia aerodinámico

k = constante de proporcionalidad de von kármán (0,41)

v = velocidad del viento horizontal (m $s^{-1}$)

donde los parámetros aerodinámicos de la cubierta vegetal se pueden calcular como;

**D = 0,67 $H_C$**

**$Z_{OM}$ = 0,123 $H_C$**

**$Z_{OV} = 0{,}1\ Z_{OM}$**

donde $H_c$ es la altura del cultivo (m).

Resistencia de la cubierta vegetal ($r_{cv}$) es la resistencia de la cubierta vegetal a la transferencia de vapor de agua en función de la energía disponible del cultivo, calor del suelo, déficit de presión de vapor y contenido de humedad del suelo. Lo anterior puede ser expresado matemáticamente como:

$$r_{cv} = \frac{\rho_a \cdot Ce \cdot (e_s - e_a) \cdot (CC - PMP)}{\Delta \cdot (R_n - G) \cdot (Ha - PMP)}$$

donde CC = capacidad de campo (%)

PMP = punto de marchitez permanente (%)

Ha = humedad de suelo actual del cultivo (%)

**2.- Cuadro 7.** Datos semanales de los cálculos de ET a través de los modelos de ETB, ETPM y ETBH, para las dos temporadas (1°Tem = 2000-20001, 2°Tem = 20001-2002)

| | 1° Tem | 2° Tem | 1° Tem | 2° Tem | 1° Tem | 2° Tem | 1° Tem | 2° Tem |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **semana** | **EB** | **EB** | **ETB** | **ETB** | **ETPM** | **ETPM** | **ETBH** | **ETBH** |
| 1 | 24,39 | 21,30 | 11,78 | 10,29 | 12,8 | 12,13 | 15,0 | 14,82 |
| 2 | 28,40 | 29,00 | 13,72 | 14,01 | 15,0 | 16,80 | 12,6 | 14,82 |
| 3 | 32,59 | 29,07 | 15,74 | 14,04 | 17,2 | 17,18 | 13,0 | 14,82 |
| 4 | 22,39 | 31,06 | 10,82 | 15,00 | 11,8 | 12,02 | 13,7 | 14,82 |
| 5 | 23,80 | 40,92 | 11,50 | 19,76 | 12,5 | 22,00 | 15,8 | 18,71 |
| 6 | 48,46 | 39,78 | 23,41 | 19,21 | 25,7 | 21,20 | 23,3 | 23,46 |
| 7 | 57,17 | 46,29 | 27,62 | 22,36 | 30,3 | 26,23 | 23,9 | 23,30 |
| 8 | 60,25 | 46,95 | 31,64 | 22,68 | 32,0 | 24,25 | 27,2 | 24,79 |
| 9 | 62,09 | 53,77 | 38,56 | 28,16 | 32,9 | 32,55 | 30,1 | 28,75 |
| 10 | 56,17 | 62,92 | 34,88 | 39,07 | 29,8 | 34,45 | 31,3 | 30,92 |
| 11 | 60,39 | 68,20 | 37,50 | 42,35 | 32,0 | 35,61 | 30,1 | 31,16 |
| 12 | 55,41 | 73,22 | 34,41 | 45,47 | 29,4 | 34,65 | 31,2 | 29,91 |
| 13 | 54,72 | 66,53 | 33,98 | 41,31 | 29,0 | 34,15 | 31,0 | 31,70 |
| 14 | 51,85 | 68,38 | 32,20 | 42,46 | 25,1 | 30,03 | 30,2 | 30,58 |
| 15 | 64,44 | 78,94 | 40,02 | 49,02 | 31,3 | 33,95 | 32,9 | 30,49 |
| 16 | 55,85 | 63,45 | 34,68 | 39,40 | 30,0 | 30,09 | 31,4 | 33,10 |
| 17 | 42,55 | 62,04 | 26,42 | 38,53 | 26,9 | 28,48 | 27,8 | 29,60 |
| 18 | 58,25 | 60,90 | 36,17 | 37,82 | 29,4 | 25,81 | 27,5 | 26,70 |
| 19 | 53,85 | 57,82 | 33,44 | 35,90 | 28,5 | 24,93 | 27,7 | 27,30 |
| 20 | 44,70 | 47,96 | 27,76 | 29,78 | 24,1 | 23,50 | 25,4 | 26,80 |
| 21 | 40,43 | 51,83 | 22,41 | 32,19 | 22,8 | 21,63 | 23,5 | 23,70 |
| 22 | 39,75 | 41,01 | 19,20 | 19,81 | 20,9 | 20,78 | 21,2 | 20,54 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 23 | 32,17 | 32,56 | 15,54 | 15,73 | 18,5 | 16,81 | 21,1 | 12,95 |
| 24 | 21,82 | 32,30 | 10,54 | 15,60 | 13,7 | 13,68 | 14,0 | 12,95 |