

EVALUACIÓN DE UN MODELO PARA SIMULAR EL FLUJO DE RADIACIÓN NETA SOBRE UN VIÑEDO CV. CABERNET SAUVIGNON

Evaluation of a model to simulate net radiation over a vineyard cv. Cabernet Sauvignon

Marcos Carrasco¹, y Samuel Ortega-Farías^{1*}

ABSTRACT

The net radiation (Rno) is the main energy balance component that controls evaporation and transpiration processes. In this regard, this study evaluated two models to estimate Rno above a commercial vineyard (cv. Cabernet Sauvignon) located in the Péncahue Valley, Maule Region (35°22' S lat; 71°47' W long; 75 m.o.s.l.). For that, an automatic meteorological station (EMA), installed in the central part of the vineyard, was used to measure Rno, solar radiation (Rsi), air temperature (Ta), canopy temperature (Tf) and relative humidity (RH). On a 30 minutes interval, results indicated that the models Rne1 (assuming $T_a \neq T_f$) and Rne2 (assuming $T_a = T_f$) were able to estimate Rno with a mean absolute error (MAE) less than 40 W m^{-2} and a root mean square error (RMSE) less than 61 W m^{-2} . On daily interval, the models estimated Rno with MAE and RMSE values less than 1.68 and 1.75 $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectively. In global term, the models presented errors less than 9 and 11% on 30 minute and daily intervals, respectively. Furthermore, this study indicated that the incorporation of canopy temperature did not improve substantially the estimation of Rno, in spite of having a temperature gradient ($dT = T_f - T_a$) between -3 and to 4 °C. These results suggest that model Rne2 could be used for estimating Rno using measurements of Rsi, Ta y HR.

Key words: atmospheric emissivity, terrestrial radiation, atmospheric radiation, energy balance.

¹ Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Agrarias, Casilla 747, Talca, Chile. E-mail: sortega@utalca.cl *Autor para correspondencia.

INTRODUCCIÓN

Investigaciones recientes han indicado que es posible estimar directamente la evapotranspiración actual de la viña (ETv) usando modelos complejos que determinan el consumo de agua en forma compartimentalizada, donde la evaporación del suelo y la transpiración de la planta se cuantifican por separado. Un modelo de estas características es el propuesto por Shuttleworth y Wallace (S-W), que ha permitido estimar adecuadamente la ET de varios cultivos escardados (Daamen y McNaughton, 2000; Anadranistakis et al., 2000; Kato et al. 2004). Estudios realizados por Sene (1994) y Ortega-Farías *et al.* (2007) en viñas, han sugerido que el modelo de S-W se puede usar para estimar directamente la ETv utilizando información climática generada de una EMA instalada sobre el viñedo. En este caso, el modelo de S-W requiere de una adecuada parametrización del balance de energía de la viña, donde el flujo de radiación neta es su componente principal ya que provee la energía necesaria para llevar a cabo los procesos de evaporación, transpiración y de transferencia de calor entre el suelo y el aire. Desafortunadamente la mayoría de las estaciones meteorológicas automáticas (EMA) que se ofrecen en el mercado no miden directamente la Rn, lo que obliga a cuantificarla por medio de modelos físicos que utilizan como variables de entrada la radiación global (Rg), temperatura del aire (Ta), temperatura del dosel (Tf) y humedad relativa (HR) (Iziomon *et al.*, 2000; Irmak *et al.*, 2003; Ortega-Farías *et al.*, 2004).

El flujo de radiación neta, que representa el balance de la radiación de onda corta (0,15 a 3 μm) y de onda larga (3 a 100 μm), es definida como (Arya, 2001):

$$R_n = R_{si} - R_{sr} + R_{li} - R_{lr} = (1-\alpha) R_{si} + R_{li} - R_{lr} \quad (1)$$

donde R_n = flujo de radiación neta (W m^{-2}); R_{si} = flujo de radiación de onda corta incidente o radiación solar (W m^{-2}); R_{sr} = flujo de radiación de onda corta reflejada (W m^{-2}); R_{li} = flujo de radiación de onda larga incidente o atmosférica (W m^{-2}); R_{lr} = flujo de radiación de onda larga emitida o terrestre (W m^{-2}), α = albedo (adimensional).

Generalmente, en el cálculo de la R_n se utiliza el cociente entre R_{sr} y R_{si} (o albedo), el cual depende de las características del dosel y por ende está determinado por el sistema de conducción, geometría del dosel, distancia de plantación y porcentaje de cobertura del follaje (Pieri and Gaudillère, 2003). Por otro lado, R_{li} y R_{lr} se cuantifican a través de la ley de Stefan-Boltzman y dependen de la temperatura del aire y dosel, respectivamente (Monteith y Unsworth, 1990). Considerando lo anterior, la ecuación (1) se puede expresar como (Campbell, 1995):

$$R_n = (1 - \alpha)R_{si} + \varepsilon_a \sigma T_a^4 - \varepsilon_f \sigma T_f^4 \quad (2)$$

donde ε_a = emisividad del aire (adimensional), σ = constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), T_a = temperatura del aire ($^{\circ}\text{K}$), T_f = temperatura del dosel ($^{\circ}\text{K}$), ε_f = emisividad del dosel. ε_f es relativamente constante y en muchas aplicaciones agrícolas se utiliza un valor promedio de 0,98 (Allen *et al.*, 1998). ε_a , que depende del tipo de nube, grado de cobertura nubosa, humedad atmosférica y la temperatura del aire, se puede cuantificar como (Ortega-Farías *et al.*, 2004):

$$\varepsilon_a = \phi \left(\frac{e_w}{T_a} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (3)$$

donde ϕ = coeficiente empírico; e_w = presión de vapor (kPa).

Debido a que en Chile no existen estudios sobre modelamiento del balance de energía del viñedo, el objetivo de esta investigación es evaluar un modelo para simular el flujo de radiación neta sobre un viñedo comercial cv. Cabernet Sauvignon, conducido en espaldera vertical simple, bajo condiciones atmosféricas de días despejados y nublados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Con el objetivo de evaluar un modelo que simula el flujo de radiación neta sobre un viñedo (*Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon) se colectaron datos agrometeorológicos durante las temporadas agrícolas 2003-2004 y 2004-2005. Para esto se estableció una unidad agroclimática dentro de un viñedo de 10 años de edad, plantado en dirección norte-sur, ubicado en el valle de Pencahue, Región del Maule, Chile ($35^{\circ}22'$ lat. Sur; $71^{\circ}47'$ long. Oeste; 75 m.s.n.m.).

El clima del valle de Pencahue es de tipo templado semiárido con una temperatura estival promedio máxima y mínima de 31 y 11 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente. El régimen hídrico presenta una precipitación promedio anual de 700 mm, con un período seco de siete meses (base de datos Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agroclimatología (CITRA), Universidad de Talca). El suelo presenta una textura franco arenosa, pertenece a la serie Cunculén (Aquic Palexeralfs) (CIREN-CORFO, 1997). La profundidad efectiva de raíces se concentra en los primeros 60 cm, debido a la presencia de una estrata compactada que impide el crecimiento de raíces y la infiltración de agua a profundidades mayores. Para los primeros 60 cm de profundidad, la densidad aparente (D_a), capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) fueron 1,44 g cm^{-3} , 180,0 mm y 66,0 mm, respectivamente.

La unidad agroclimática tenía una superficie de 4 ha con una densidad de plantación de 2 778 plantas ha⁻¹ (3,0 m entre hileras y 1,2 sobre hileras). Las vides fueron conducidas en espaldera vertical simple (1,5 m de altura) y podadas en cordón apitonado con 24 brotes por planta. En ambas temporadas el viñedo se mantuvo en óptimas condiciones de manejo agronómico en cuanto a fertilización, control fitosanitario y riego. Se usó sistema de riego por goteo (descarga por gotero de 3,5 L h⁻¹) con una frecuencia de riego determinada por mediciones del contenido volumétrico de agua en el suelo medido a través de un reflectómetro TDR ((Time Domain Reflectometry, Trase System 6050X1, Santa Bárbara, California, EE.UU) (Acevedo *et al.*, 2005). Estas mediciones se realizaron dos veces por semana durante todo el período de crecimiento de la vid, hasta la profundidad efectiva de las raíces (60 cm). Se midió el área foliar a lo largo de todo el período fenológico utilizando un medidor de área foliar (Li-Cor, Li 3100, Lincoln, Nebraska, USA) a partir del cual se calcularon los valores para el índice de área foliar (IAF), que varió entre 0,99 y 1,39 y entre 0,81 y 0,88, para las temporadas 2003-2004 y 2004-2005, respectivamente.

Una estación meteorológica automática (Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) se instaló en la parte central de la unidad agroclimática, para medir simultáneamente en intervalos del 30 minutos, la temperatura del aire (Ta), temperatura del dosel o follaje (Tf), humedad relativa de aire (HR), radiación solar incidente (Rsi) y flujo de radiación neta (Rn). El modelo de los sensores, unidades y altura de instalación sobre el nivel son indicados en el Cuadro 1.

Para implementar el modelo de Rn, se utilizaron valores de ε_f y α equivalentes a 0,98 y 0,18, respectivamente. En este caso, el valor del albedo se obtuvo a través de mediciones realizadas con un radiómetro que mide las longitudes de onda corta y larga de la Ecuación 1 (CNR1, Kipp&Zonen Inc., Delft, The Netherlands). El CNR1 se ubicó sobre un viñedo regado por goteo y conducido en espaldera (cv. Merlot), cuyas características del dosel (sistema de conducción, geometría del dosel, distancia de plantación y porcentaje de cobertura del follaje) son similares a las observadas en este estudio. En forma similar, Pieri and Gaudillère (2003) encontraron un albedo de 0,20 para un sistema de conducción en espaldera, cuya relación entre la altura del dosel y distancia entre hilera fue equivalente a 0.91. Por otro lado, realizando un análisis de optimización no lineal, en la misma base de datos, se encontró que el coeficiente empírico ϕ (Ecuación 3) fue equivalente a 1,51 y 1,91 para las horas del día (Rsi > 0) y noche (Rsi < 0), respectivamente.

Para evaluar el comportamiento del modelo (Ecuación 2), los flujos de radiación neta estimados (Rne) se compararon con los flujos de radiación neta observados (Rno) mediante un radiómetro neto ubicado en la

estación meteorológica automática. La validación del modelo se realizó asumiendo un gradiente de temperatura (dT) entre el follaje y el aire distinto (modelo Rne1) e igual (modelo Rne2) a cero. En este caso, los modelos Rne1 y Rne2 requieren dos y un nivel de medición de la temperatura, respectivamente. En general las EMA usadas actualmente en la producción agrícola tienen un nivel de medición.

La comparación incluyó como parámetros estadísticos el error absoluto medio (MAE), cuadrado del error medio (RMSE) y el cociente (b) entre los valores observados (R_{no}) y estimados (R_{ne1} , R_{ne2}) del flujo de radiación neta (Ortega-Farías *et al.*, 2006). Adicionalmente, se incluyó el test Z para evaluar si el cociente b fue estadísticamente diferente a uno, con un intervalo de confianza de un 95%.

Cuadro 1. Variables meteorológicas medidas sobre un viñedo conducido en espaldera vertical simple (cv. Cabernet Sauvignon).

Table 1. Meteorological variables measured above a vineyard (cv. Cabernet Sauvignon) trained on a vertical shoot positional system.

Variable	Modelo del sensor	Unidad	Altura sobre el suelo (m)
Temperatura del aire (T_a)	Vaisala, (HMP35C)	°C	2,7
Humedad relativa (HR)	Vaisala, (HMP35C)	%	2,7
Temperatura del dosel (T_f)	Vaisala, (HMP45C)	°C	1,2
Radiación solar (R_{si})	LI200X	W m ⁻²	3,5
Flujo radiación neta (R_{no})	REBS Q7.1.	W m ⁻²	3,5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El déficit de presión de vapor (DPV) tendió a aumentar gradualmente durante la mañana hasta alcanzar valores máximos entre las 1700 y 1800 h, cuando se presentaron las máximas demandas por valor de agua (**Figura 1**). Los promedios máximos fueron de 3,1 y 3,4 kPa, para las temporadas 2003-2004 y 2004-2005, respectivamente. La mayor variabilidad en el DPV fue encontrada en la temporada 2004-2005, donde la desviación estándar (DE) para el período de máxima demanda atmosférica fue de 1,2 kPa. Por otro lado, los valores de dT fueron positivos durante el día y negativos durante la noche (**Figura 2**). Los valores de dT se incrementaron paulatinamente desde el principio del día hasta llegar a un máximo en la tarde, para decrecer en la medida que disminuyeron los niveles de radiación solar. Los valores mínimos y máximos de dT fueron de -3 y 4 °C (DE $\pm 1,8$ °C), para ambas temporadas. Para el modelo Rne2 que asume $T_a = T_f$, Ortega-Farías *et al.* (2000) indicaron que es muy importante mantener la cubierta vegetal en excelentes condiciones de humedad de suelo, con el objeto de minimizar el gradiente de temperatura entre el aire y el cultivo para reducir errores potenciales en la estimación de R_n .

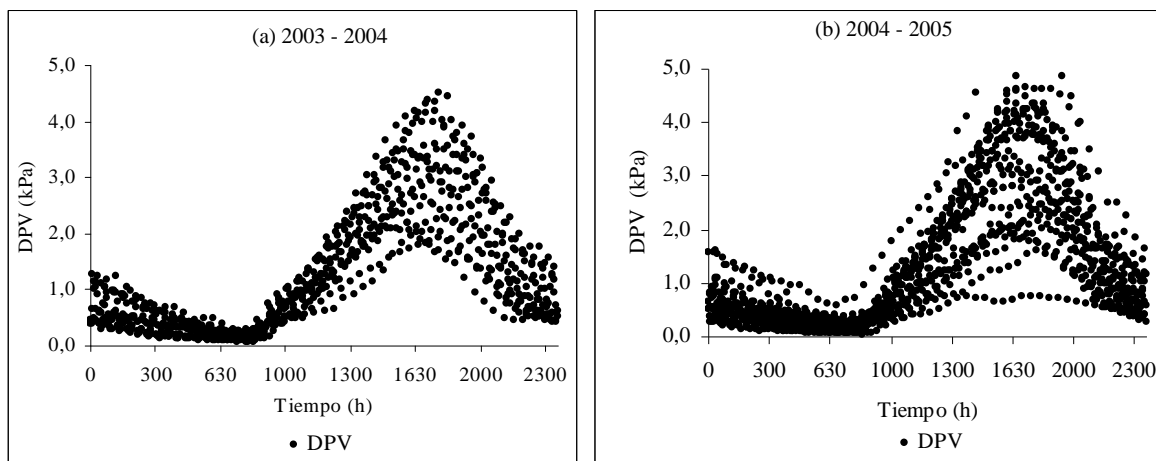


Figura 1. Variación diurna del déficit de presión de vapor (DPV) para un viñedo comercial cv. Cabernet Sauvignon durante las temporadas agrícolas (a) 2003-2004 y (b) 2004-2005. Valle de Pencahue, Chile.

Figure 1. Daytime variation of vapour pressure deficit (DPV) for a commercial vineyard cv. Cabernet Sauvignon during (a) 2003-2004 and (b) 2004-2005 growing seasons. Pencahue Valley, Chile.

Similar al DPV, los máximos valores de dT se encontraron entre las 1700 y 1800 h cuando se observó una mayor variabilidad en la segunda temporada. Respecto al comportamiento de dT , Ortega-Farías *et al.*, (2000) señalaron que en el caso de cultivos y praderas, la temperatura superficial y la temperatura del aire usualmente no tienen la misma evolución durante el día, debido a que la temperatura de la superficie del dosel alcanza su máximo valor al momento de mayor radiación solar, mientras que la temperatura del aire alcanza su máximo al final de la tarde, por lo tanto, los valores del gradiente de temperatura entre el follaje

y aire se tornaron negativos. Para la viña se observa que el mayor dT se produjo dos horas después de la máxima irradiación solar (1500 h), situación que coincidió con el mayor DPV.

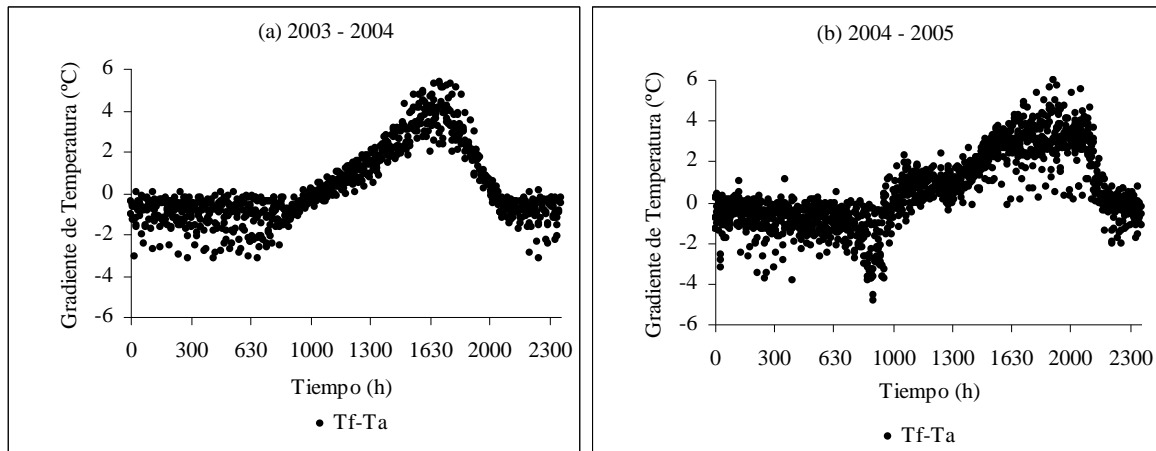


Figura 2. Variación diurna del gradiente de temperatura entre el dosel (Tf) y el aire (Ta) para un viñedo comercial cv. Cabernet Sauvignon durante las temporadas agrícolas (a) 2003-2004 y (b) 2004-2005. Valle de Pencahue, Chile.

Figure 2. Daytime variation of temperature gradient between the canopy (Tf) and air (Ta) for a commercial vineyard cv. Cabernet Sauvignon during (a) 2003-2004 and (b) 2004-2005 seasons. Pencahue Valley, Chile.

En ambas temporadas existió una buena comparación global entre R_{no} vs. R_{ne1} y R_{no} vs. R_{ne2} , tanto para días despejados como nublados (**Cuadros 2 y 3**). Al respecto, los valores promedios del cociente b , para ambas temporadas, fueron mayores a 0,92, con un MAE y RMSE inferiores 34 y 48 $W m^{-2}$, respectivamente. En general, las mayores desviaciones de R_{ne1} y R_{ne2} se encontraron en las condiciones de día nublado, donde el cociente b varió entre 0,91 y 0,93. Para las condiciones atmosféricas de día despejado y nublado, los resultados del test-Z indicaron que el cociente b fue significativamente distinto de uno, sugiriendo que los modelos propuestos (R_{ne1} y R_{ne2}) tendieron a sobreestimar los valores de R_{no} , con errores que variaron entre 7 y 9%. Además, las **Figuras 3 y 4** muestran que la nube de puntos presentó una dispersión regular de datos alrededor de la línea 1:1, con una tendencia de los modelos R_{ne1} y R_{ne2} a la subestimación para los valores observados del flujo de radiación neta menores a $200 W m^{-2}$. Además, las **Figuras 3b y 4b** muestran que la temporada 2004-2005 presentó una mayor dispersión de puntos alrededor de la línea 1:1 en comparación con la temporada 2003-2004. Por otro lado, el análisis estadístico indicó que al introducir la temperatura del dosel en la cuantificación de la radiación terrestre no mejoró las estimaciones de R_{no} , pues los valores de MAE, RMSE y cociente b para los modelos R_{ne1} y R_{ne2} fueron similares para ambas temporadas y condiciones atmosféricas (**Cuadros 2 y 3**).

Cuadro 2. Análisis estadístico para el modelo de flujo de radiación neta (Rne1), asumiendo un gradiente de temperatura entre el dosel y el aire distinto de cero ($T_a \neq T_f$).

Table 2. Statistical analysis for the net radiation model (Rne1) assuming a temperature gradient between the canopy and air different from zero ($T_a \neq T_f$).

	MAE ($W m^{-2}$)	RMSE ($W m^{-2}$)	Cuociente b	Test-Z
a) Temporada 2003-2004				
Día despejado	26	35	0,93	F
Día nublado	31	46	0,91	F
Promedio	28	40	0,94	F
b) Temporada 2004-2005				
Día despejado	27	40	0,93	F
Día nublado	40	61	0,93	F
Promedio	33	50	0,93	F
Promedio para ambas temporadas	31	45	0,94	F

MAE = error absoluto medio; RMSE = cuadrado del error medio; b = cuociente entre los flujos de radiación neta observada (Rno) y estimada (Rne1); V = hipótesis nula ($b=1$), F=hipótesis alternativa ($b \neq 1$), T_a = temperatura del aire ($^{\circ}C$), T_f = temperatura del dosel ($^{\circ}C$).

Cuadro 3. Análisis estadístico para el modelo de flujo de radiación neta (Rne2), asumiendo un gradiente de temperatura entre el dosel y el aire igual a cero ($T_a = T_f$).

Table 3. Statistical analysis for the net radiation model (Rne2) assuming a temperature gradient between the canopy and air equal to zero ($T_a = T_f$).

	MAE ($W m^{-2}$)	RMSE ($W m^{-2}$)	Cuociente b	Test-Z
a) Temporada 2003-2004				
Día despejado	33	39	0,92	F
Día nublado	38	49	0,91	F
Promedio	34	44	0,92	F
b) Temporada 2004-2005				
Día despejado	29	42	0,91	F
Día nublado	39	60	0,91	F
Promedio	34	51	0,91	F
Promedio para ambas temporadas	34	48	0,92	

MAE = error absoluto medio; RMSE = cuadrado del error medio; b = cuociente entre los flujos de radiación neta observada (Rno) y estimada (Rne2); V = hipótesis nula ($b = 1$); F = hipótesis alternativa ($b \neq 1$); T_a = temperatura del aire ($^{\circ}C$); T_f = temperatura del dosel ($^{\circ}C$).

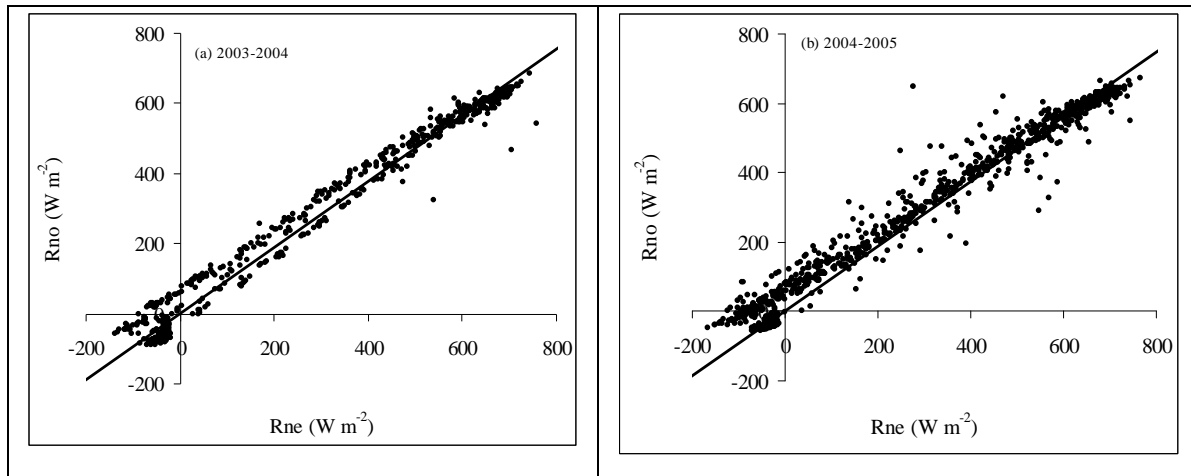


Figura 3. Comparación entre los flujos de radiación neta observada (Rno) y estimada (Rne1) para un viñedo cv. Cabernet Sauvignon durante las temporadas agrícolas (a) 2003-2004 y (b) 2004-2005. En este caso, Rn fue calculado asumiendo un gradiente de temperatura entre el aire y dosel distinto de cero.

Figure 3. Comparison between observed (Rno) and estimated (Rne1) net radiation for a commercial vineyard cv. Cabernet Sauvignon during 2003-2004 and 2004-2005 seasons. In this case, Rn was calculated assuming a temperature gradient between the air and canopy different from zero.

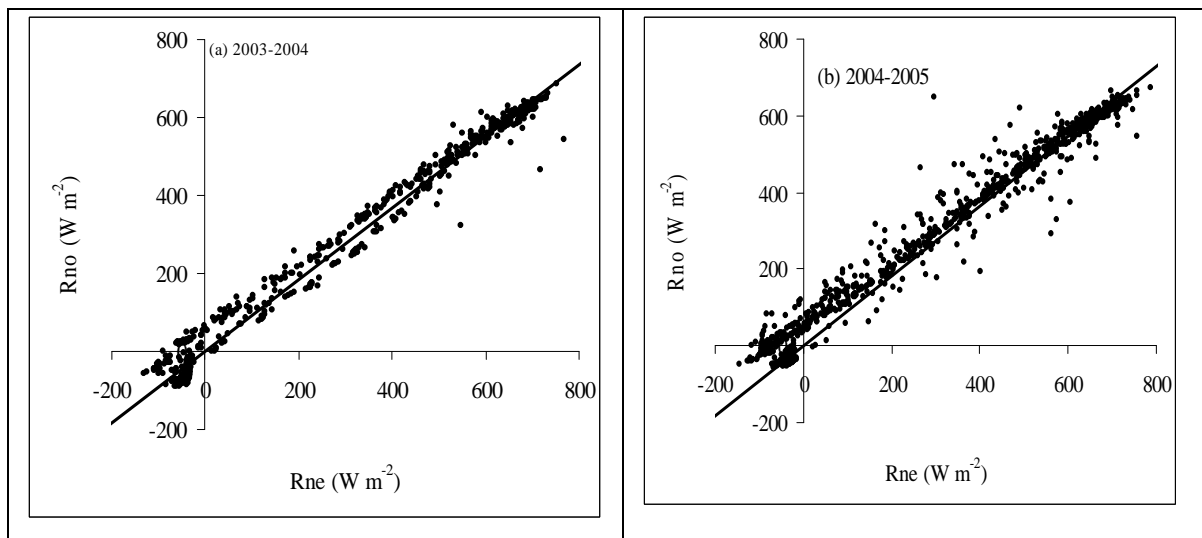


Figura 4. Comparación entre los flujos de radiación neta observada (Rno) y estimada (Rne2) para un viñedo cv. Cabernet Sauvignon durante las temporadas agrícolas (a) 2003-2004 y (b) 2004-2005. En este caso, Rn fue calculado asumiendo un gradiente de temperatura el aire y dosel igual a cero.

Figure 4. Comparison between observed (Rno) and estimated (Rne2) net radiation for a commercial vineyard cv. Cabernet Sauvignon during 2003-2004 and 2004-2005 seasons. In this case, Rn was calculated assuming a temperature gradient between the air and canopy equal to zero.

En ambas temporadas, los peores ajustes de los modelos fueron encontrados para las condiciones atmosféricas de día nublado, con máximos valores de MAE y RMSE equivalentes a 40 y 61 W m^{-2} , respectivamente (**Cuadros 2 y 3**). Resultados similares fueron reportados por Ortega-Farias *et al.* (2000) en una cubierta vegetal de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), donde el modelo de R_n presentó los mayores errores en los días nublados, los cuales no superaron los 250 W m^{-2} y no afectaron significativamente los flujos diarios de R_n . Sobre una cubierta vegetal de festuca (*Festuca arundinacea*) en condiciones de referencia, Ortega-Farias *et al.* (2004) indicaron que los errores encontrados en los días nublados están asociados a la estimación de la radiación atmosférica. Según Brotzge y Deuchon (2000) y Brotzge y Crawford (2003), las causas probables del mayor error en la estimación de la R_n en días nublados se encuentran asociadas al efecto de la emisividad del aire, la cual es determinada a partir de la presión de vapor de agua al nivel de referencia, y que causa dificultades en la estimación de la radiación atmosférica.

Para los días despejados, en ambas temporadas, se observa que los flujos de radiación neta se incrementaron gradualmente durante la mañana hasta llegar a un máximo valor alrededor de las 14:00 h, decreciendo y tornando a valores negativos cerca de las 20:00 h (**Figura 5**). En esta figura se observa que las variaciones diurnas de R_{ne1} y R_{ne2} fueron muy similares, y presentaron un buen nivel de ajuste con R_{no} , encontrándose la mayor diferencia entre las 1300 y 1400 h. En este caso, la ecuación (2) sobreestimó los valores de R_n entre las 12:00 y 16:00 h, encontrándose las mejores y peores comparaciones en los días 51 (**Figura 5c**) y 39 (**Figura 5b**), respectivamente. Para ambas temporadas, los máximos valores de MAE (38 W m^{-2}) y RMSE (39 W m^{-2}) fueron observados en el día 39, cuando el flujo diario de la energía disponible (R_{no}) fue equivalente a un 52% del flujo diario de la radiación solar (31 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) interceptada por el viñedo comercial.

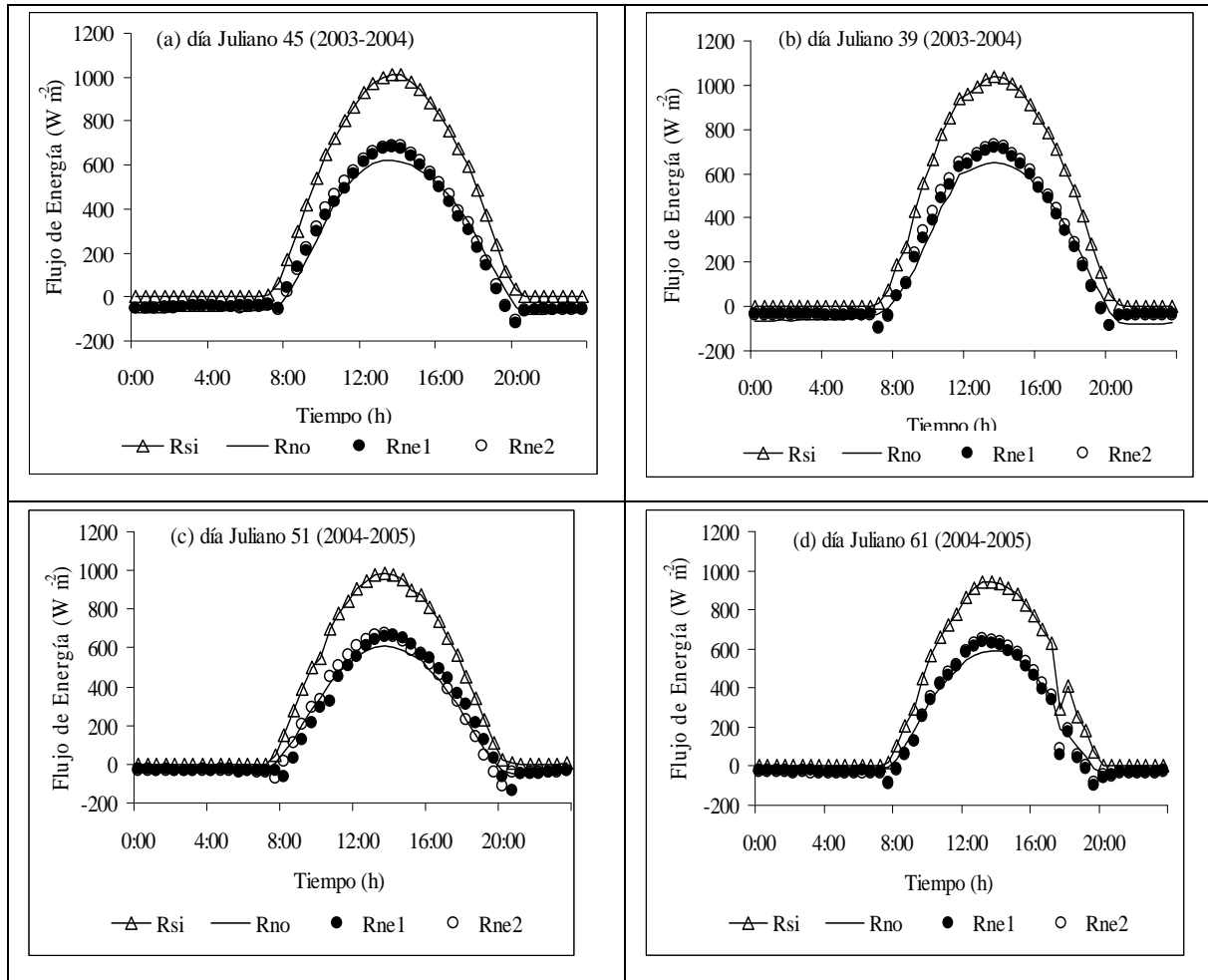


Figura 5. Variación diaria de los flujos de radiación neta observada (Rno) y estimada (Rne) asumiendo un gradiente de temperatura entre el dosel (T_f) y el aire (T_a) distinto (Rne1) e igual (Rne2) a cero, para días despejados durante las temporadas 2003-2004 y 2004-2005. La radiación solar incidente (Rsi) fue incluida como referencia.

Figure 5. Daily variation of observed (Rno) and estimated (Rne) net radiation assuming a temperature gradient between the canopy (T_f) and air (T_a) different (Rne1) to or equal (Rne2) to zero for clear days during 2003-2004 and 2004-2005 seasons. Solar radiation (Rsi) was included as a reference.

En relación a los días nublados (**Figura 6**), la variación diaria de Rno, Rne1 y Rne2 muestra que los flujos fueron afectados por la distribución e intensidad de la nubosidad, por lo que no presentaron un patrón definido, a diferencia de los días despejados. Durante las temporadas 2003-2004 y 2004-2005 se observó una buena comparación entre Rno vs. Rne1 y Rno vs. Rne2, con errores que no superaron el 9% ($b = 0,91$). Las mejores y peores comparaciones para el estudio fueron observadas en los días 46 (**Figura 6a**) y 43 (**Figura 6d**), respectivamente. En la **Figura 6d** se puede observar que alrededor de las 1530 y 1600 h, los modelos sobrestimaron y subestimaron la Rno en casi 113 y 221 $W m^{-2}$, respectivamente. En este día, los valores de MAE y RMSE fueron iguales a 54 y 88 $W m^{-2}$, respectivamente. En los días

nublados, los mayores errores fueron asociados a cambios bruscos de la radiación solar incidente en períodos de tiempo cortos. En estas condiciones, la estimación de la emisividad del aire puede inducir a errores en la cuantificación de la radiación atmosférica y por ende en el cálculo final de la Rno.

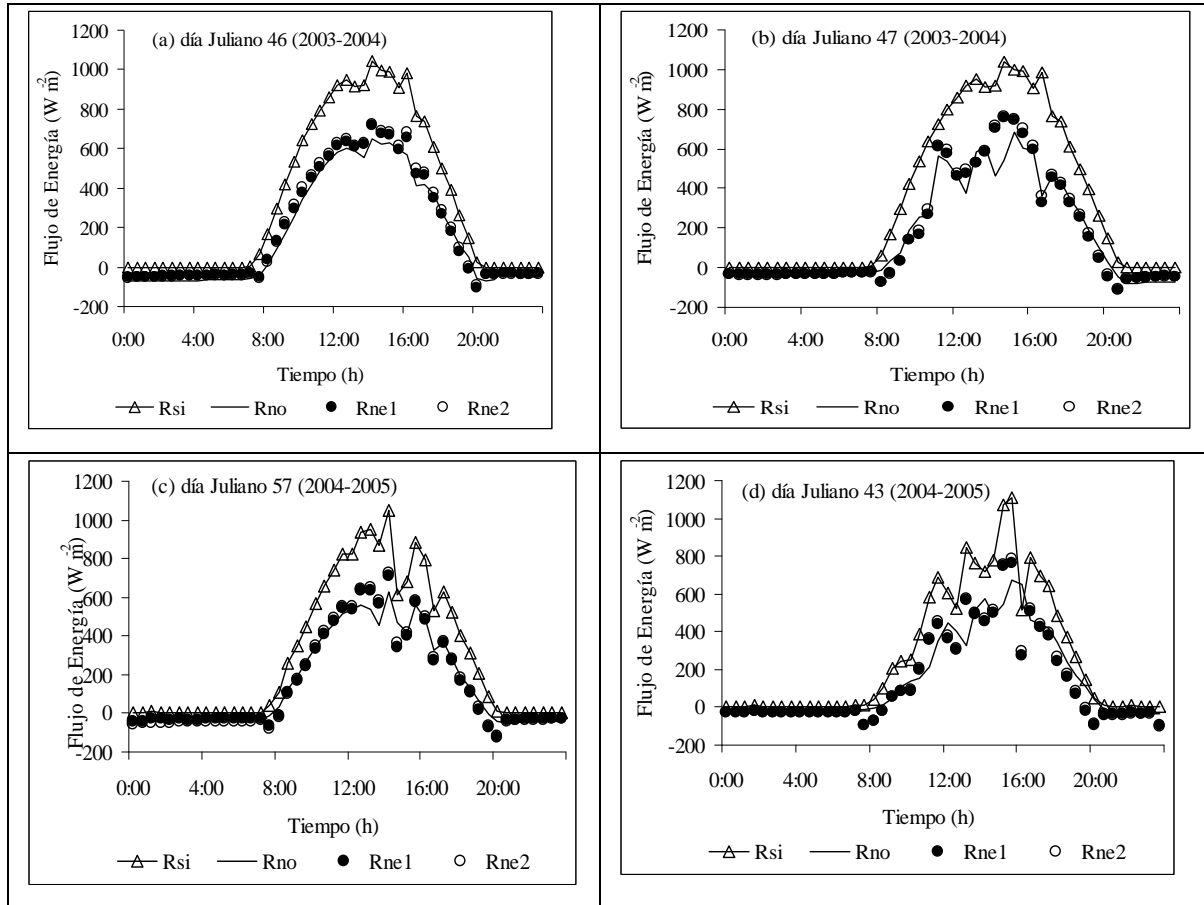


Figura 6. Variación diaria de los flujos de radiación neta observada (Rno) y estimada (Rne) asumiendo un gradiente de temperatura entre el dosel (T_f) y el aire (T_a) distinto (Rne1) e igual (Rne2) a cero, para días nublados durante las temporadas 2003-2004 y 2004-2005. La radiación solar incidente (Rsi) fue incluida como referencia.

Figure 6. Daily variation of observed (Rno) and estimated (Rne) net radiation assuming a temperature gradient between the canopy (T_f) and air (T_a) different (Rne1) to or equal (Rne2) to zero for cloudy days during 2003-2004 and 2004-2005 seasons. Solar radiation (Rsi) was included as a reference.

Los valores diarios de Rno vs. Rne1 y Rno vs. Rne2 presentaron una buena comparación, con valores máximos de MAE y RMSE equivalentes a 1,68 y 1,75 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, respectivamente (**Cuadro 4**). En ambos períodos de estudio, el test-Z indicó que el cociente b fue significativamente diferente de la unidad, indicando que Rne1 y Rne2 tendieron a sobreestimar el flujo diario de la Rno con errores que variaron

entre 2 y 11%. Existió una subestimación y sobrestimación de los flujos diarios de Rn para valores de los modelos (Rne1 y Rne2) inferiores a 8 MJ m⁻² d⁻¹ y superiores a 14 MJ m⁻² d⁻¹, respectivamente (**Figura 7**).

Cuadro 4. Análisis estadístico para el cálculo del flujo de radiación neta diaria asumiendo un gradiente de temperatura distinto (Ta ≠ Tf) e igual (Ta = Tf) a cero.

Table 4. Statistical analysis for daily values of net radiation assuming a temperature gradient between the canopy and air different to (Ta ≠ Tf) or equal to zero (Ta = Tf).

	MAE (MJ m ⁻² d ⁻¹)	RMSE (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Cuociente b	Test-Z
a) Ta ≠ Tf (modelo Rne1)				
Temporada 2003-2004	1,29	1,37	0,92	F
Temporada 2004-2005	0,78	1,05	0,98	F
Promedio	1,04	1,21	0,95	F
b) Ta = Tf (modelo Rne2)				
Temporada 2003-2004	1,68	1,75	0,89	F
Temporada 2004-2005	0,93	1,16	0,96	F
Promedio	1,31	1,50	0,93	F

MAE = error absoluto medio; RMSE = cuadrado del error medio; b = cuociente entre los flujos diarios de radiación neta observada (Rno) y estimada por los modelos (Rne1 y Rne2); V = hipótesis nula (b=1); F=hipótesis alternativa (b≠1); Ta = temperatura del aire (°C); Tf = temperatura del dosel (°C).

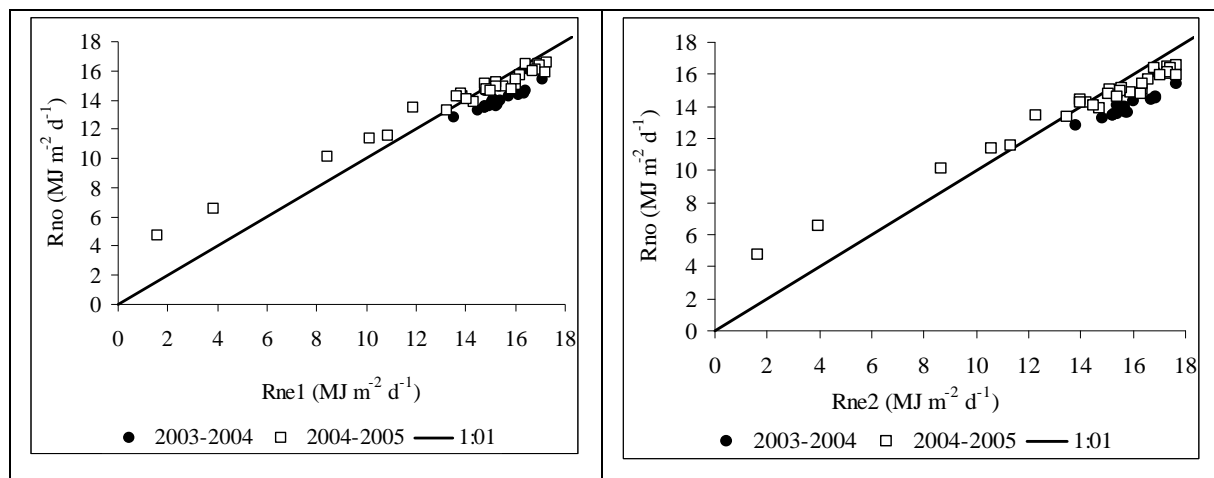


Figura 7. Comparación entre los flujos diarios de radiación neta observada (Rno) y estimada (Rne), asumiendo un gradiente de temperatura entre el dosel (Tf) y el aire (Ta) distinto (Rne1) e igual (Rne2) a cero.

Figure 7. Daily comparison between observed (Rno) and estimated (Rne) net radiation assuming a temperature gradient different to (Rne1) or equal (Rne2) to zero.

Es importante indicar que el modelo Rne2 fue capaz de estimar el flujo de radiación neta con un buen grado de precisión a pesar que se observo un gradiente de temperatura entre -3 y 4 °C (Figura 2). Similares resultados fueron encontrados por Ortega-Farías *et al.* (2004) en un cultivo de tomates, donde el modelo Rne2 presento un error de 3,2% en la estimación de Rno, a pesar que se observó un gradiente de temperatura que varió entre -5 y 5°C. Por tanto, la aplicación práctica del modelo Rne2 requiere mantener el viñedo en óptimas condiciones hídricas para minimizar el gradiente de temperatura entre el aire y dosel. En el viñedo, también es importante indicar que un alto porcentaje de Rno se transforma en flujo de calor sensible (H) (Ortega-Farías *et al.*, 2007), el cual potencialmente incrementa la temperatura del dosel. La producción de calor sensible depende de las características del dosel, sistema de riego, cobertura vegetal y estado hídrico del viñedo. Por tanto, un viñedos conducido en espaldera simple y regado por goteo puede presentar una mayor producción de calor sensible que aquel regado por surco o tendido. Lo anterior se debe a que en el sistema de riego por goteo se mantiene un bulbo de mojado permanente que representa menos del 3% del área total del viñedo y por ende el calentamiento del suelo incrementa el flujo de calor sensible. Por tanto, nuestras futuras investigaciones se van a centrar sobre el efecto de la geometría del dosel, sistema de conducción, sistema de riego y estado hídrico del viñedo sobre la parametrización de la radiación de onda corta y larga.

CONCLUSIONES

En este estudio se evaluaron dos modelos simples para estimar, en intervalos de tiempo de 30 min, el flujo de energía disponible (o radiación neta) sobre un viñedo conducido en espaldera simple y regado por goteo. El análisis estadístico indicó que los modelos Rne1 y Rne2 fueron capaces de estimar la Rn con errores menores al 9% ($b = 0,91$). El test-Z indicó que el cociente b fue menor a la unidad indicando que el modelo tendió, en términos globales, a sobrestimar el flujo de la radiación neta para intervalos de tiempo de 30 min y 24 h. Los mayores errores en la estimación fueron observados en las condiciones climáticas de día nublado, donde MAE varió entre 31 y 40 W m⁻² y RMSE varió entre 46 y 61 W m⁻². Por otro lado, el estudio indicó que la incorporación de la temperatura del dosel (follaje) no mejoró sustancialmente la estimación de Rn, a pesar de existir un gradiente de temperatura entre el aire y dosel que varió entre -3 y 4 °C. Estos resultados sugieren que el modelo propuesto (Rne2) puede ser utilizado para estimar el flujo de Rn usando como variables de entrada la radiación solar, temperatura del aire y humedad relativa.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el proyecto FONDECYT N°1030314 y Viña San Pedro. Los autores desean agradecer a los ex-alumnos de la Escuela de Agronomía de la Universidad de Talca, ingenieros agrónomos Srs. César Acevedo, Carlos Poblete y Francisco Jara, por su participación en la colección de datos y mantención de la parcela experimental.

RESUMEN

El flujo de radiación neta (R_{no}) es el principal componente del balance de energía que determinan los procesos de evaporación y transpiración. En este contexto, este estudio evaluó dos modelos para estimar R_{no} sobre un viñedo comercial (cv. Cabernet Sauvignon) ubicado en el Valle de Péncahue, Región del Maule ($35^{\circ}22'$ lat. Sur; $71^{\circ}47'$ long. Oeste; 75 m.s.n.m.). Para esto, se ubicó una estación meteorológica automática (EMA) en la parte central del viñedo para medir R_{no} , radiación solar (R_{si}), temperatura del aire (T_a), temperatura del dosel (T_f) y humedad relativa (HR). En intervalos de tiempo de 30 minutos, los resultados indicaron que los modelos R_{ne1} (asumiendo $T_a \neq T_f$) y R_{ne2} (asumiendo $T_a = T_f$) fueron capaces de estimar R_{no} con un error absoluto medio (MAE) menor a 40 W m^{-2} y un cuadrado del error medio (RMSE) menor a 61 W m^{-2} . En términos diarios, los modelos estimaron R_{no} con valores de MAE y RMSE inferiores a 1,68 y $1,75 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente. En términos globales, los modelos presentaron errores menores a 9 y 11% para intervalos de tiempo de 30 minutos y diarios, respectivamente. Además, este estudio indicó que la incorporación de la temperatura del dosel (follaje) no mejoró sustancialmente la estimación de R_{no} , a pesar de tener un gradiente de temperatura ($dT = T_f - T_a$) entre -3 y 4°C . Estos resultados sugieren que el modelo R_{ne2} podría ser utilizado para estimar R_{no} usando mediciones de R_{si} , T_a y HR,

Palabras clave: emisividad atmosférica, radiación terrestre, radiación atmosférica, balance de energía.

LITERATURA CITADA

Acevedo, C., S. Ortega-Farias, Y. Moreno, and F. Cordova. 2005. Effect of four levels of water application on grape composition and midday stem water potential of *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon. *Acta Hortic.* 664:491-497.

Allen, G., L. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. 300 p. Irrigation and Drainage Paper N° 56. FAO, Rome, Italy.

Anadranistakis, M., Liakatas, A., Kerkides, P., Rizos, S., Gavanosis, J., Poulouvassilis, A. 2000. Crop water requirement model tested for crops grown in Greece. *Agric. Water Manag* 42: 371-385.

Arya, S.P. 2001. Introduction to Micrometeorology. 420 p. Academic Press, San Diego, California, USA.

Brotzge, J., and K. Crawford. 2003. Examination of the surface energy budget: A comparison of eddy correlation and Bowen ratio measurements systems. *J. Hydrometeorol.* 4:160-178.

Brotzge, J., and C. Deuchon. 2000. A field comparison among a domeless net radiometer, two four-component net radiometers, and a domed net radiometer. *J. Atmos. Oceanic. Technol.* 17:1569-11582.

Campbell, G.S. 1995. Introduction a la Biofísica. 188 p. Ediciones Universitarias, Barcelona, España.

CIREN-CORFO. 1997. Estudio Agroecológico, VII Región. Tomo I. 322 p. CIREN N° 117, Santiago, Chile.

Daamen, C., and K. McNaughton. 2000. Modeling energy fluxes from sparse canopies and understories. *Agron. J.* 92:837-847.

Irmak, S., A. Irmak, J.W. Jones, A. Howell, J.M. Jacobs, R.G. Allen, and G. Hoogenboom. 2003. Predicting daily net radiation using minimum climatological data. *J. Irrig. Drain. Eng.* 129:256-269.

Iziomon, M.G., H. Mayer, and A. Matzarakis. 2000. Empirical model for estimating net radiative flux: a case study for three mid-latitude site with orographic variability. *Astrophys. Space Sci.* 273:313-330.

Kato, T., Kimura, R., Kamichika, M. 2004. Estimation of evapotranspiration, transpiration ratio and water-use efficiency from a sparse canopy using a compartment model. *Agric. Water Manag.*, 65: 173-191.

Monteith, J., and M. Unsworth. 1990. *Principles of environmental physics*. 291 p. Edwards Arnold, London, UK.

Ortega-Farías, S., R. Antonioletti, and A. Oliosio. 2000. Net radiation model evaluation at an hourly time step for Mediterranean conditions. *Agronomie* 20:157-164.

Ortega-Farías, S., R. Calderón, N. Martelli, y R. Antonioletti. 2004. Evaluación de un modelo para estimar la radiación neta sobre un cultivo de tomate industrial. *Agric. Téc. (Chile)* 64:41-49.

Ortega-Farias, S., Oliosio, A., Fuentes, S., and Valdes, H. 2006. Latent heat flux over a furrow-irrigated tomato crop using Penman-Monteith equation with a variable surface canopy resistance. *Agric. Water Mang.* 82: 421-432.

Ortega-Farías, S., M. Carrasco, A. Oliosio, and C. Poblete. 2007. Latent heat flux over Cabernet Sauvignon vineyard using the Shuttleworth and Wallace model. *Irrig. Sci.* 25:161-170.

Pieri, P. and Gaudillère, J.P. 2003. Sensitivity to training system parameters and soil surface albedo of radiation intercepted by vine rows. *Vitis* 42: 77-82.

Sene, K.J. 1994. Parametrizations for energy transfers from a sparse vine crop. *Agric. For. Meteorol.* 71:1-18.