



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Tesis de Maestría

**MODELACIÓN DE COEFICIENTES DE CULTIVO BASADO EN
LAS DETERMINACIONES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POR
EL MÉTODO SURFACE RENEWAL EN UN VIÑEDO
COMERCIAL DE *VITIS VINIFERA* CV CABERNET
SAUVIGNON**

**Maestría en Viticultura y Enología
Tesisista: Ana María Betancur Ochoa**

**Director Mg. Leandro Damián Martín
Codirector: M.Sc. Sebastián Vargas Soto**

Mendoza 2024

RESUMEN

Los productores vitivinícolas requieren cuantificar el uso de agua de la vid en producción y demandan una herramienta precisa y adecuada para realizar la programación del riego. El objetivo de este estudio fue establecer un modelo de estimación de los coeficientes de cultivo (K_c) en función de una variable de monitoreo del crecimiento en plantas de *Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon en el Valle de Pencahue, VII región del Maule, Chile. En un viñedo comercial se instaló la estación agroclimática de configuración Surface Renewall “full” para obtener las estimaciones diarias de evapotranspiración del cultivo (ETc). Las escalas temporales utilizadas para monitorear el crecimiento fueron grados día acumulados (GDA), días después de floración (DDF) y escala fenológica de Eichhorn y Lorenz modificada (ELP). El modelo de mayor ajuste obtenido con Surface Renewal fue la escala DDF con intervalos de cálculo de K_c cada 7 días ($R^2=71\%$; [$K_c= (0,00421138 * DDF) - (0,000032 *(DDF)^2)+ 0,790605$] y con el método Eddy covariance fue la escala GDA con intervalos de cálculo de K_c cada 8 días ($R^2=81\%$); [$K_c= (0,00137407 * GDA) - (0,000000579 * (GDA)^2)+ 0,171381$]. El modelo permitirá a los productores vitivinícolas obtener el valor del coeficiente K_c en función del crecimiento según las condiciones climáticas de cada temporada y mejorar las determinaciones de las necesidades de agua del cultivar Cabernet Sauvignon

ABSTRACT

Wine producers need to quantify the water use of the vine in production and demand a precise and appropriate tool to carry out irrigation programming. The objective of this study was to establish a model for estimating crop coefficients (K_c) based on a growth monitoring variable in *Vitis vinifera* cv plants. Cabernet Sauvignon in the Pencahue Valley, VII Maule region, Chile. In a commercial vineyard, the Surface Renewwall “full” configuration agroclimatic station was installed to obtain daily estimates of crop evapotranspiration (ETc). The temporal scales used to monitor growth were cumulative degree days (GDA), days after flowering (DDF) and modified Eichhorn and Lorenz phenological scale (ELP). The model with the best fit obtained with Surface Renewal was the DDF scale with K_c calculation intervals every 7 days ($R^2=71\%$; [$K_c= (0.00421138 * DDF) - (0.000032 *(DDF)^2)+ 0.790605$] and with the Eddy covariance method it was the GDA scale with K_c calculation intervals every 8 days ($R^2=81\%$); [$K_c= (0.00137407 * GDA) - (0.000000579 * (GDA)^2)+ 0.171381$]. The model will allow wine producers to obtain the value of the K_c coefficient based on growth according to the climatic conditions of each season and improve the determinations of the water needs of the Cabernet Sauvignon cultivar.

CONTENIDO

1	INTRODUCCION	8
1.1	Requerimientos de agua de los cultivos	8
1.2	Producción vitivinícola en Chile	9
1.3	Coeficiente de cultivo : Kc	10
1.4	Métodos micro meteorológicos de estimación de evapotranspiración del cultivo	11
1.4.1	Surface Renewal	12
1.4.2	Eddy Covariance	16
1.5	Variabilidad interanual del coeficiente de cultivo	19
2	HIPÓTESIS DE TRABAJO	23
3	OBJETIVOS	23
3.1	Objetivo General	23
3.2	Objetivos Específicos.....	23
4	MATERIALES Y MÉTODOS	24
4.1	Área de estudio y cultivo	24
4.2	Evapotranspiración del cultivo (ETc).....	25
4.3	Riego	28
4.4	Evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo).....	28
4.5	Estado hídrico de las plantas	28
4.6	Contenido de humedad del suelo.....	29
4.7	Escalas de monitoreo de crecimiento y desarrollo de la vid.....	30
4.8	Modelamiento de curvas de coeficientes de cultivo	32
4.9	Validación.....	33
4.10	Diseño experimental.....	34
4.11	Análisis estadísticos	34
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
5.1	Determinación de la evapotranspiración del cultivo con Surface Renewal y Eddy Covariance	35
5.2	Efectos de la programación de riego en base a determinaciones de Surface Renewal sobre el estado hídrico de Cabernet Sauvignon.....	37

5.3	Modelo de estimación de coeficiente de cultivo (Kc) en función de 3 escalas temporales de monitoreo del crecimiento y desarrollo de <i>Vitis vinifera</i> cv Cabernet Sauvignon.....	41
5.4	Validación de modelos de estimación de Kc (2019-2020).....	45
6	CONCLUSIONES	50
7	PERPECTIVAS FUTURAS.....	50
8	BIBLIOGRAFIA.....	51
9	ANEXOS.....	57

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Curva generalizada del coeficiente del cultivo, correspondiente al procedimiento del coeficiente único del cultivo (Allen et al., 2006)	9
Figura 2: Mapa porcentual de acumulación de agua de los embalses de Chile en octubre 2021. Dirección general de aguas (DGA,2021)	10
Figura 3 Desarrollo de rampas bajo condiciones inestables realizado por las parcelas de aire	13
Figura 4: Mecanismo de transporte de los remolinos atmosféricos	16
Figura 5: Esquema de los movimientos de aire debido a los Eddys, adaptado de Burba (2013).....	17
Figura 6: Viñedo comercial de <i>Vitis vinífera</i> cv Cabernet sauvignon correspondiente a 4,47 ha ubicado en Rauquen, comuna de Péncahue, Región del Maule, Chile. Propiedad de Viña Concha y Toro, fundo Lourdes.....	25
Figura 7: a) Estación agroclimática de configuración Surface Renewall “full”, b) radiómetro Neto , c) sensor de la temperatura y humedad relativa del aire, d) Termocupla (0.076 mm de diámetro), e) anemómetro sónico, f) datalogger (CR1000, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA).....	26
Figura 8 a) Arriba : Diferentes instrumentos de medición : derecha a izquierda: Sonda de humedad del suelo – Porómetro portátil :Conductancia estomática – Estación climática : Evapotranspiración de referencia -Cámara de presión (Scholander et al., 1965) : Potencial Hídrico. Abajo: Medición en campo de potencial hídrico.....	30
Figura 9: Diseño experimental en bloques completamente aleatorizados en viñedo comercial de <i>Vitis vinífera</i> cv Cabernet Sauvignon, Región del Maule, Chile.	34
Figura 10: Relación entre las estimaciones diarias de evapotranspiración del cultivo (ET) a través de Surface Renewall (SR) y Eddy Covariance (EC) en las temporadas 2018/2019 y 2019/2020.	36
Figura 11: Evapotranspiración del cultivo con el método Surface Renewal (ET SR) y láminas de riego aplicadas por semana considerando los días después de floración (DDF) en <i>Vitis vinífera</i> cv Cabernet Sauvignon.....	38
Figura 12: Evolución del potencial de xilema (Ψ_x) en vides de cv. Cabernet Sauvignon, déficit de presión de vapor (DPV) y humedad del suelo medido el día anterior al evento de riego durante las temporadas 2018/2019-2019/2020. Las líneas discontinuas marcan de izq. a der.: Chapoda 2 y Pinta.....	40
Figura 13: Evolución de la conductancia estomática (gs) de hojas de vides (cv. Cabernet Sauvignon), déficit de presión de vapor (DPV) y humedad del suelo registrado el día anterior al evento de riego durante las temporadas 2018/2019. 2019/2020. Las líneas discontinuas marcan de izq. a der.: Chapoda 2 y Pinta.	40
Figura 14: Coeficiente de cultivo (K_c) de longitudes de intervalos de 7 y 8 días, en función de días después de floración (DDF) y de Grados Días Acumulados (GDA) según el método de estimación de evapotranspiración del cultivo (ET SR (Surface Renewal) y ET EC (Eddy Covariance). con regresión polinomial orden 2. Las líneas	

discontinuas marcan de izq. a der. Chapoda 1 –Chapoda 2 -Pinta - Cosecha ensayo-
Cosecha comercial43

Figura 15 Coeficiente de cultivo (K_c) en función de longitudes de intervalos (días) y
Escala Eichhorn and Lorenz (ELP) según el método de estimación de ET (Surface
Renewal-SR y Eddy Covariance-EC) con regresión polinomial orden 3. Las líneas
discontinuas marcan de izq. a der. Chapoda 1 -Chapoda2-Pinta -Cosecha ensayo-
Cosecha comercial45

Figura 16 Valores de K_c predichos con modelos y estimados en cada escala de
crecimiento y desarrollo (DDF, GDA, ELP) mediante los métodos de estimación de
ET Surface Renewal (SR) y Eddy Covariance (EC) considerando: a) intervalos de 7
días, b) 8 días y c) optimización Solver. Periodo 2019-2020.....47

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coeficientes de cultivo (K_c) en distintas condiciones climáticas y agronómicas en vides de Cabernet Sauvignon.....	11
Tabla 2 Escala fenológica para vid de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe (1995).....	20
Tabla 3: Ecuaciones del método del seno simple para el cálculo de valores diarios de Grados días Acumulados.....	31
Tabla 4 Parámetros estadísticos del modelo de regresión polinomial con	41
Tabla 5: Parámetros estadísticos del modelo de regresión polinomial con orden 2 entre las diferentes longitudes de intervalos (días) en función de los Grados Días acumulados (GDA) y el método de estimación de evapotranspiración del cultivo (ET-SR (Surface Renewal) y ET- EC (Eddy Covariance).....	42
Tabla 6 Parámetros estadísticos del modelo de regresión polinomial con regresión orden 3 entre las diferentes longitudes de intervalos (días) en función de la Escala Eichhorn and Lorenz (ELP) con el método de estimación de evapotranspiración del cultivo (ET SR (Surface Renewal) y ET EC (Eddy Covariance).	44
Tabla 7 : Media del error absoluto (MAE), error cuadrático medio (RMSE), índice de concordancia (d_r) y coeficiente de determinación (R^2) de los modelos de predicción de K_c considerando las escalas de monitoreo del crecimiento (días después de floración (DDF), grados días acumulados (GDA) y escala Eichhorn y Lorenz (ELP)), los intervalos de duración y Solver en vides cv Cabernet Sauvignon durante la temporada 2019-2020.....	46

1 INTRODUCCION

1.1 Requerimientos de agua de los cultivos

El agua es un recurso natural escaso y la agricultura representa el mayor consumo de agua a escala mundial (Amendola, 2018), por lo que los productores deben explorar en cómo realizar la programación más adecuada del riego y realizar un aprovechamiento más eficiente del recurso.

Entre los reportes que proporcionaron orientación para determinar las necesidades de agua del cultivo se encuentra el descrito en la Serie de Riego y Drenaje de la FAO N° 24 (Allen et al., 2006) con un enfoque que consideraba 3 pasos:

- a) El efecto de la demanda climática para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) con el método FAO Penman - Monteith,
- b) El efecto de las características de los cultivos dado por el coeficiente de cultivo (K_c), el cual expresa las diferencias físicas (cambios en la vegetación y grado de cobertura en el suelo) y fisiológicas que posee el cultivo de interés con relación al pasto como cultivo de referencia (Allen et al., 2006). De la relación que existe entre los conceptos de ET_0 y ET_c , se desprende el “coeficiente de cultivo” K_c .
- c) La consideración del efecto de las condiciones locales imperantes al momento de realizar el cálculo de evapotranspiración del cultivo $ET_c = K_c * ET_0$. (Doorenbos y Pruitt, 1977; Allen et al., 2006).

Posteriormente, FAO N° 24 actualizó los lineamientos de la estimación de la ET_c y publicó los valores de coeficientes único de cultivos tabulados para distintos cultivos considerado las siguiente etapas: K_c inicio, K_c medio y K_c final (Allen et al., 2006), (Figura 1).

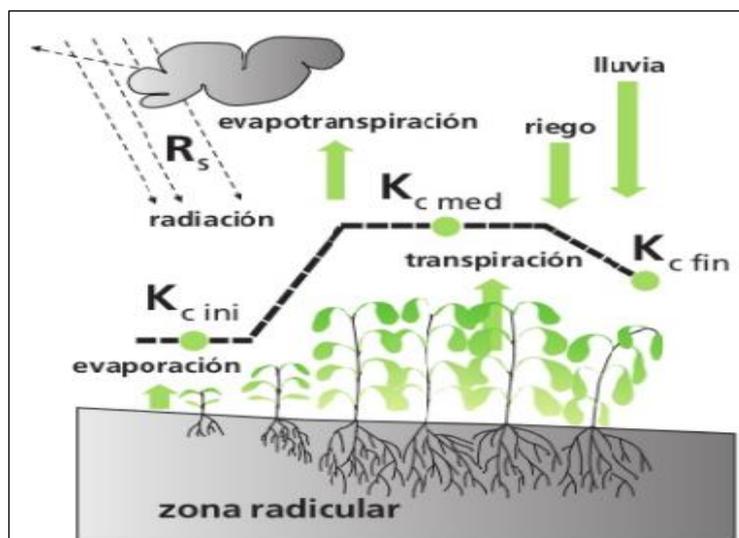


Figura 1. Curva generalizada del coeficiente del cultivo, correspondiente al procedimiento del coeficiente único del cultivo (Allen et al., 2006).

Hasta la actualidad, el método FAO Penman-Monteith es de mayor adopción, y los procesos de determinación de K_c para los distintos cultivos continúan innovándose con la finalidad de obtener cálculos de E_{Tc} con mayor precisión (Lazzara & Rana 2010).

Ante un escenario de cambio climático, y en relación con el cultivo de viñedos asociados a zonas áridas y/o semiáridas, en donde la disponibilidad de agua toma mayor preponderancia, los estudios sobre gestión hídrica juegan un papel crucial. Regiones vitícolas importantes como Chile, México y Argentina, continuamente se plantean escenarios climáticos, para evaluar de qué manera se afectarán los procesos fisiológicos de las plantas de uva, y qué estrategias deberían estar disponibles para afrontarlas. (Farreras et al., 2022)

1.2 Producción vitivinícola en Chile

Actualmente, en la viticultura chilena existe una menor disponibilidad de agua para riego asociada a los efectos del cambio climático (Poblete Echeverría et al., 2017).. La mayoría de los embalses presentan un déficit de volumen con respecto a sus promedios, de alrededor de un 16%, siendo los más significativos, los embalses mixtos de generación y riego, con un 38,7% (DGA,2021) (Figura 2).

Por lo tanto, existe un mayor interés por parte de los técnicos y productores del medio por determinar con mayor exactitud las necesidades de agua bajo este período de crisis hídrica (Poblete Echeverría et al., 2017).

las hileras. Además, existe variabilidad de valores de Kc en distintas condiciones climáticas y agronómicas (Tabla 1).

Tabla 1: Coeficientes de cultivo (Kc) en distintas condiciones climáticas y agronómicas en vides de Cabernet Sauvignon

Ubicación	Clima	Kc inicial	Kc medio	Kc final	Orientación	Marco de plantación
Israel ⁽¹⁾	Semiárido	0,15-0,25	0,6-0,8	0,35-0,55	E - O	3 m x 1,5 m
Washington (Estados Unidos) ⁽²⁾	Mediterráneo	0,3	0,8	0,4	N-S	3 m x 2,1 m
Isla de Maipo (Chile) ⁽³⁾	Mediterráneo	0,15	0,55	0,2	NO - SE	2,5 m x 1,3 m
Maule (Chile) ⁽⁴⁾	Mediterráneo	0.45-0.65	0.8-0.85	0.45		

Fuente: ⁽¹⁾ Muniz et al.,2019; ⁽²⁾ Casassa et al.,2015, ⁽³⁾ Acevedo-Opazo et al. (2010) ⁽⁴⁾ Pszczółkowski y Gil (2015)

El uso de valores de Kc obtenidos en otras condiciones climáticas y de cultivo diferentes a las locales podría causar por ejemplo una sobre estimación de la ETc y por ende mayor crecimiento vegetativo y menor rentabilidad (Myburgh, 1998). Estudios realizados en diferentes variedades como Merlot (Poblete Echeverria et al., 2017), Syrah (Vita Serman y Pringles2011) y Tempranillo recomiendan cuantificar el uso del agua del viñedo (ETc) con tecnologías tales como métodos micrometeorológicos o a través de lisímetros de pesada (López-Urrea et al., 2012). A partir de la medición de ETc, se pueden determinar los Kc con mayor precisión (= ETc / ET0) y evitar aplicar láminas de riego deficitarias o en excesos que perjudiquen el desempeño de los cultivos.

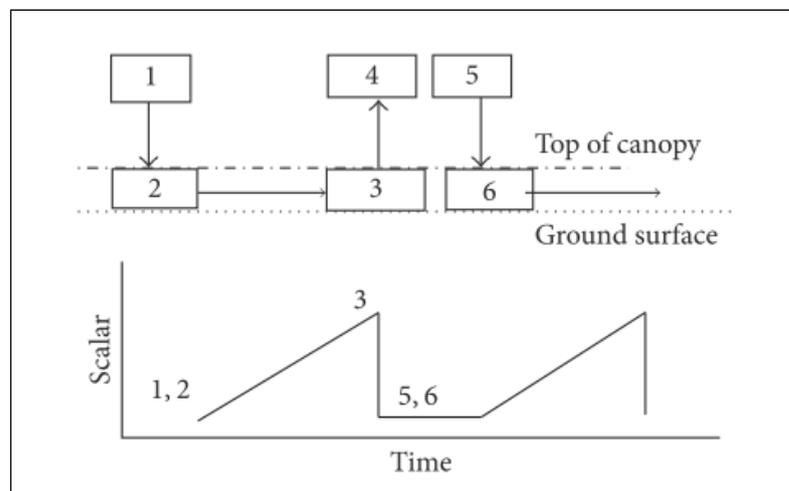
1.4 Métodos micro meteorológicos de estimación de evapotranspiración del cultivo

La evapotranspiración del cultivo (ETc) puede ser derivada de la ecuación del balance de energía ($\lambda ET = R_n - G - H$), ya que el flujo de calor latente (λET) representa la fracción de la evapotranspiración, RN: radiación neta, G: flujo de calor del suelo y H: calor sensible (Allen et al., 2006). La radiación neta (Rn) y el flujo de calor del suelo (G) pueden ser medidos o estimados en función de parámetros climáticos. Por el contrario, la medición del calor sensible (H) requiere de la aplicación de técnicas micro meteorológicas más elaboradas para su determinación (Suvočarev et al., 2019).

1.4.1 Surface Renewal

Surface renewal (SR) es una técnica micro meteorológica que utiliza mediciones de alta frecuencia (10Hz) de la temperatura del aire por encima de la superficie de un cultivo, usando una termocupla de hilo muy fina, para estimar el flujo de calor sensible (H). Esta técnica se basa en la teoría en que el intercambio entre la planta y la atmosfera se manifiesta en forma de rampas, es decir, una parcela de aire se desplaza rápidamente hacia la canopia mientras tiene sus estomas abiertos, permanece unida a ella durante un periodo de tiempo (Figura 3, puntos 3 y 4), tras el cual se enfría debido al intercambio de calor sensible entre el aire y los elementos de la cubierta de la planta, y por último una nueva parcela ingresa formando una nueva rampa (Figura 3, puntos 5 y 6), (Shapland et al., 2013).

El comportamiento de la temperatura cambia según la condición que presente la atmosfera, es decir que es inestable cuando la superficie posee mayor temperatura que la atmósfera, y por ende la entrega de energía es de la superficie hacia la atmósfera, y el calor sensible (H) toma valores mayores a cero (Figura 3, punto a). Una condición estable seria cuando es de noche, ocurre que la temperatura de la superficie es menor a la atmósfera, y la entrega de energía es de la atmósfera hacia la superficie (Figura 3, punto b).



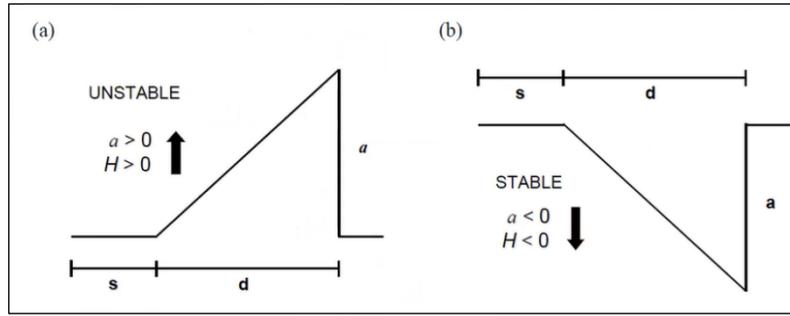


Figura 3 Desarrollo de rampas bajo condiciones inestables realizado por las parcelas de aire

La estimación del calor sensible es través de cálculos de estructura de rampa desarrollados por Van Atta (1977) y aplicados al análisis de Renovación de Superficies (Paw et al., 2005 ; Spano et al., 2005). El primer paso es calcular el tiempo de desfase de la función de estructura para los cálculos de la rampa (Shapland et al., 2013). El tiempo de desfase corresponde a los segundos en los cuales se espera que se realicen las tomas de mediciones de temperatura según la frecuencia (Hz) seleccionada. Para viñedos se reportan tiempos de desfase de 0,25 s y 5 s (Shapland et al., 2013).

El tiempo de retraso o desfase (r) es obtenido de la ecuación 1:

$$r = \frac{j}{f}$$

- r = retardo de la función estructural (s)
- j = número de muestras retrasadas (sin unidades)
- f = frecuencia de muestreo (Hz)

Con el tiempo de retardo o desfase temporal, se puede calcular la función de estructura para los órdenes 2^o, 3^o y 5^o a partir de los datos de las series temporales de temperatura y el cálculo de la función de estructura es la siguiente ecuación 2 (Shapland et al., 2013):

(2)

$$\overline{S^n(r)} = \frac{1}{m-j} \sum_{k=1}^{m-j} [(T_k - T_{k-j})^n],$$

- S_n = función estructural de enésimo orden ($^{\circ}\text{C}$)ⁿ

- r = desfase de la función de estructura, definido en la ecuación 1
- m = número total de puntos de la serie temporal
- j = número de muestras incluidas en el desfase temporal
- $T_k = k^o$ elemento de los datos temporales de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
- n = orden que se evalúa

Utilizando la función de estructura y el desfase temporal, se puede realizar un cálculo de la amplitud de la rampa superficial utilizando las siguientes ecuaciones (Shapland et al., 2013):

(3)

$$\begin{aligned}
 p &= [10 * S^2(r) - \frac{S^5(r)}{S^3(r)}] \\
 q &= 10S^3(r) \\
 0 &= a^3 + pa + q
 \end{aligned}$$

- a = amplitud de la rampa ($^{\circ}\text{C}$)
- p = variable intermedia utilizada para el cálculo de la rampa ($^{\circ}\text{C}$)²
- q = variable intermedia utilizada para el cálculo de la rampa ($^{\circ}\text{C}$)³

Además, el periodo de rampa puede calcularse mediante la ecuación 4, que se muestra a continuación (Shapland et al., 2013):

(4)

$$\tau = d + s = - \frac{a^3 r}{S^3(r)}$$

- τ = período de rampa (s)
- d = duración del calentamiento de la parcela de aire (s)
- s = período de reposo que sigue al barrido (s)
- a = amplitud de la rampa ($^{\circ}\text{C}$)
- r = desfase de la función estructural (s)
- $S_3(r)$ = función estructural de tercer orden ($(^{\circ}\text{C})^3$)

Considerando lo anterior, se calcula un flujo de calor sensible no calibrado mediante la ecuación 5 (Shapland et al., 2013): (5)

$$H'_{SR} = z\rho c_p \frac{a}{\tau}$$

Sin embargo, se ha demostrado que es importante incluir un coeficiente de calibración para estimar el verdadero calor sensible, ya que corrige la mezcla desigual dentro de la parcela de aire (Castellví y Snyder, 2010). Por lo tanto, el verdadero calor sensible puede calcularse mediante la ecuación 6, que se muestra a continuación (Hu et al., 2018).

El factor alfa (α) es obtenido a partir de la pendiente de la regresión de H de las mediciones de Eddy Covariance, frente a las mediciones de H no calibradas de SR. El factor de calibración α es idealmente 0,5, pero en la literatura sobre renovación de superficies se ha informado de una amplia gama de valores (Shapland et al., 2013):

(6)

$$H_{SR} = \alpha z\rho c_p \frac{a}{\tau}$$

- H_s = flujo de calor sensible calibrado (W/m^2)
- α = coeficiente de calibración
- z = altura de medición del termocupla (m)
- ρ = densidad del aire ($1,225 \text{ kg}/m^3$)
- c_p = calor específico del aire a presión constante ($1004,67 \text{ J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
- a = amplitud de la rampa ($^\circ\text{C}$)
- τ = período de la rampa (s)

Una vez cuantificados la radiación neta, el flujo de calor sensible y el flujo de calor del suelo, se puede estimar la tasa de ET. Suponiendo el cierre del equilibrio energético con el uso de la ecuación 6, la cantidad residual de energía sobrante puede atribuirse al flujo de calor latente. Este flujo de calor latente se divide entonces por una constante de calor latente de vaporización para calcular la masa de agua perdida por evapotranspiración:

(7)

$$E = \frac{R_n - G - H}{L}$$

- R_n = Radiación neta de onda corta y onda larga (W/m^2)
- G = Flujo de calor del suelo (W/m^2)
- H = Flujo de calor sensible (W/m^2)
- L = Calor latente de vaporización (kJ/kg)
- E = Velocidad de transporte de masa a la que se evapora y transpira el agua (kg/m^2s)

1.4.2 Eddy Covariance

Eddy Covariance (EC) es otro método de balance energético útil para medir el flujo de calor sensible, el flujo de calor latente y la ETc. Este método es considerado como superior al método SR, ya que los instrumentos que usa están en la subcapa inercial para medir el flujo de las corrientes de aire turbulentas conocidas como remolinos (Burba, 2013) (Figura 4). Estos remolinos se pueden ver cuando se mira a través de la superficie de la tierra como una inusual turbulencia de aire a medida que suben y bajan verticalmente de la superficie de la tierra. Las mediciones se realizan con un anemómetro sónico 3D para medir la temperatura del aire y los movimientos tridimensionales de los remolinos a medida que se elevan desde la superficie.

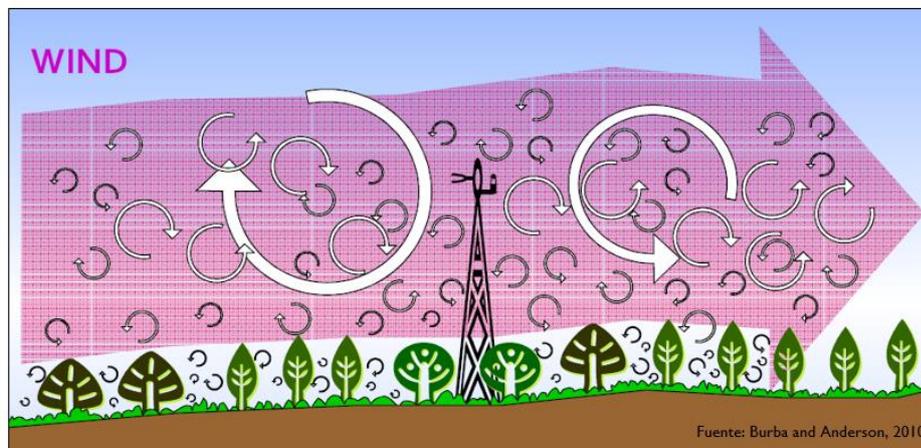


Figura 4: Mecanismo de transporte de los remolinos atmosféricos

Según Burba (2013), el principio físico se explica de acuerdo con la siguiente conceptualización; para un momento “tiempo 1”, existe un flujo turbulento “eddy 1”, el cual moviliza a una parcela o porción de aire “c1” hacia abajo, a una velocidad “w1”. En el momento siguiente “tiempo 2”, en el mismo punto, se presenta un segundo flujo llamado “eddy 2” que mueve otra porción de aire “c2”, hacia arriba a una velocidad “w2”. Aquí cada porción de aire posee su propia concentración de gas, humedad, temperatura y demás características que le son únicas (Figura 5).

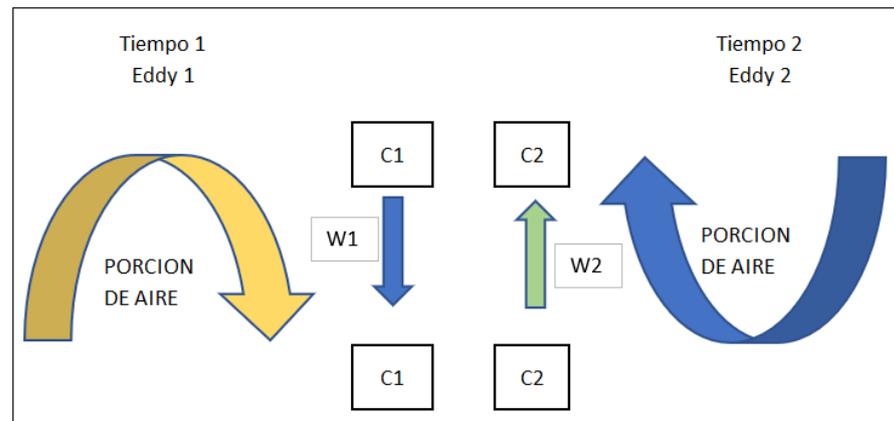


Figura 5: Esquema de los movimientos de aire debido a los Eddys, adaptado de Burba (2013).

Para la determinación de los flujos de torbellino, Burba (2013) plantea una serie de cálculos matemáticos que se exponen a continuación. En principio, al considerar un flujo turbulento, se deben tener en cuenta a la densidad del aire, la velocidad vertical del viento y la tasa o relación de mezclas del gas de interés.

$$F = \overline{\rho_a W S} \quad (8)$$

En la ecuación anterior; F es el flujo vertical, ρ_a es la densidad del aire, W es la velocidad del viento vertical y S es la relación de mezcla de una sustancia “x” (densidad de sustancia “x”/densidad del aire). Al descomponer la ecuación en sus medias y desviaciones, a través de la descomposición de Reynolds, multiplicar sus factores, hay que considerar que la media de las fluctuaciones es cero; y finalmente asumir que tanto la media de la velocidad vertical como las fluctuaciones de la densidad del aire son mínimas, se tiene que:

$$(9)$$

$$F = \overline{\rho_a w' s'}$$

Por lo tanto, el flujo vertical de un gas determinado es igual a la multiplicación de la densidad media del aire ρ_a , y la covarianza de la velocidad vertical del viento W , y el cociente de mezcla S .

Para el cálculo del flujo del calor latente, se tiene en cuenta la covarianza entre la velocidad del aire, la humedad específica del aire y la densidad promedio del aire; a través de la siguiente expresión (Burba, 2013):

$$LE = \lambda \frac{M_w/M_a}{P} \overline{\rho_a w' e'} \quad (10)$$

- λ : calor latente de vaporización, (W/m²)
- w' = desviación instantánea de la velocidad vertical media del viento (m/s)
- ρ_a = densidad del aire (g/m³)
- P : presión atmosférica (KPa)

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo del flujo de calor sensible del método EC implican una corrección de rotación bidimensional y una corrección de inclinación. La ecuación final utilizada para calcular el flujo de calor sensible utilizando la covarianza de Eddy se encuentra a continuación, en la ecuación 8 (Shapland et al., 2013):

(8)

$$H_{EC} = \rho_{air} c_p (w' T'_s)$$

- HE = flujo de calor sensible calculado por la covarianza de Foucault
- ρ_a = densidad del aire (g/m³)
- c_p = calor específico por unidad de masa de aire a presión constante (J/g*K)
- w' = desviación instantánea de la velocidad vertical media del viento (m/s)
- T'_s = desviación instantánea de la temperatura media del aire medida por el anemómetro sónico (°C)

Los modelos de estimación de la evapotranspiración a través de EC han sido validados sobre distintos tipos de coberturas vegetales. Sin embargo, Balbontín-Nesvara et al. (2011) plantearon que existen factores que pueden alterar el desempeño del sistema. Se mencionan situaciones como las condiciones de estabilidad atmosférica, advección de energía y la ubicación de los instrumentos de medición meteorológica como determinantes. Por otro lado, también plantean que la correcta medición de la radiación neta y el flujo del calor del suelo, influirán en el correcto cálculo de la energía disponible para flujos turbulentos.

La técnica EC es aplicada normalmente sólo con fines de investigación debido a su alto costo y complejidad en la operación (McElrone et al., 2013; Stein et al., 2018). El método de SR es más accesible económicamente y puede ser considerado confiable para obtener los valores diarios de K_c (Rosa y Tanny, 2015). Diversos experimentos realizados en viñedos con el fin de probar la confiabilidad de SR muestran una gran concordancia ($R^2=0,80$) entre las estimaciones de ET_c de SR vs EC (Hu et al., 2018).

1.5 Variabilidad interanual del coeficiente de cultivo

La intención de aplicar métodos micro meteorológicos de estimación de la ET_c es proporcionar a los productores valores de K_c . Sin embargo, diversos autores mencionan que hay una variabilidad interanual muy importante de los valores de K_c debido a las diferentes condiciones climáticas a lo largo de los años y a las tasas de crecimiento de los cultivos (Lazzara y Rana, 2010). Por lo anterior, en la práctica se aconseja construir una curva de K_c en función de las variables de monitoreo del crecimiento y desarrollo, y una vez obtenida la ecuación poder calcular los valores de K_c en función de la variabilidad interanual (Bautista et al., 2013). Por ejemplo, diversos estudios han desarrollado curvas de K_c en función de variables relacionadas al seguimiento del crecimiento como son el porcentaje de área sombreada (Williams & Ayars., 2005), los grados día acumulados (GDA; Ko et al., 2009), el índice de área foliar (LAI; Medeiros et al., 2016), los días posteriores a la siembra o plantación (Reddy, 2015) o incluso los índices de vegetación (NDVI) derivados de la teledetección (Campos et al., 2010).

El valor de K_c cambia durante la temporada a medida que las plantas crecen, por ello, el uso de estas variables de crecimiento tiene como objetivo principal describir la ocurrencia de las distintas etapas de desarrollo del cultivo y lograr que la estimación de K_c resulte más precisa (Allen et al., 2006). Una forma detallada para describir la ocurrencia de las etapas fenológicas en uva es la escala fenológica (ELP)

de Eichhorn y Lorenz (1977) modificada por Coombe (1995). Esta escala considera 22 etapas fenológicas, desde "brote de invierno" hasta "final de caída de la hoja", utilizando 47 números para identificar claramente cada etapa de desarrollo (Tabla 2). ELP constituye una herramienta para la determinación de la fecha de ocurrencia de cada uno de los estados fenológico , y desde esa posibilidad, permite ser una fuente de información para mejorar la planificación de las prácticas culturales, el riego y operaciones de cosecha (Ortega-Farias y Rivero, 2019)

Tabla 2. Escala fenológica para vid de Eichhorn y Lorenz modificada por Coombe (1995)

Número	Estado Fenológico
1	Yema invernal
2	Yema hinchada
3	Yema algodonosa-lanosidad parda visible
4	Punta verde, primer tejido foliar visible
5	Roseta de puntas de hojas visible
7	Primera hoja separada de la punta del brote
9	2 a 3 hojas separadas; brotes de 2-4 cm de largo
11	4 hojas separadas
12	5 hojas separadas; brotes de 10 cm de largo; inflorescencia clara
13	6 hojas separadas
14	7 hojas separadas
15	8 hojas separadas, rápido crecimiento de brotes; flores en grupos compactos
16	10 hojas separadas
17	12 hojas separadas; inflorescencia desarrollada; flores separadas
18	14 hojas separadas; caliptra floral pasa de verde a verde pálido
19	16 hojas separadas; comienza floración (caída de primera caliptra floral)
20	10% caída de caliptra floral
21	30% caída de caliptra floral
23	17-20 hojas separadas; 50% caída de caliptra floral, plena floración
25	80% caída de caliptra floral
26	100% caída de caliptra floral
27	Cuaja; bayas jóvenes creciendo (> 2 mm diámetro), racimo en ángulo recto respecto al brote
29	Bayas de 4 mm de diámetro; racimos tienden a inclinarse hacia abajo
31	Bayas tamaño arveja (7 mm de diámetro)
32	Racimo comienza a cerrarse, bayas tocándose
33	Bayas aún duras y verdes
34	Bayas comienzan a ablandarse y °Brix comienzan a aumentar
35	Bayas comienzan a colorearse y a ensanchar:
36	Bayas con valores intermedios de °Brix
37	Bayas aún no maduras
38	Bayas en madurez de cosecha (22°Brix)
39	Bayas sobremaduras
41	Poscosecha; maduración del brote completa
43	Comienzo de caída de hojas
47	Fin de caída de hojas

En los estudios de etapas fenológicas (Caffarra and Eccel, 2011; Zapata et al., 2015; Verdugo-Vasquez et al., 2017). las temperaturas medias diarias son el principal factor que gobierna la sumatoria de grados requeridos para cada etapa, aunque también inciden variables climáticas como la radiación solar, y factores como la ubicación, la disponibilidad de agua y nutrientes, el manejo de plagas y enfermedades, etc. Según Pino Madrid , 2003 los cultivares Cabernet Sauvignon y Merlot en el valle del Río Claro (Región del Maule –Chile) requieren una acumulación

térmica para llegar a cosecha de 1470 y 1424 GDA respectivamente. En el caso de los cultivares ubicados en el valle de San Clemente (Región del Maule –Chile), los GDA fueron de 1467 para Cabernet sauvignon y 1452 para Merlot. A raíz de esta investigación, Ortega-Farías y Rivero (2019) llevaron a cabo un estudio para desarrollar y validar modelos que simulen la fenología de la vid de los cultivares Cabernet Sauvignon, Merlot, Chardonnay y Sauvignon Blanc en condiciones climáticas donde el agua disponible para riego está disminuyendo y se espera que las temperaturas aumente debido al cambio climático (Medrano et al., 2014).

Los modelos fenológicos se desarrollaron utilizando una ecuación mono molecular, donde la variable dependiente fue la escala fenológica (ELP) de Eichhorn y Lorenz (1977) modificada por Coombe (1995) y la independiente los grados-día acumulados (GDA). Es importante mencionar que los grados días acumulados (GDA) o “unidades de calor”, representan una unidad de energía necesaria para que los organismos vivos se desarrollen en un periodo de tiempo determinado. Esta variable representa la acumulación de temperatura por encima de una temperatura crítica a partir de la cual se manifiesta el desarrollo del cultivo (Fila et al., 2014). En relación con lo anterior, cada etapa de vida de un cultivo o fase fenológica, demanda de una determinada acumulación de temperatura para llegar a su término y así pasar a la siguiente. Así como se mencionó a la temperatura mínima o “de base”, también existe una temperatura óptima de desarrollo para los cultivos y sus etapas fenológicas. Por encima de esta, los cultivos pueden verse afectados en el crecimiento

Otra forma de expresar el K_c es separándolo en dos coeficientes un coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) y un coeficiente de evaporación del suelo (K_e), por lo que $K_c = K_{cb} + K_e$. Motivo por el cual, en la variedad Tempranillo se estableció un modelo de estimación de K_c en función de la acumulación de calor o GDA (Verdugo-Vasquez et al., 2017). Para conocer los distintos coeficientes basales de cultivo (K_{cb}) a lo largo de la temporada de crecimiento ((López-Urrea et al., 2012).

Por otro lado, existe una alternativa más simplificada para describir la ocurrencia de las distintas etapas de desarrollo del cultivo y establecer un modelo de estimación de K_c . Esta alternativa consiste en contabilizar la cantidad de días transcurridos desde una etapa de desarrollo elegida, por ejemplo, para un modelo de K_c en maíz se usó días después de siembra (K_0 et al., 2019). En vid es común iniciar el conteo a partir

del día de plena floración, de este modo los cambios de la vegetación se describen en días después de floración (Parker et al., 2011).

Debido a que las variaciones diarias de ETc son importantes en respuesta a las condiciones climáticas (Allen et al, 2006), es más conveniente utilizar valores promedios de Kc de un intervalo de tiempo que valores del coeficiente obtenidos de mediciones diarias de ETc. De esta manera, se puede elaborar la curva de Kc en función de una variable de monitoreo del crecimiento y desarrollo (GDA, ELP, DDF) que posea el mayor ajuste en el modelo lineal o polinomial (Reddy, 2015). En el caso de vides de Tempranillo, se estableció una relación lineal ($R^2 = 0,97$) entre Kcb y GDA a partir de valores de Kc promedio considerando intervalos de 5 días (López-Urrea et al., 2012). Otros autores realizaron la estimación de Kc en el cultivo de melón en función de los días después de trasplante (DAT) y desarrollaron un modelo polinomial de tercer orden ($R^2 = 0,95$) con Kc promedios a partir de intervalos de 13 días de duración (Shukla et al., 2014).

La determinación de las necesidades de agua con exactitud en las vides implica realizar mediciones precisas de la evapotranspiración del cultivo en las distintas condiciones climáticas, sea por métodos micro meteorológicos (EC o SR) o a través de lisímetros de pesada, y se requiere una alta inversión y personal capacitado para el análisis de datos e implementación (Ortega-Farias et al., 2006).

Existen valores de Kc de la vid propuestos en el manual de FAO 56 y provenientes de resultados de diferentes investigaciones que no representan las condiciones de producción del cultivar Cabernet Sauvignon de la Región del Maule (Chile) debido a diferencias en las condiciones climáticas, clon utilizado, tipo de portainjerto, densidad de plantas, método de riego, sistema de conducción y prácticas culturales.

Por lo anterior, existe la necesidad determinar los coeficientes Kc de vid en condiciones agroclimáticas y productivas locales a partir de metodologías accesibles y confiables para precisar el consumo de agua en las plantas. En este sentido, se plantea aplicar la técnica Surface Renewal, de menor costo (22.400 USD), que permite estimar la ETc a partir del balance de energía residual y validarla al compararla con Eddy Covariance (técnica de referencia) (56.000 USD).

Por otro lado, a partir de la curva de Kc elaborada se obtendrá la ecuación que permita estimar los distintos valores de Kc en función de una variable relacionada al crecimiento, que pueda ser medida fácilmente por el usuario a nivel del cultivo. En este sentido, se analizarán los GDA que se pueden obtener a partir de la medición

de temperatura diarias del aire, y la escala ELP y los días después de floración (DDF) a partir de observaciones a campo.

Otra de las situaciones por resolver consiste en determinar los intervalos de medición de ETc óptimos, para poder modelar las curvas de Kc con la mayor precisión posible. Se propone definir el intervalo de tiempo que permita el mejor ajuste del modelo en función de la variable relacionada con el crecimiento del cultivo: GDA, ELP o DDF.

2 HIPÓTESIS DE TRABAJO

- 2.1 La ELP es la variable de mejor desempeño en la calibración y validación del modelo de estimación de Kc basado en las determinaciones de evapotranspiración por el método Surface Renewal en *Vitis vinífera* cv. Cabernet Sauvignon.
- 2.2 Existe un intervalo específico para el cálculo de los coeficientes de Kc en que cada una de las escalas de evolución del desarrollo (GDA, ELP o DDF) que mejora los parámetros estadísticos durante la calibración de curvas de Kc estables entre temporadas

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Establecer un modelo de estimación de Kc en función de una variable de monitoreo del crecimiento y desarrollo en *Vitis vinífera* cv. Cabernet Sauvignon que sea estable y precisa en el tiempo.

3.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar la evapotranspiración del cultivo a través del método de estimación Surface Renewal y Eddy Covariance. Evaluar el grado de correlación entre ambas técnicas.
- b) Evaluar el efecto de programar el riego en base a las cantidades de agua evapotranspirada (mm) registradas a través de los métodos Surface Renewal y Eddy Covariance sobre el estado hídrico de la vid e intercambio gaseoso.

- c) Establecer un modelo matemático de estimación de coeficiente de cultivo (Kc) en función de una de las 3 escalas temporales GDA, ELP o DDF utilizadas para monitorear el crecimiento y desarrollo de *Vitis vinifera* cv Cabernet Sauvignon.
- d) Validar el modelo ajustado de cálculo del Kc en *Vitis vinifera* cv Cabernet Sauvignon con datos experimentales de una segunda temporada de crecimiento del cultivo.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Área de estudio y cultivo

El ensayo experimental se realizó en un viñedo comercial de *Vitis vinifera* cv Cabernet Sauvignon (clon 341 en portainjerto SO4) implantado en 2014 en el Valle de Pencahue, VII región del Maule- Chile (Latitud 35° 25' 58.5 S; Longitud 71° 47' 56.4 W, 104 m.s.n.m.).

El Valle de Maule se caracteriza por tener un clima templado a cálido con lluvias invernales (Köppen, 1948). La temperatura media anual es de 14,6 °C, siendo enero el más cálido con 22 °C y julio el mes más frío con 8,2 °C. Las precipitaciones anuales alcanzan los 689,3 mm con ocurrencia mayoritariamente entre los meses de invierno

El sistema de conducción fue en espaldera vertical de 2,10 m de altura con poda en guyot doble formado a 0,9 m del suelo con 12 yemas por cargador . La orientación de hileras era N-S y el marco de plantación de 2,3 m x 1,2 m (Figura 6).



Figura 6: Viñedo comercial de *Vitis vinifera* cv Cabernet sauvignon correspondiente a 4,47 ha ubicado en Rauquen, comuna de Pehuenhue, Región del Maule, Chile. Propiedad de Viña Concha y Toro, fundo Lourdes.

El suelo en donde se realizó el ensayo poseen las siguientes propiedades físicas: textura franco con 48% arena, 31% limo y 21% arcilla, materia orgánica de un 1,1 %, con un pH de 5,6, conductividad eléctrica de 0,59 dS/m y una densidad aparente de 1,2 a 1,6 g/cm³. En cuanto a la capacidad de retención de humedad, la capacidad de campo (CC) fue de 12,7% y el punto de marchitez permanente (PMP) de 7,3%. La velocidad de infiltración fue 5,4 cm/h.

4.2 Evapotranspiración del cultivo (ET_c)

Los métodos SR y EC utilizados para calcular la ET_c se basan en la ecuación de balance energético, que describe los flujos de energía sobre un sistema de vegetación. La ecuación de balance energético abreviada en condiciones estables es (Allen et al., 2006):

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0$$

- R_n = radiación neta [MJ m⁻² día⁻¹]
- H es el calor sensible [MJ m⁻² día⁻¹]
- G es el flujo de calor del suelo [MJ m⁻² día⁻¹]
- λET es el flujo de calor latente [MJ m⁻² día⁻¹]

La λET representa la fracción de la evapotranspiración que puede ser estimada directamente, o derivada de la ecuación del balance de energía si todos los otros componentes son conocidos (Hu et al., 2017).

Los componentes del balance de energía (RN, H y G) fueron medidos en una estación agroclimática de configuración Surface Renewall "full" cuya instalación se realizó según las especificaciones de McElrone et al. (2013) y Parry et al. (2019) en un área considerada homogénea dentro del viñedo comercial, específicamente en el centro del cuartel (Figura 7).

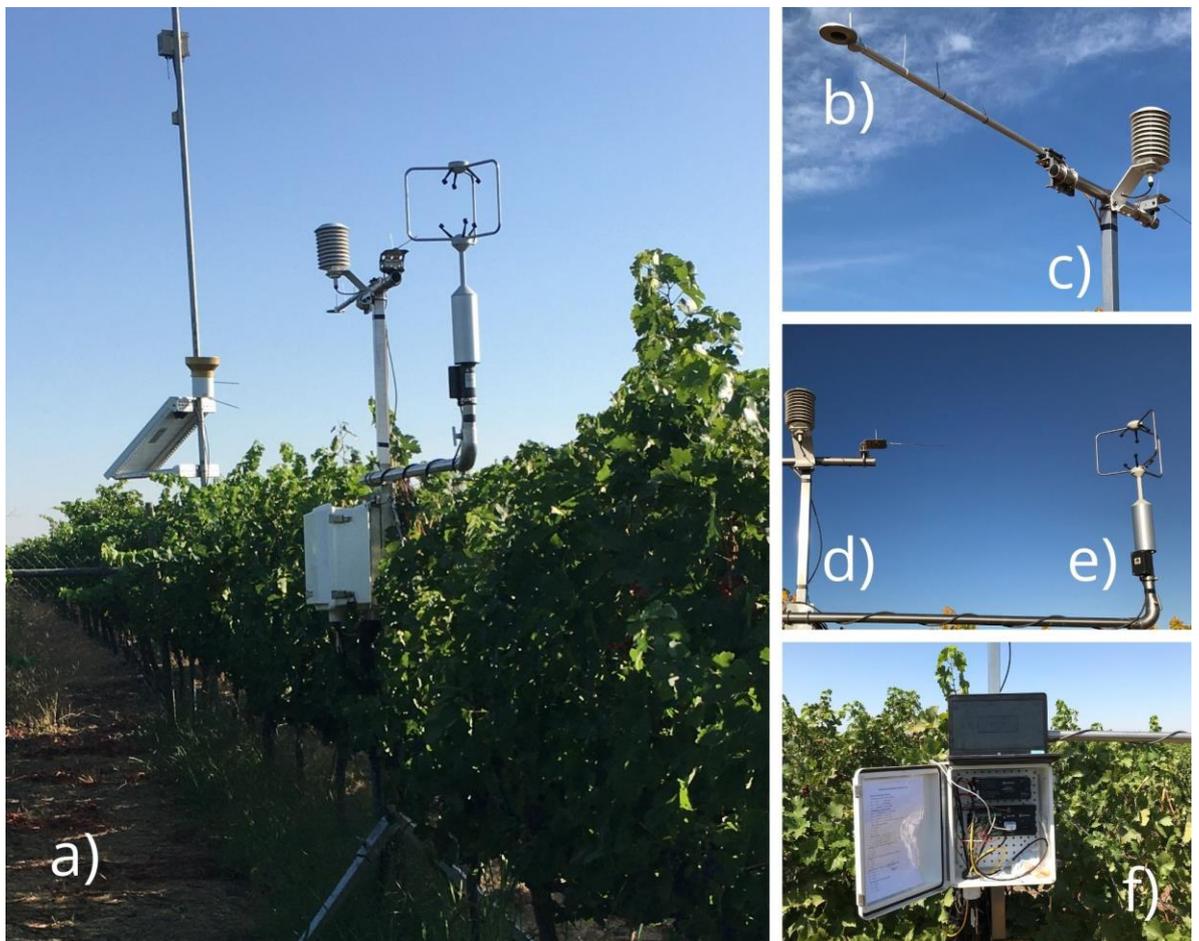


Figura 7: a) Estación agroclimática de configuración Surface Renewall "full", b) Piranómetro , c) sensor de la temperatura y humedad relativa del aire, d) Termocupla (0.076 mm de diámetro), e) anemómetro sónico, f) datalogger (CR1000, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA)

La R_n se midió con un Piranómetro NR Lite 2 net (Kipp & Zonen Inc., Delft, Netherlands) y la temperatura y humedad relativa del aire con un sensor modelo HC2S3.

Para obtener los valores de H por el método EC se utilizó un anemómetro sónico (Model 81000 RE; R.M Young Company, USA) cuyas mediciones de viento y temperatura se obtuvieron a una frecuencia de 20 Hz. Para la estimación de H por el método SR, las mediciones precisas de los gradientes de temperatura fueron capturadas a una altura de 2,7 m del suelo con una termocupla (FW3 type E Fine-Wire fast de 0,076 mm de diámetro) a una frecuencia de muestreo de 10 Hz (10 samples s⁻¹). La determinación de la amplitud (A) y la frecuencia de rampa inversa (τ) fueron obtenidas a partir de la estructura de los datos de temperatura siguiendo los procedimientos matemáticos de Van Atta (1977) para condiciones atmosféricas estables e inestables, utilizando un lapso de tiempo 0,5 s. El factor de calibración alpha (α) requerido para obtener un flujo real de H se determinó en función de la regresión forzada al origen entre las estimaciones diarias de flujo de H realizadas por el anemómetro sónico vs. las estimaciones semanales de H del método SR no calibradas (Shapland et al., 2013).

El flujo de energía G se midió a través de tres unidades de detección de suelo ubicadas, una entre las hileras y las otras dos dentro de la hilera (debajo de un gotero y entre goteros). Dichas unidades estaban compuestas por una placa de flujo de calor (Hukseflux HFP01SC-15, Delft, Netherlands) a 0,08 m de profundidad, por encima de esta placa de flujo de calor y a una profundidad de 0,02 m y 0,06m se ubicaron dos sensores de temperatura promedio de suelo (TCAV, Campbell Scientific, Logan UT, EE. UU.) Adicionalmente, a 0,025 m de profundidad se ubicó un sensor de humedad del suelo (CS655, Campbell Scientific, Logan UT, USA). Campbell Scientific, Inc. (2012).

Los datos registrados con el instrumental de medición de la estación agroclimática fueron almacenados en el datalogger (CR1000, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA) y procesados para obtener los flujos de calor a intervalos de 30 min.

Las mediciones de los componentes se registraron de forma diaria durante dos temporadas consecutivas (2018/2019 y 2019/2020), desde la etapa de formación del 80% de primordios florales, (21 y 23 noviembre respectivamente), hasta el 8 de mayo. Esto se debió a que autores señalan que iniciar mediciones con mayor índice de área foliar (Agam et al. 2019) (Tosoni et al., 2021) proporcionan la estructura óptima para estimar los flujos del balance de energía.

4.3 Riego

En ambas temporadas del ensayo, la programación del riego se realizó en base a las cantidades de agua evapotranspirada (mm) en promedio registradas a través de los métodos SR y EC durante 7 días consecutivos.

El suministro de agua se realizó con un sistema de riego por goteo con emisores auto compensados cuyo caudal fue de 1,84 mm/h espaciados cada 0,6 m.

4.4 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET₀)

La ET₀ se determinó a partir del método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 2006) que integra la radiación, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

Donde:

- ET₀: Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)
- R_n: Radiación neta de la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)
- G: Flujo de calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹)
- T: temperatura media de laire a 2 m de altura (°C)
- U₂: velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹)
- E_s: presión de vapor de saturación (KPa)
- E_a: presión de vapor de real (KPa)
- e_s – e_a: Déficit de presión de vapor (KPa)
- Δ: Pendiente de la curva de presión de vapor (KPa °C⁻¹)
- γ: constante psicrométrica (KPa °C⁻¹)

Los datos climáticos fueron registrados con una estación meteorológica automática A753GSM Adcon Telemetry (2015) ubicada sobre una superficie de pasto.

4.5 Estado hídrico de las plantas

Este estudio se llevó a cabo dentro del cuartel experimental de una investigación de riego deficitario, del cual, con la intención de evaluar el efecto de la programación del riego se midió en las plantas pertenecientes al tratamiento testigo (X₀= riego al 100 % de la ET_c) (Figura 9). lo siguiente :

El potencial hídrico xilemático a mediodía (Ψ) se midió el día anterior a la reposición del riego, al medio día solar (entre las 13 y 14 h) y una vez por semana con una cámara de presión (Scholander et al., 1965) Model 600 (PMS Instrument, Corvallis, OR) (Figura 8) según la técnica de Hsiao (1990). Se seleccionaron 2 hojas adultas

al azar por repetición en la parte central de la planta completamente expuestas al sol, sanas y homogéneas. Previo a la medición, la hoja fue cubierto con una bolsa de aluminio durante 90 min. Una vez transcurrido este tiempo, se cortaron las muestras foliares con una navaja y se midió de inmediato en cámara de presión.

También se midió la conductancia estomática (gs) 2 h antes al medio día solar del día anterior al riego (11 h a 12 h) usando el porómetro portátil de flujo pasivo (Decagon Devices, modelo SC-1, USA)(Figura 8). En cada una de las hileras seleccionada como unidades observacionales por repetición, se seleccionaron cuatro claros (plantas comprendidas entre postes metálicos (Figura 6).) al azar y en cada uno de los claros se marcó la planta central y se seleccionó una hoja adulta con exposición directa a la luz solar, en buen estado sanitario. Todas las determinaciones de gs a lo largo de la temporada se realizaron sobre las mismas hojas sobre la cara abaxial .

4.6 Contenido de humedad del suelo

Con la intención de verificar el posicionamiento del agua aplicada determinada en función de SR Y EC en la zona de raíces , se utilizaron sondas volumétricas (Sentek EnviroSCAN) compuestas por cuatro sensores de humedad a 20, 40, 60 y 80 cm de profundidad. La Sonda estaba ubicada en la hilera 79 dentro del tratamiento X0R2 (X0= riego al 100 % de la ET en la Repetición 2)(Figura 9).

Para la verificar que las hileras seleccionadas como unidad observacional recibieron efectivamente la lámina de riego determinada en función de SR y EC, en una de las hileras centrales de cada repetición, específicamente en el centro de la hilera, se instalaron medidores volumétricos de agua en litros (caudalímetros) . Los datos de los medidores fueron registrados antes y después de cada evento de riego.



a)



b)

Figura 8 a) Instrumental de medición (derecha a izquierda): sonda de humedad del suelo, porómetro portátil (conductancia estomática), estación climática (evapotranspiración de referencia), cámara de presión (potencial hídrico, Scholander et al., 1965); b) Medición a campo de potencial hídrico (abajo).

4.7 Escalas de monitoreo de crecimiento y desarrollo de la vid

En el análisis del grado de relación entre el K_c respecto a los grados día acumulados (GDA), los días después de floración (DDF) y la escala fenológica de Eichhorn y Lorenz modificada (ELP), se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Los valores diarios de GDA se calcularon usando el método del seno simple (Baskerville y Emin, 1969) a partir de la temperatura base ($T_b=10^{\circ}\text{C}$) (Tabla 3).
- Temperatura límite superior ($T_u= 35^{\circ}\text{C}$) , Temperatura base ($T_b= 10^{\circ}\text{C}$ según lo descrito por Buttrose y Hale (1973) para *Vitis vinífera* L., cv. Cabernet Sauvignon.

Las ecuaciones fueron las siguientes:

Tabla 3: Ecuaciones del método del seno simple para el cálculo de valores diarios de Grados días Acumulados (GDA).

	Ecuación	Condición
1	$GDA = 0$	$T_x < T_b$
2	$GDA = \frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{T_x + T_n}{2} - T_b \right) \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 \right) + \alpha \cdot \cos \theta_1 \right]$	$T_n < T_b$ y $T_b < T_x < T_u$
3	$GDA = \frac{T_x - T_n}{2} - T_b$	$T_n > T_b$ y $T_b < T_x$
4	$GDA = \frac{T_u - T_b}{2}$	$T_n > T_u$ y $T_x > T_u$
5	$GDA = \frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{T_x + T_n}{2} - T_b \right) * (\theta_2 - \theta_1) + \alpha [\cos \theta_1 - \cos \theta_2] + (T_u - T_b) * \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2 \right) \right]$	$T_n < T_b$ y $T_x > T_u$
6	$* \theta_1 = \text{Arcsin} \left[\frac{T_b - \frac{T_x - T_n}{2}}{\alpha} \right]$	
7	$* \alpha = \frac{T_x - T_n}{2}$	
8	$* \theta_2 = \text{Arcsin} \left[\frac{T_b - \frac{T_x - T_n}{2}}{\alpha} \right]$	

Donde , T_n y t_x son temperatura mínima y máxima respectivamente , mientras que θ_1 , θ_2 y α fueron calculados usando las siguientes ecuaciones :

9	$\theta_1 = \text{Arcsin} \left[\frac{T_b - \frac{T_x + T_n}{2}}{\alpha} \right]$
10	$\alpha = \frac{T_x - T_n}{2}$
11	$\theta_2 = \text{Arcsin} \left[\frac{T_u - \frac{T_x + T_n}{2}}{\alpha} \right]$

- La cuantificación diaria sobre el estado fenológico en ELP modificada (Coombe 1995) se realizó mediante el uso del modelo monomolecular desarrollado y validado en la región del Maule, que asocia grados día (x) con

la evolución de fenología de la vid (y) a través de la siguiente ecuación exponencial:

$$ELP = ELP_f * \delta e^{\beta GDA_i}$$

- ELP= Número Escala Eichhorn and Lorenz (ELP)
- ELP_f= Número de la última etapa fenológica
- δ = constantes empíricas ($\delta= 34,55$).
- β = constantes empíricas ($\beta= 0,0017$)
- GDA_i=Grados día Acumulados (método del seno simple)

Los valores de las constantes empíricas δ y β corresponden a los reportados por Ortega-Farias & Riveros-Burgos (2019) en Cabernet Sauvignon en Talca -San Clemente, Chile.

Con el propósito de verificar la asertividad del modelo publicado por de Ortega-Farias & Riveros-Burgos (2019) utilizado para asignar un valor diario de ELP a las estimaciones de ET, se compararon las estimaciones de Kc con las observaciones de seguimiento del estado fenológico obtenidas durante las dos temporadas de estudio (2018 -2019 y 2019-2020.)

El día cero de la escala DDF ocurrió cuando el equipo investigador realizando un seguimiento de estados fenológicos observo que las plantas del cuartel del viñedo comercial en estudio (Figura 6) alcanzaron que 80 % de las flores abrieron en la temporada de modelamiento .

4.8 Modelamiento de curvas de coeficientes de cultivo

Con el objetivo de construir curvas del Kc que permitieran expresar la evolución del mismo en cada una de estas escalas de evolución del tiempo, cronológico, térmico y fenológico, se convirtieron los datos de ET_c y ET₀ diarios en términos de ET_c y ET₀/grado día acumulado y ET_c y ET₀/0,093 de ELP.

Se obtuvieron 1516 datos por cada componente (ET_c y ET₀), en términos de GDA. Para garantizar la integridad de los cálculos de Kc con igual número de observaciones en la escala DDF y ELP (N=168) se agruparon los valores de ET y ET₀ cada 9 GDA.

Para obtener los modelos de predicción de Kc se recurrió a la construcción de curvas considerando como variable dependiente (Y) a los valores de Kc representativos por

periodo o intervalo de crecimiento de igual longitud de días, y como variable independiente (X) el valor promedio de cada intervalo en la escala DDF, GDA y ELP.

Los modelos se construyeron de dos formas : En la primera los valores de Kc se obtuvieron de dividir los promedios de las observaciones de ETc sobre los promedios de ET0 con intervalos homogéneos a lo largo de la temporada de 6, 7, 8 y 9 unidades cronológicas, térmicas y fenológicas.

La segunda forma , consistió en determinar la longitud de los intervalos a lo largo de periodo de crecimiento y realizar el procedimiento de cálculo de Kc siguiendo el método de optimización no lineal con la herramienta «Solver» de Microsoft Excel (Hyvönen y De Pascale, 1999). De esta manera es posible obtener modelos comparables con la estrategia de cálculo de Kc de intervalos homogéneos.

Para llevar a cabo la metodología de optimización con «Solver» se tuvieron las siguientes consideraciones:

- 1- Modelo a optimizar: los valores de los parámetros se obtuvieron de asociar todos los valores de cada escala de crecimiento como variable independiente X (DDF, GDA, ELP) con la evolución de los coeficientes de cultivo Kc como variable dependiente (N=168) y expresar lo anterior en una ecuación de polinómico grado 2 (escalas de crecimiento y desarrollo en DDF y GDA) y polinómico grado 3 (escala ELP).
- 2- Función objetivo a maximizar: se obtuvo con la inversa de la matriz de información de Fisher (FIM^{-1} ; Chow, 1983).
- 3- Variables: el número límite de variables de decisión en las celdas cambiantes fue de 25.
- 4- Restricciones: se definieron en 9 días (escala DDF), 81 grados (escala GDA) y 0,83 unidades (escala ELP) para limitar la longitud máxima de los intervalos.
- 5- Métodos de optimización: se aplicaron de manera consecutiva dos métodos de resolución disponibles en «Solver»; a) Algoritmo Evolutionary y b) Algoritmo GRG (Generalized Reduced Gradient) (Sánchez-Álvarez y López-Ares, 1998).

4.9 Validación

Los modelos de curvas de Kc validados fueron aquellos cuyos intervalos de estimación de Kc proporcionaron primero un p –value significativo, y aquellos cuyo

coeficiente de determinación R^2 y comportamiento gráfico tipo sigmoidea desde floración a cosecha se destacaron en el proceso de comparación.

Para evaluar la bondad del ajuste de cada uno de estos modelos de estimación de K_c , se procedió a calcular los K_c según el procedimiento descrito anteriormente (intervalo en días) con los cuales fueron calibrados dichos modelos.

4.10 Diseño experimental

El diseño experimental sobre el cual se realizaron las mediciones de estado hídrico fueron dentro del implementado para una investigación de déficit hídrico en bloques completamente aleatorizados (D.B.C.A.) con un solo tratamiento (X_0 = riego al 100 % de la ET_c) y 4 repeticiones (R1 a R4) (Figura 9). La unidad experimental fueron 6 hileras continuas mientras que la unidad observacional fueron las 2 hileras centrales (Figura 9).

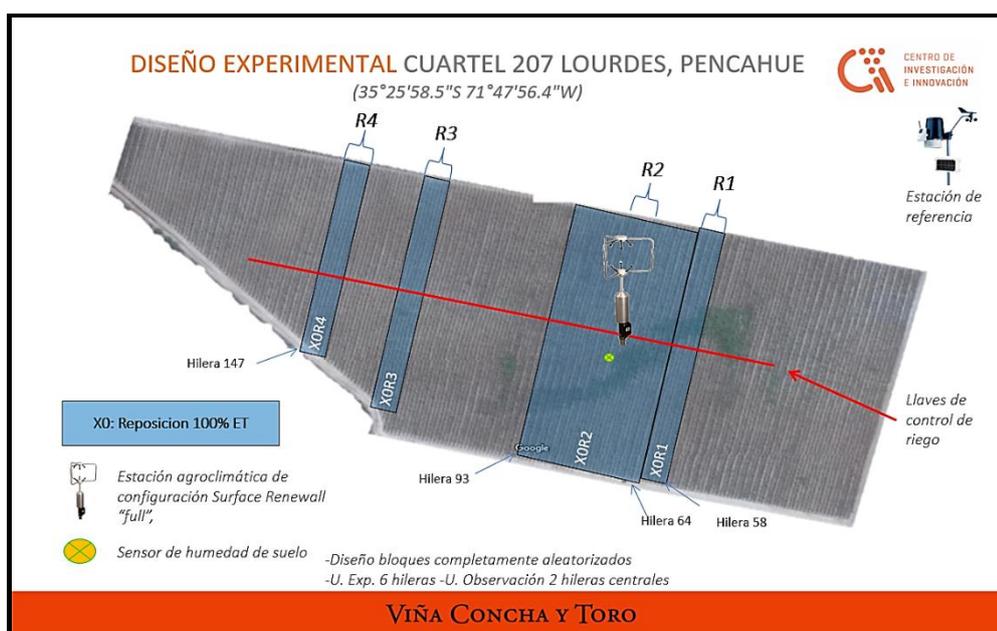


Figura 9: Diseño experimental en bloques completamente aleatorizados en viñedo comercial de *Vitis vinífera* cv Cabernet Sauvignon, Región del Maule, Chile.

4.11 Análisis estadísticos

Se utilizó el software estadístico STATGRAPHICS Centurion XVIII para calcular los siguientes parámetros estadísticos: media, desviación estándar, coeficiente de regresión (R^2), los valores de significancia p-value para los parámetros y la razón F para comparar el grado de relación entre las escalas DDF, GDA y ELP y los K_c obtenidos bajo diferentes estrategias de cálculo y métodos de estimación de ET.

Finalmente, se realizó la comparación entre los Kc observados y los Kc predichos por el modelo a través de los siguientes indicadores de bondad de ajuste: error cuadrático medio (RMSE), media del error absoluto (MAE), índice de concordancia (dr) y coeficiente de determinación (R^2). El análisis de esta comparación se realizó empleando el paquete Package 'hydroGOF' Version 0.4.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Determinación de la evapotranspiración del cultivo con Surface Renewal y Eddy Covariance

A partir de las variables meteorológicas registradas durante las temporadas 2018-2019 y 2019-2020, se estimó la ETc mediante los métodos SR y EC. Se observó un grado de correlación alto entre ambas técnicas ($R^2=0,87$) entre floración y senescencia (Figura 10).

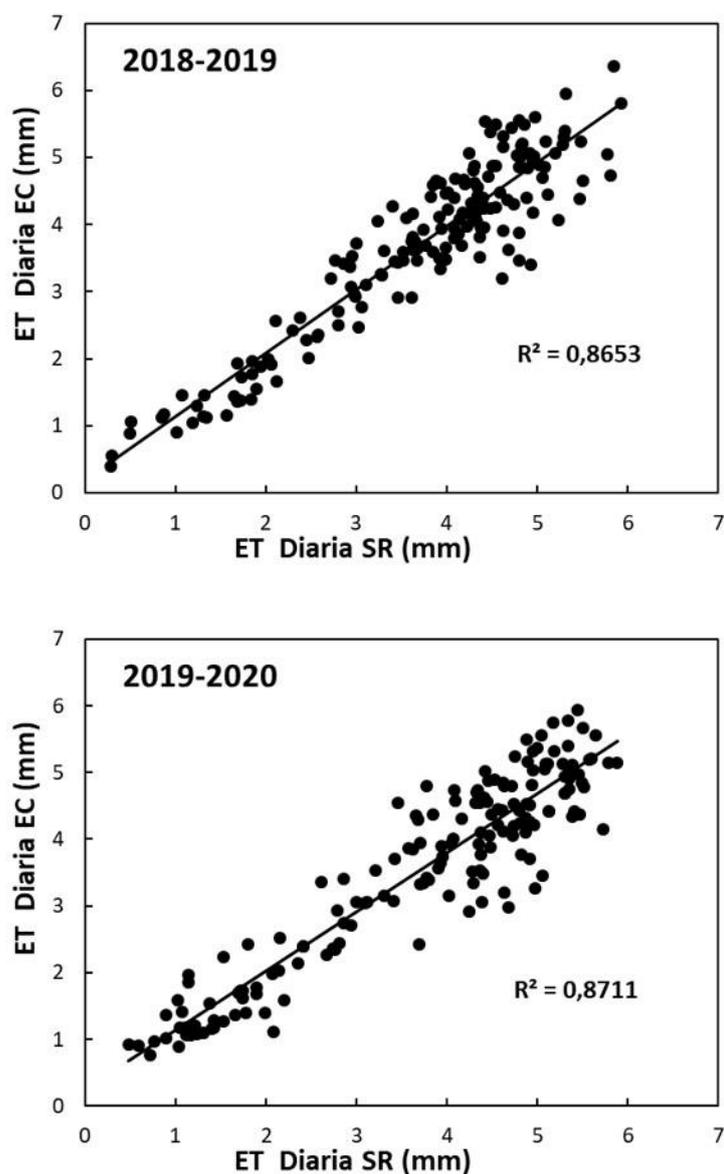


Figura 10: Relación entre las estimaciones diarias de evapotranspiración del cultivo (ET) a través de Surface Renewal (SR) y Eddy Covariance (EC) en las temporadas 2018/2019 y 2019/2020.

En estudios realizados en el cultivar Cabernet sauvignon se observó que utilizando el método de análisis SR propuesto por Castellví (2004), se alcanzó un $R^2=0,89$ entre SR y EC y con el método de estimación residual un $R^2= 80\%$ (Tosoni et al., 2021). Los ensayos mencionados poseen diferencias respecto al nuestro en cuanto a la altura de medición de termocupla (2.45 m del suelo) y la fecha de inicio de las estimaciones (enero). Los resultados referidos a la correlación entre SR y EC se encuentran dentro de rangos similares de coeficientes de determinación obtenidos en este estudio.

Poblete et al. (2014) mencionan que las estimaciones de ET_c en vid por SR se pueden considerar más que aceptables al ponderarse con EC, al obtener correlaciones significativas de la estimación del calor sensible por SR y EC (0,70 % y 0,93 % respectivamente) considerando el efecto de la altura y el tiempo de retardo en viñedo regado por goteo.

Otros autores han obtenido estimaciones de ET en Pinot noir con SR a través de las mediciones directas de R_n y G con R²=0,94 entre SR y EC (Parry et al., 2019). Las condiciones experimentales del estudio mencionado fueron similares al nuestro salvo que la termocupla estuvo ubicada a 50 cm por encima del dosel y fue elevada periódicamente a medida que crecía el follaje, siendo una posible causa del mayor grado de correlación medido respecto a nuestro estudio; un hecho que muy posiblemente explique el aumento de R² respecto a nuestro ensayo y el de otros autores (R²=0,87) (Hu et al., 2018).

5.2 Efectos de la programación de riego en base a determinaciones de Surface Renewal sobre el estado hídrico de Cabernet Sauvignon

En la Figura 11 se observan las láminas de riego semanales determinadas en base a la ET con el método SR respecto a las láminas de riego aplicadas. Las diferencias entre la cantidad de agua aplicada y calculada se deben a que este estudio se llevó a cabo dentro de una investigación de riego deficitario y para dar inicio a los riegos durante 2018/2019 fue necesario aplicar 39 % a 36% menos de la lámina indicada por SR entre los 36 y 56 DDF.

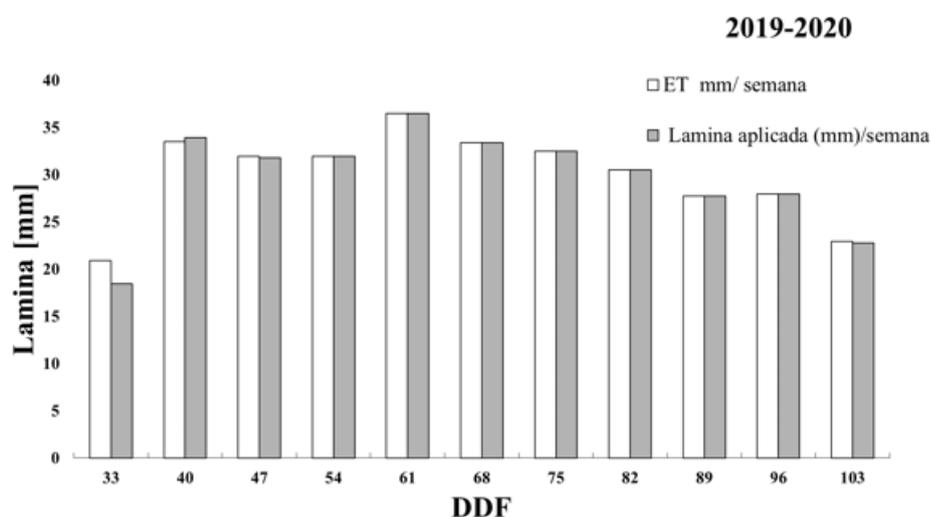
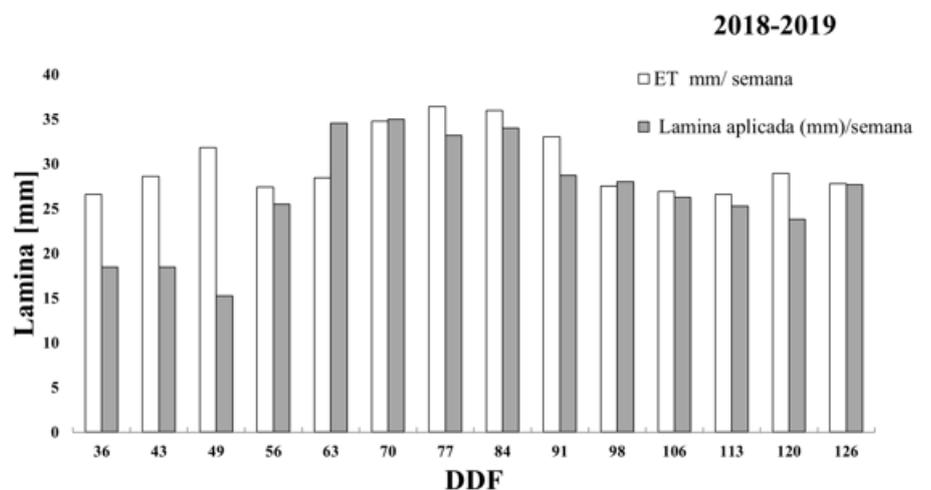


Figura 11: Evapotranspiración del cultivo con el método Surface Renewal (ET SR) y láminas de riego aplicadas por semana (caudalímetros) considerando los días después de floración (DDF) en *Vitis vinífera* cv Cabernet Sauvignon.

El potencial hídrico xilemático promedio fue de -0,85 MPa (2018-2019) y -0,89 MPa (2019-2020) y su rango de valores fue entre -0,43 MPa hasta -1,19 MPa (

Figura 12). Los riegos aplicados en ambas temporadas mantuvieron a las plantas en niveles entre sin déficit hídrico ($\Psi_x > -0,8$ MPa) y leve ($-0,8 > \Psi_x > -1,0$ MPa) (Ojeda, 2002). Ante situaciones de déficit hídrico leve a moderado ($-1,0 > \Psi_x > -1,2$ entre chapoda 2 (EPL 33) y pinta (ELP 36), la humedad del suelo promedio fue 32,5 % y el DPV tuvo valores superiores a las mediciones anteriores (1,03 KPa y 1,1 KPa) entre de 1,9 KPa y 1,5 KPa (

Figura 12).

En nuestro estudio cuando se observó que la conductancia estomática disminuyó a $300 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, el contenido de humedad del suelo era de 33% y el DPV de 1,7 KPa (

Figura 13). También se observó que dicha variable alcanzó $550 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ cuando el DPV fue de 1,17 KPa. Diversos autores (Vila et al., 2009; Hugalde & Vila, 2014; Hochberg et al., 2017, Zúñiga et al., 2018) han mencionado que la respuesta de la conductancia estomática no solo se debe el régimen hídrico en el suelo, sino que también se encuentra regulada por las señales de ácido abscísico, los cambios instantáneos en las variables como el déficit de presión de vapor y las condiciones ambientales donde se establece la planta.

Para ambas temporadas, los valores de g_s se mantuvieron entre los 400 y 500 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Sánchez-Elez (2015) quien indicó que vides (cv Cabernet Sauvignon) bien regadas presentaron valores de $g_s = 400 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y $\psi_x = -0,86 \text{ MPa}$, mientras que para vides con restricción hídrica g_s se redujo a $0,18 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ con valores de $\psi_x < -1,20 \text{ MPa}$

Si se analizan los valores obtenidos de potencial hídrico xilemático y conductancia estomática observados durante este estudio, podemos señalar que las reposiciones basadas en las determinaciones de SR al 100% de la ET_c permitieron un régimen de riego sin estrés durante la mayor parte del tiempo. En las ocasiones donde se presentó un nivel de déficit hídrico leve, podría decirse que la situación es explicada por factores climáticos ocurridos el día de la medición y no por baja humedad en el suelo.

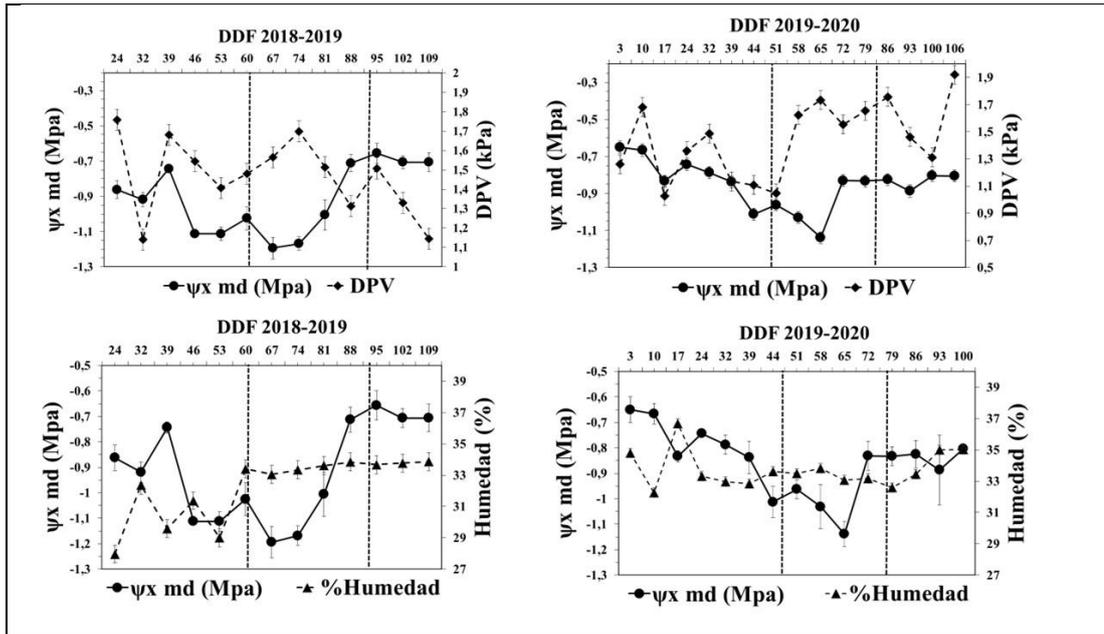


Figura 12: Evolución del potencial de xilema (Ψ_x) en vides de cv. Cabernet Sauvignon, déficit de presión de vapor (DPV) y humedad del suelo medido el día anterior al evento de riego durante las temporadas 2018/2019-2019/2020. . Las líneas discontinuas marcan de izq. a der.: Chapoda 2(EPL 33) y Pinta.(ELP 36).

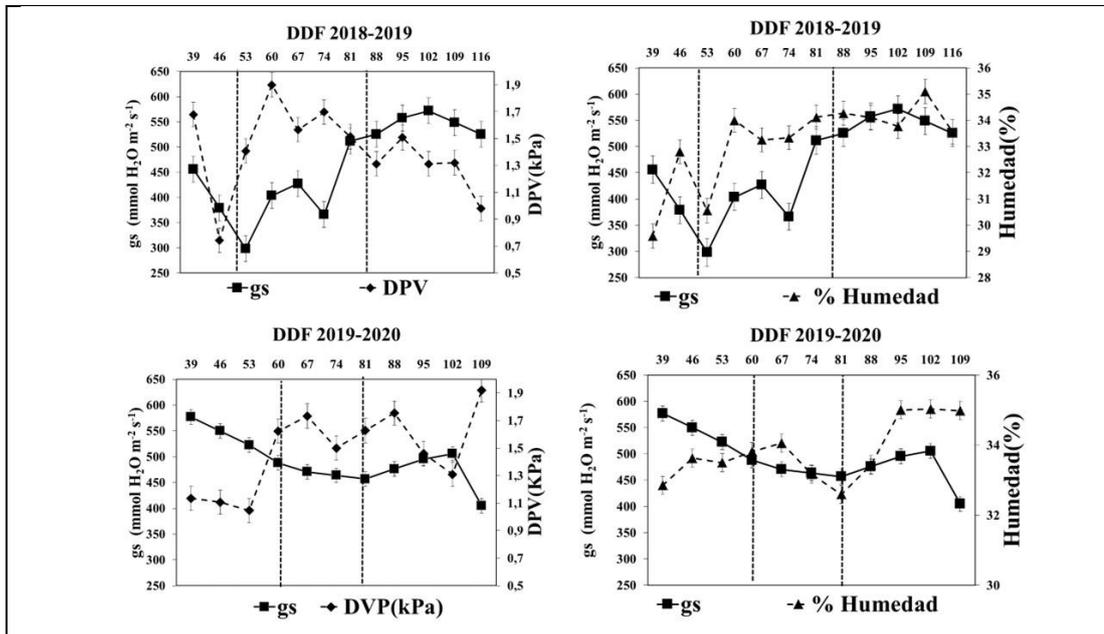


Figura 13: Evolución de la conductancia estomática (gs) de hojas de vides (cv. Cabernet Sauvignon), déficit de presión de vapor (DPV) y humedad del suelo registrado el día anterior al evento de riego durante las temporadas 2018/2019. 2019/2020. Las líneas discontinuas marcan de izq. a der.: Chapoda 2(EPL 33) y Pinta.(ELP 36).

5.3 Modelo de estimación de coeficiente de cultivo (Kc) en función de 3 escalas temporales de monitoreo del crecimiento y desarrollo de *Vitis vinifera* cv Cabernet Sauvignon

En la Tabla 4 se muestran los parámetros estadísticos de los modelos de regresión polinomial de los distintos intervalos (días) evaluados para calcular Kc según DDF y GDA. Todos los modelos fueron estadísticamente significativos ($P \leq 0,05$), excepto el ET-SR en la escala GDA con 9 días de intervalos. Respecto a los demás parámetros estadísticos, se observa que en la escala DDF los modelos de estimación del Kc con intervalos de 7 y 8 días tuvieron los mayores coeficientes de regresión (R^2 ajustado entre 51 % a 57%) respecto a Kc 6 y 9 días

Respecto al modelo obtenido con Solver en la escala DDF (Tabla 4), se destacó aquel construido con las estimaciones de ET del método EC (R^2 ajustado = 63%). A pesar de que el modelo Kc Solver - DDF con SR tuvo coeficientes menores (R^2 ajustado = 43%) se consideró igualmente para evaluar su capacidad de predicción en el proceso de validación.

Tabla 4. Parámetros estadísticos del modelo de regresión polinomial con orden 2 entre las diferentes longitudes de intervalos (días) en función de los Días después de floración (DDF), y el método de estimación de evapotranspiración del cultivo (ET-SR (Surface Renewal) y ET-EC (Eddy Covariance)).

		Días después de floración (DDF)				
ET	Indicadores	KC 6 días	KC 7 días	KC 8 días	KC 9 días	KC Solver
SR	Constante	0,796979	0,790605	0,78695	0,808676	0,813702
	DDF	0,00399857	0,00421138	0,00441391	0,00342329	0,00371191
	DDF ²	-0,0000301	-0,0000315	-0,0000332	-0,0000258	-0,0000294
	R ²	46%	51%	57%	31%	46%
	Valor P	0,0001	0,0002	0,0002	0,0227	0,0006
	Razón F	12,79	13,25	14,34	4,93	10,88
EC	Constante	0,680593	0,675598	0,675568	0,683177	0,688504
	DDF	0,00733729	0,00747736	0,00756146	0,00716831	0,0073519
	DDF ²	-0,0000478	-0,0000487	-0,0000497	-0,0000465	-0,0000487
	R ²	58%	63%	66%	51%	63%
	Valor P	0	0	0	0,0017	0
	Razón F	19,81	20,57	20,74	10,04	20,66

En la escala GDA (Tabla 5), se observa que los modelos de Kc con intervalos de 7 y 8 días (SR) tuvieron menores R^2 ajustados (37% y 31 % respectivamente) respecto a los modelos con estimaciones de EC (58 % y 56 % en intervalos similares).

Tabla 5: Parámetros estadísticos del modelo de regresión polinomial con orden 2 entre las diferentes longitudes de intervalos (días) en función de los Grados Días acumulados (GDA) y el método de estimación de evapotranspiración del cultivo (ET-SR (Surface Renewal) y ET- EC (Eddy Covariance)).

GRADOS DIAS ACUMULADOS (GDA)						
ET	Indicadores	KC 6 días	KC 7 días	KC 8 días	KC 9 días	KC Solver
SR	Constante	0,537234	0,52591	0,520957	0,784447	0,55068
	GDA	0,000723623	0,000748315	0,000753317	0,00384197	0,00071959
	GDA²	-0,00000033	-0,00000034	-0,00000034	-0,00002465	-0,0000003
	R²	29%	37%	31%	21%	35%
	Valor P	0,0056	0,072	0,0138	0,0645	0,0107
	Razón F	6,43	6,3	5,48	3,31	5,67
EC	Constante	0,186901	0,174198	0,171381	0,652503	0,204296
	GDA	0,00134251	0,00136968	0,00137407	0,00761461	0,0013335
	GDA²	-0,00000056	-0,000001	-5,79E-07	-0,00004411	-0,0000006
	R²	55%	58%	56%	51%	61%
	Valor P	0	0	0,0003	0,0018	0
	Razón F	17,47	16,41	13,62	9,88	17

Es importante resaltar que los parámetros estadísticos de los modelos de Kc vs DDF y Kc vs GDA que se obtuvieron de las estimaciones de ET del método EC son superiores a los obtenidos con SR.

En la Figura 14 se observa que las mayores diferencias de los valores de Kc fueron entre floración y la práctica de chapoda 1 (ELP 27,615 GDA,21 DDF) . Los Kc estimados con SR fueron superiores en una magnitud de 0,05 a 0,1 respecto a los obtenidos con EC. En otras palabras, en este estudio fue relevante el efecto que tuvo el cambio en la arquitectura de la planta a causa de la práctica de chapoda sobre las estimaciones de ETc con SR.

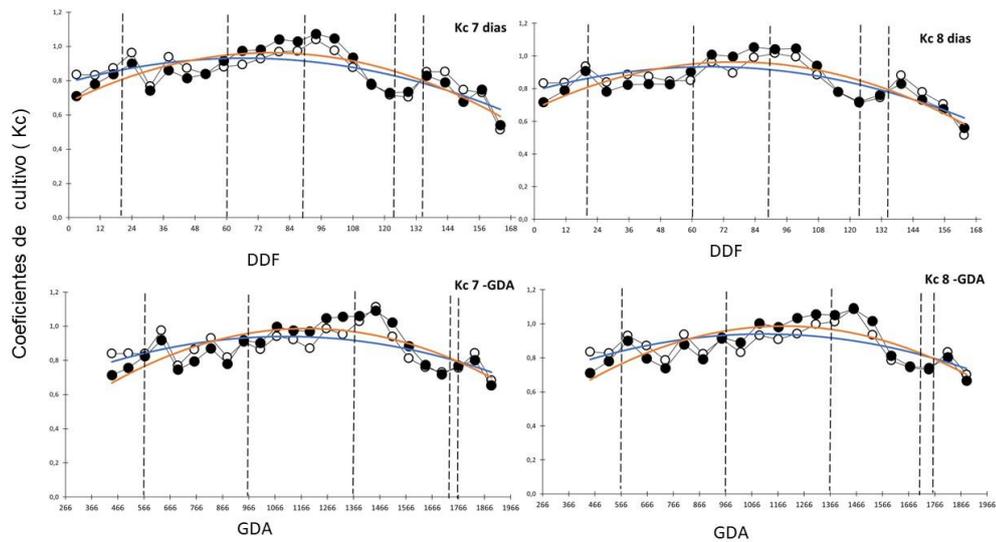


Figura 14: Coeficiente de cultivo (Kc) de longitudes de intervalos de 7 y 8 días, en función de días después de floración (DDF) y de Grados Días Acumulados (GDA) según el método de estimación de evapotranspiración del cultivo (ET SR (Surface Renewal) y ET EC (Eddy Covariance). con regresión polinomial orden 2. Las líneas discontinuas marcan de izq. a der. Chapoda 1 (ELP 27,615 GDA,21 DDF)– Chapoda 2(EPL33, 100.66 GDA, 59DDF) -Pinta(ELP36, 1382 GDA,126 DDF) - Cosecha ensayo(ELP38, 1716 GDA, 126 DDF)- Cosecha comercial(EPL38,1767 GDA, 134 DDF)

Considerando la escala Eichhorn and Lorenz (ELP,Tabla 6), todos los modelos de regresión polinomial con orden 3 fueron estadísticamente significativos ($P \leq 0,05$). El modelo de Kc 9 días obtuvo el mayor $R^2 = 74\%$, sin embargo, no se consideró para la validación debido a que en la conversión de los datos de ETc y ET0 diarios (en términos de ELP en el cálculo de Kc cada 9 días), la curva no obtuvo estimaciones de Kc después de cosecha ensayo.

Tabla 6 Parámetros estadísticos del modelo de regresión polinomial con regresión orden 3 entre las diferentes longitudes de intervalos (días) en función de la Escala Eichhorn and Lorenz (ELP) con el método de estimación de evapotranspiración del cultivo (ET SR (Surface Renewal) y ET EC (Eddy Covariance)).

Escala Eichhorn and Lorenz						
ET	Indicadores	KC 6 días	KC 7 días	KC 8 días	KC 9 días	KC Solver
SR	Constante	1,57446	1,66946	2,03388	-2,18154	3,01257
	ELP	-0,179136	-0,187199	-0,224216	0,209892	-0,320499
	ELP ²	0,009088	0,009301	0,010542	-0,004203	0,013684
	ELP ³	-0,0001284	-0,00013015	-0,00014386	2,13E-05	-0,00017766
	R ²	67%	67%	71%	74%	69%
	Valor P	0	0	0,0001	0	0
	Razón F	19,1	16,89	14,3	17,68	15
EC	Constante	11,9692	11,618	11,7515	4,18023	19,1638
	ELP	-1,17531	-1,14135	-1,15342	-0,371358	-1,93139
	ELP ²	0,040207	0,039126	0,039485	0,012847	0,06632
	ELP ³	-0,00044628	-0,00043493	-0,00043848	-0,00013925	-0,0007428
	R ² ajus	49%	45%	43%	57%	51%
	Valor P	0,0008	0,0017	0,005	0,0019	0
	Razón F	7,81	7,35	6,15	8,41	8,9

Por lo tanto, al comparar entre sí los modelos Kc 6, 7, 8 días y Solver (Tabla 6), se observaron similares valores de R². Sin embargo, en la Tabla 6 se observa que el modelo Kc 6 días-SR que las estimaciones de Kc muestran una dispersión (Razón F) mayor que la observada en los demás modelos. Por ello, los modelos seleccionados para el proceso de validación de la escala ELP tuvieron Intervalos de igual longitud de 7, 8 días y Solver.

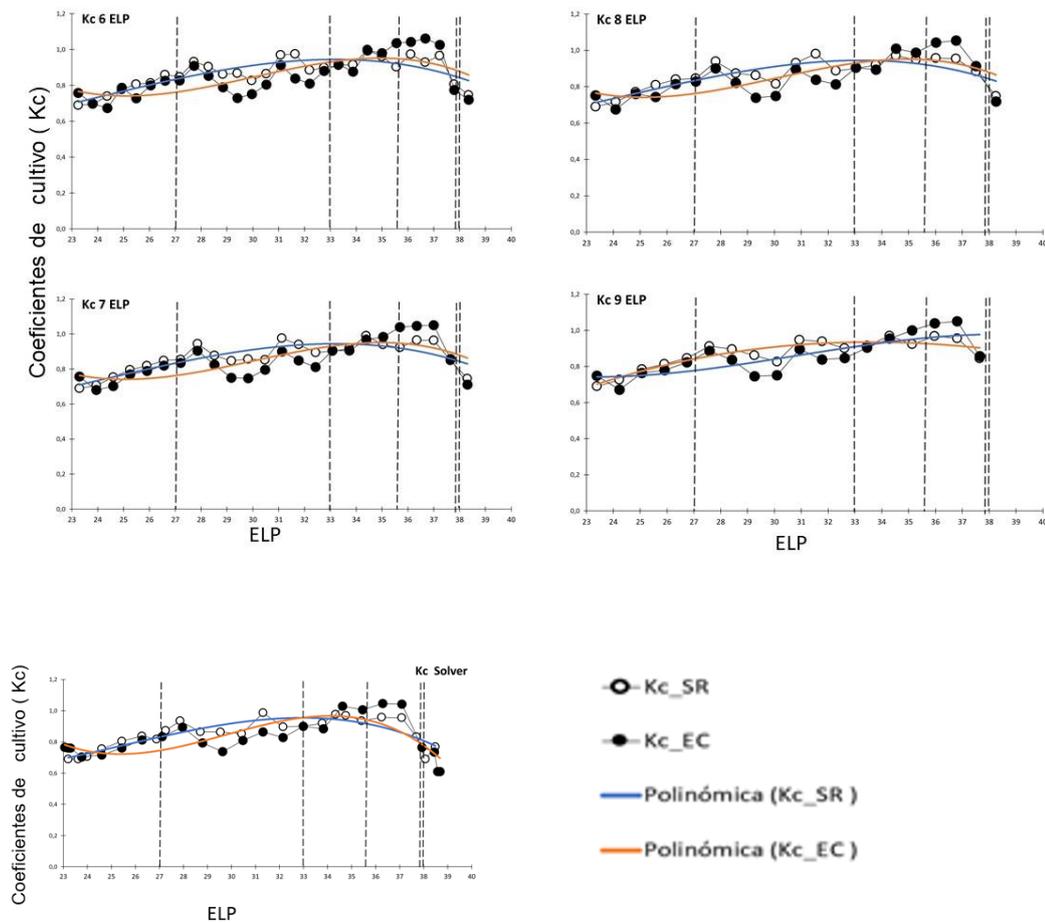


Figura 15 Coeficiente de cultivo (Kc) en función de longitudes de intervalos (días) y Escala Eichhorn and Lorenz (ELP) según el método de estimación de ET (Surface Renewal-SR y Eddy Covariance-EC) con regresión polinomial orden 3. Las líneas discontinuas marcan de izq. a der. Chapoda 1 (ELP 27)–Chapoda 2(EPL33) -Pinta(ELP36) - Cosecha ensayo(ELP38)- Cosecha comercial(EPL38)

5.4 Validación de modelos de estimación de Kc (2019-2020)

El proceso de validación de los modelos seleccionados en la etapa de calibración indicó que los modelos a) ET-SR-DDF - Kc 7 días, b) ET-EC-DDF - Kc 8 días y c) y ET-EC-GDA - Kc 8 días, fueron capaces de predecir los valores de Kc con un MAE = 0,09-0,11; RMSE = 0,1-0,12; dr = 0,74-0,75 y R² = 71%-84% (

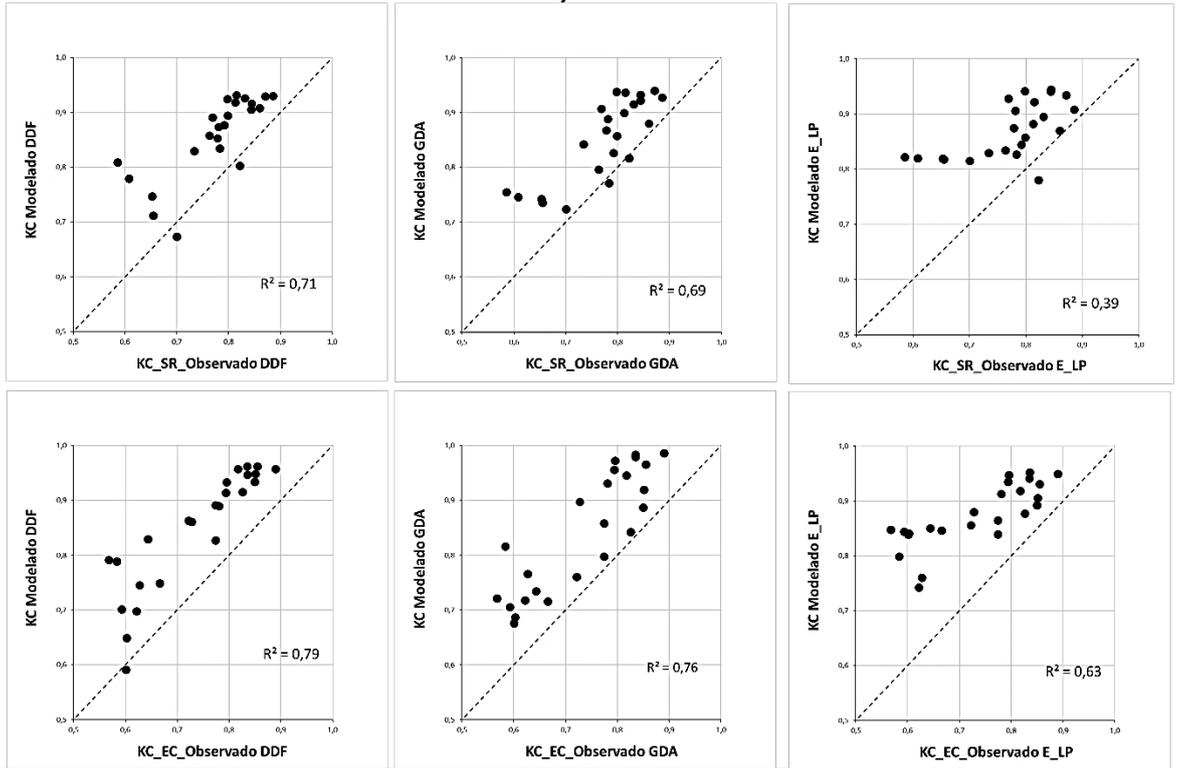
Tabla 7, Figura 16).

Tabla 7 : Media del error absoluto (MAE), error cuadrático medio (RMSE), índice de concordancia (dr) y coeficiente de determinación (R²) de los modelos de predicción de Kc considerando las escalas de monitoreo del crecimiento (días después de floración (DDF), grados días acumulados (GDA) y escala Eichhorn y Lorenz (ELP)), los intervalos de duración y Solver en vides cv Cabernet Sauvignon durante la temporada 2019-2020.

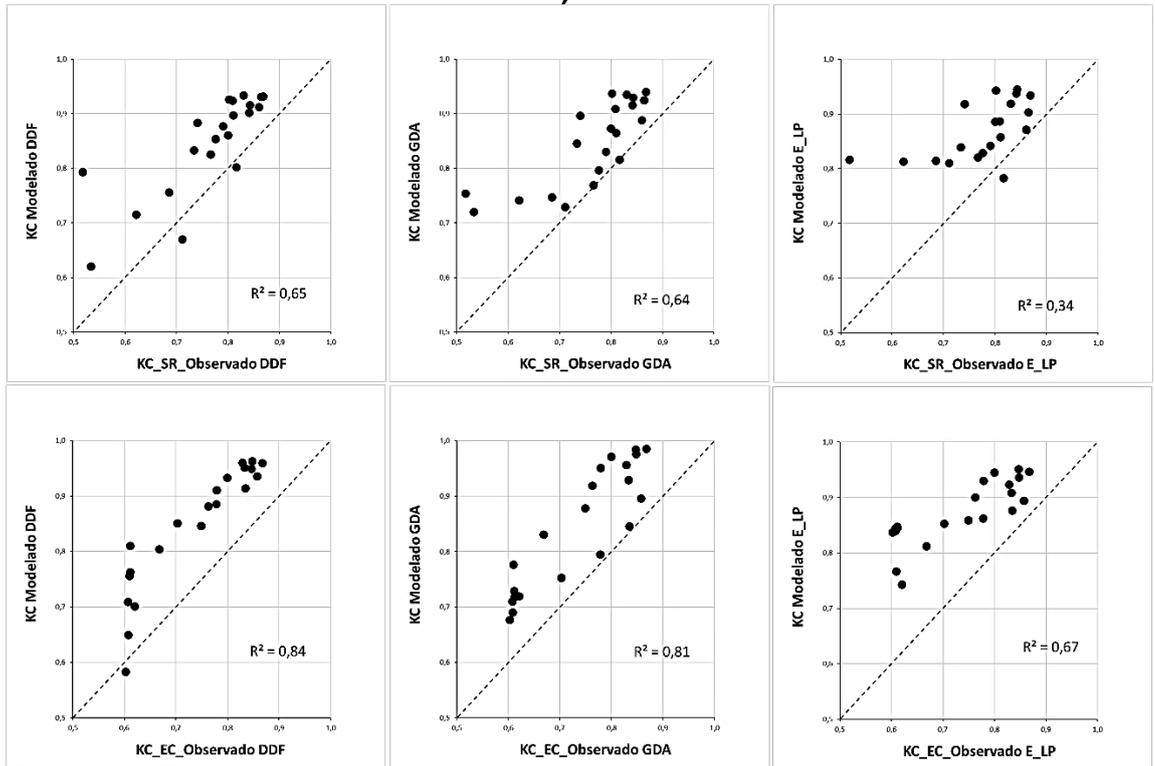
ET	Indicador	Kc 7 días			Kc s 8 días			Kc Solver		
		DDF	GDA	ELP	DDF	GDA	ELP	DDF	GDA	ELP
Surface Renewal	MAE	0.09	0.08	0.11	0.09	0.08	0.11	0.09	0.09	0.1
	RMSE	0.1	0.1	0.13	0.1	0.1	0.13	0.11	0.11	0.13
	dr (%)	74	72	55	75	70	55	61	63	53
	R ² (%)	71	69	39	65	64	37	42	43	31
Eddy Covariance	MAE	0.11	0.11	0.14	0.11	0.11	0.14	0.12	0.11	0.1
	RMSE	0.12	0.12	0.15	0.12	0.12	0.15	0.13	0.13	0.11
	dr (%)	75	74	59	76	75	60	73	71	72
	R ² (%)	79	76	63	84	81	67	79	69	56

Al analizar los resultados de las validaciones de los modelos de estimación de Kc (intervalo de 7 y 8 días) es importante mencionar que tanto los DDF y GDA obtuvieron indicadores de bondad de ajuste similares entre ellos. Pero la escala DDF (R² SR= 71% y R² EC= 84%) muestra resultados superiores en el coeficiente de determinación (R²) a los obtenidos con la escala GDA (R² SR= 69% y R² EC= 81%).

a)



b)



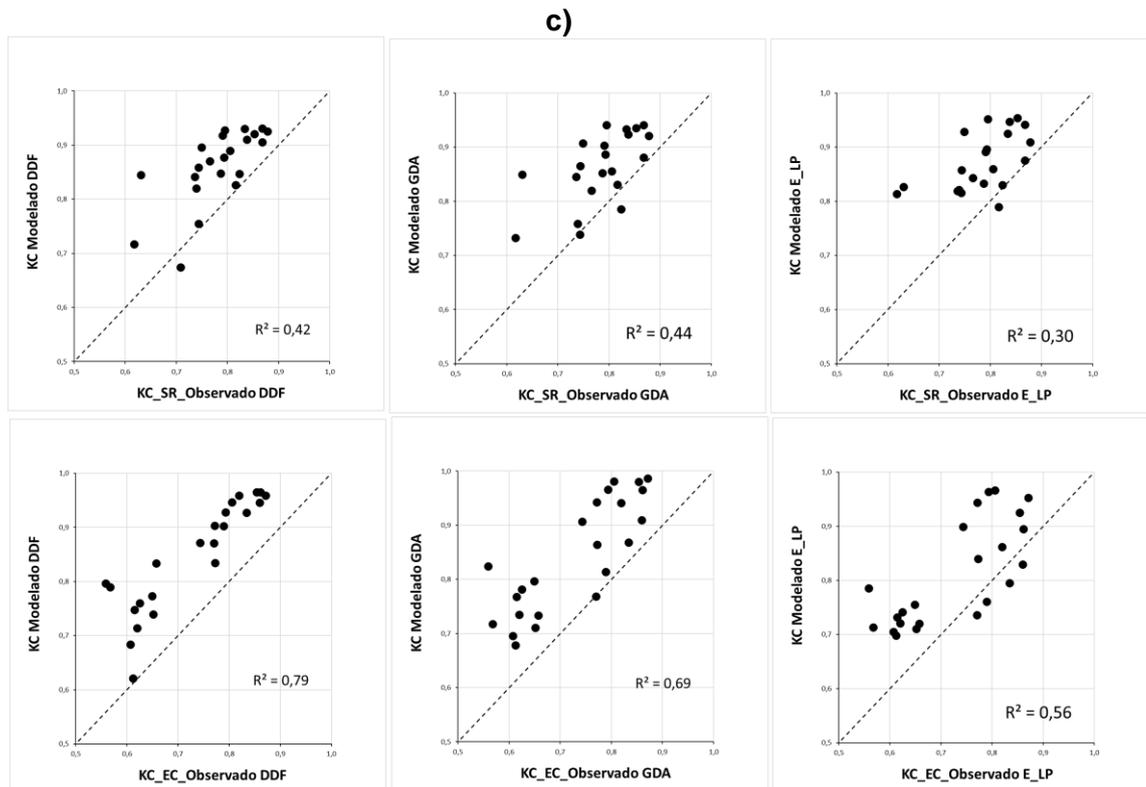


Figura 16 Valores de Kc predichos con modelos y estimados en cada escala de crecimiento y desarrollo (DDF, GDA, ELP) mediante los métodos de estimación de ET Surface Renewal (SR) y Eddy Covariance (EC) considerando: a) intervalos de 7 días, b) 8 días y c) optimización Solver. Periodo 2019-2020.

Respecto a la comparación de las técnicas de estimación de la ET, los resultados de índice de concordancia (dr) y R^2 nos indican que cuando se realizaron las estimaciones con EC, las escalas DDF y DGA tuvieron mejores indicadores EC-GDA - Kc 8 días (dr = 75%, R^2 = 81%) EC-DDF - Kc 8 días (dr = 76%, R^2 = 84%). Hu et al. (2018) recomiendan utilizar el método SR como una herramienta para la estimación del uso de agua y gestión del riego de los viñedos, debido a su concordancia con las mediciones diarias de ETc obtenidas por el método EC durante la temporada de crecimiento. Este estudio igualmente aportó evidencia con las estimaciones de ETc y las mediciones de potencial hídrico y conductancia estomática.

De acuerdo con lo obtenido, es importante enfatizar que el modelo matemático para la estimación de Kc usando el método SR se obtuvo según los resultados de la validación con la escala de crecimiento DDF con intervalo de 7 días. Mientras que el modelo en el tiempo usando el método EC fue con la escala de crecimiento GDA con intervalos de 8 días. Lo mencionado anteriormente genera un interrogante sobre qué modelo tomar como el definitivo para estimar Kc en las aplicaciones futuras. Este estudio buscaba encontrar un modelo usando las estimaciones de SR y lo obtuvo en la escala de crecimiento DDF. Sin embargo, la estimación de la necesidad de agua

de los cultivos mediante el uso de coeficientes a partir de GDA tiene mayor trayectoria que los obtenidos con DDF (López-Urrea et al, 2012). Un estudio similar publicado para *Vitis vinifera* cv Tempranillo demostró que al relacionar los coeficientes de cultivo basal (Kcb) con GDA en un modelo lineal, mejora la precisión de la estimación porque se eliminaron las variaciones de un año a otro en el desarrollo del cultivo (López Urrea et al., 2012).

Existen investigaciones donde se establecieron modelos de Kc en función de una variable de monitoreo del crecimiento en términos de días, por ejemplos como días después de plantación en maíz (Reddy, 2015) o en algodón (Ko et al., 2009). Estos ensayos mencionados poseen una diferencia respecto al nuestro en cuanto a que no dependen del criterio del observador, la fecha de inicio es anualmente en una fecha única de siembra. En nuestro caso la fecha de inicio del modelo DDF se determinó basado en el consenso entre los involucrados del momento en que el Cabernet Sauvignon alcanzó un estado fenológico (80% de la floración, en el mes de noviembre). Tosoni (2021) menciona que el momento óptimo para iniciar mediciones con SR es cuando se tiene presencia de un mayor número de hojas (enero), las cuales proporcionan una estructura en dosel óptima para evaluar los flujos de la superficie objetivo. En nuestro estudio, se observó también que las estimaciones de SR tenían mayor similitud a las estimaciones de EC una vez que fue ejecutada en el viñedo de estudio la segunda chapoda (poda de verano)(Anexo 1). Por lo tanto, pudo ser responsable esta definición de inicio (80% de floración) la responsable de los resultados obtenidos en la validación con estimaciones de ET SR en las distintas escalas de monitoreo. En consecuencia, se rechaza la primera hipótesis que menciona ELP es la variable de mejor desempeño en la calibración y validación del modelo de estimación de Kc basado en las determinaciones de evapotranspiración por el método SR en *Vitis vinifera* cv Cabernet Sauvignon. Se demostró que en base a la estimación de ET con SR en el proceso de calibración y validación fue con la escala DDF (intervalos de cálculo de Kc cada 7 días). La ecuación obtenida fue la siguiente: $Kc = [(0,00421138 * DDF) - (0,000032 * (DDF)^2) + 0,790605]$.

En cuanto a establecer un modelo de estimación de Kc en función de una variable de monitoreo del crecimiento y desarrollo en *Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon. Se determinó que en base a la estimación de ET con EC en el proceso de calibración y validación la escala de crecimiento GDA, (intervalo de cálculo de Kc cada 8 días). La ecuación obtenida es la siguiente: $Kc = [(0,00137407 * GDA) - (0,000000579 * (GDA)^2) + 0,171381]$.

Diferentes autores han utilizado un intervalo único de cálculo de K_c para obtener modelos de estimación de K_c en función de una escala de crecimiento. Por ejemplo, López-Urrea et al. (2012) obtuvieron en lisímetro y con valores de K_c promedios de 5 días (brotación a cosecha), un modelo exponencial entre K_c estimados y días antes de cosecha con R^2 mayores al 90 % en las temporadas evaluadas (2007 a 2009). Shukla et al. (2014) desarrollaron en melón un modelo exponencial entre K_c estimados y días antes de trasplante con promedios de 13 días y R^2 igual a 78 %. En la calibración del modelo en nuestro ensayo, se obtuvieron los menores resultados estadísticos en el proceso de validación (R^2 entre 32% y 79%) al aplicar intervalos de floración a chapoda 1 siguiendo la siguiente secuencia de cálculo: 8-1-1-1-6 e intervalos de 8 días entre chapoda 1 y senescencia (resultados Solver). Por lo tanto, se acepta la segunda hipótesis que menciona que existe un intervalo específico para calcular K_c que permite establecer un modelo de estimación de k_c en función de una variable de crecimiento estable entre temporadas.

6 CONCLUSIONES

- La determinación de la evapotranspiración del cultivo de *Vitis vinífera* cv. Cabernet Sauvignon, a través del método Surface Renewal, resulta satisfactoria al compararlo con el método Eddy Covariance. En este sentido se refuerza lo planteado, La incorporación del surface renewal para realizar la programación de riego permite mantener sin estrés el nivel de estado hídrico del viñedo.
- El modelo basado en las determinaciones de evapotranspiración por el método Surface Renewal en función de la escala de DDF cada 7 días es capaz de predecir con buen desempeño la ocurrencia de los valores de K_c . La ecuación obtenida es la siguiente: $K_c = [(0,00421138 * DDF) - (0,000032 * (DDF^2) + 0,790605]$.
- El modelo basado en las determinaciones de evapotranspiración por el método Eddy Covariance en función de la escala de GDA (método Seno simple y cada 8 días) es capaz de predecir con buen desempeño la ocurrencia de los valores de K_c . La ecuación obtenida es la siguiente: $K_c = [(0,00137407 * GDA) - (0,000000579 * (GDA^2) + 0,171381]$.

7 PERPECTIVAS FUTURAS

- En futuros ensayos, considerando como punto de partida la segunda chapoda, se podrían mejorar la estimación de la evapotranspiración del cultivo por Surface Renewal y los ajustes de los modelos de Kc en función de la escala ELP.
- En futuros proyectos de investigación, sería importante evaluar la ubicación de la termocupla (50 cm por encima del dosel) y elevarla periódicamente a medida que crece el follaje, ya que podría acercar las estimaciones de Surface Renewal a las de Eddy Covariance desde floración hasta la segunda chapoda.

8 BIBLIOGRAFIA

- Acevedo-Opazo, C., Ortega-Farias, S., & Fuentes, S. (2010). "Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation," *Agricultural Water Management*, Elsevier, 97(7), 956-964.
- Agam, N., Kustas, W., Alfieri, J., GaoF, McKeeLM, Prueger, J., & Hipps, L. (2019). Micro-scale spatial variability in soil heat flux (SHF) in a wine-grape vineyard. *Irrig Sci*, 37, 253–268. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00634-6>
- Allen, R., L. Pereira, D., & Smith, R. y. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO, Riego y Drenaje 56, Roma.
- Amendola, E. (2018). Temperatura de superficie e coeficientes de cultura dos citros irrigados por diferentes sistemas. Tesis de Maestría, Universidad Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Faculdade de Engenharia., Ilha Solteira.
- BalbontínNesvara, C., Calera-Belmonte, A., González-Piqueras, J., Campos-Rodríguez, I., López-González, M. L., & Torres-Prieto, E. (2011). Comparación de los sistemas covarianza y relación de Bowen en la evapotranspiración de un viñedo bajo clima semi-árido. *Agrociencia*, 45 (1), 87-103.
- Baskerville, G., & Emin, P. (1969). Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures. *Ecology*, 50, 514–517.
- Bautista-Capetillo, C., Zavala, M., & Martínez-Cob, A. (2013). Using thermal units for crop coefficient estimation and irrigation scheduling improves yield and water productivity of corn (*Zea mays* l.). *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139, 214–220. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000529](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000529)
- Burba, G. (2013). *Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: A Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates*. Lincoln: Li-Cor Biosciences.
- Buttrose, M., & Hale, C. (1973). Effect of temperature on development of the grapevine inflorescence after bud burst. *Am. J. Enol. Vitic.*, 24, 14-16.
- Campos, I., Neale, C., Calera, A., & Balbontín, C. (2010). Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management*, 98, 45-54.
- Caffarra, A., Eccel, E., 2011. Projecting the impacts of climate change on the phenology of grapevine in a mountain area. *Aust. J. Grape Wine Res.* 17, 52–61.
- Casassa, L., Keller, M., & Harbertson, J. (2015). Regulated Deficit Irrigation Alters Anthocyanins, Tannins and Sensory Properties of Cabernet Sauvignon Grapes and Wines. *Molecules*, 20(5), 7820-7844.

- Castellví, F., & Snyder, R. (2010). Una comparación entre los flujos de calor latente sobre el césped utilizando un lisímetro de pesaje y un análisis de renovación de la superficie. *Diario de hidrología*, 381(3-4), 213-220.
- Chow. G.C. (1983). *Econometric Methods*, McGraw-Hill, New York
- Coombe, B. (1995). Growth stages of the grapevine: adoption of a system for identifying grapevine growth stages. *Aust. J. Grape Wine Res*, 1, 104–110.
- Dirección general de Agua (DGA) . : Mapa porcentual de acumulación de agua de los embalses de Chile en octubre 2021. Mes de junio <https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/InformacionMensual/Boletin03Marzo2020.pdf>
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper No. 24, Roma. Italy.
- Eichhorn, K., & Lorenz, D. (1977). , 1977. Phanologische Entwicklungsstadien der Rebe Nachrichtenblatt des Dtsch. Pflanzenschutzdienstes, 29, 119-120.
- Farreras, V., Lauro, C., Vaccarino, E., & Abraham, L. (2022). *Políticas de Gestión de los Recursos Hídricos. Un Enfoque Hidrológico y Económico en el Oasis Norte de Mendoza*. Documento de trabajo Nro. 56.
- Fila, G., Gardiman, M., Belvini, P., Meggio, F., Pitacco, A., 2014. A comparison of different modelling solutions for studying grapevine phenology under present and future climate scenarios. *Agric. For. Meteorol.* 195–196, 192–205.
- Hochberg, U., Hochberg, U., Rockwell, F., & Holbrook, N. (2017). Iso / Anisohdry : A Plant – Environment Interaction Rather Than a Simple Hydraulic Iso / Anisohdry : A Plant Environment Interaction than a Simple Hydraulic Trait. *Trends in Plant Science, December*.
- Hsiao, T. (1990). *Measurements of plant water status. In Irrigation of agricultural crops*. Madison: B.A. Stewart, and D.R. Nielsen, eds. ASA, CSSA, SSSA.
- Hu, Y., Buttar, N. A., Tanny, J., Snyder, R. L., Savage, M. J., & Lakhari, I. A. (2018). Surface renewal application for estimating evapotranspiration: A review. *Advances in Meteorology*. 1-11. <https://doi.org/10.1155/2018/1690714>
- Hugalde, I., & Vila, H. (2014). Comportamiento isohídrico o anisohídrico en vides...: ¿Una controversia sin fin? *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*. 40(1), 75-82. Recuperado el 18 de 6 de 2021, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1669-23142014000100012&lng=es&tIng=es
- Hyvönen, E., & Pascale, S. (1999). A New Basis for Spreadsheet Computing: Interval Solver for Microsoft Excel. *AI Mag*, 21, 83-92.
- Ko, J., Piccinni, G., Marek, T., & Howell, T. (2009). Determination of growth-stage-specific crop coefficients (Kc) of cotton and wheat. *Agricultural Water Management*, 96(12), 1691–1697. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.06.023>

- Köppen, W. (1948) *Climatología Com un estudio de los climas de la tierra*. Fondo de Cultura Económica, México, 479 p.
- Lazzara, P., & Rana, G. (2010). The use of crop coefficient approach to estimate actual evapotranspiration: A critical review for major crops under Mediterranean climate. *Italian Journal of Agrometeorology*, 2, 25.
- López-Urrea, R., Montoro, A. M., F., L.-F. P., & Fereres, E. (2012). Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements of mature 'Tempranillo' wine grapes. *Agricultural Water Management*, 112, 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.05.009>
- McElrone, A., Shapland, T., Calderon, A., Fitzmaurice, L., Kyaw Tha, P. U., & Snyder, R.L. (2013). Surface renewal: an advanced micrometeorological method for measuring and processing field-scale energy flux density data. *Journal of Visualized Experiments* (82): 50666. <https://doi:10.3791/50666>
- Medeiros, G., Daniel, L., & Fengler, F. (2016). Growth, development, and water consumption of irrigated bean crop related to growing degree-days on different soil tillage systems in southeast Brazil. *International Journal of Agronomy*, 2016, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2016/8065985>
- Medrano, H., Tomas, M., Martorell, S., Escalona, J.-M., Pou, A., Fuentes, S., Flexas, J., Bota, J., 2014. Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 499–517.
- Myburgh, P. (1998). *Water consumption of South African vineyards: a modelling approach based on the quantified combined effects of selected viticultural, soil and meteorological parameters*. PhD Thesis, Stellenbosch University, Private Bag X1, Matieland 7.
- Ojeda, H. (2007). Riego cualitativo de precisión en la vid. *Revista Enología*, 1, 14-17.
- Ojeda, H., Andary, C., Kraeva, E., Carbonneau, A., & Deloire, A. (2002). Influencia del déficit hídrico antes y después del envero sobre la síntesis y concentración de compuestos fenólicos de la piel durante el crecimiento de la baya de *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *Revista americana de enología y viticultura*, 53(4), 261-267.
- Ortega-Farias, S., & Riveros-Burgos, C. (2019). Modeling phenology of four grapevine cultivars (*Vitis vinifera* L.) in Mediterranean climate conditions. *Scientia Horticulturae*, 250, 38-44. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.025>
- Ortega-Farias, S., Carrasco, M., Oliosio, A., Acevedo, C., & Poblete, C. (2006). Latent heat flux over Cabernet Sauvignon vineyard using the Shuttleworth and Wallace model. *Irrigation Science*, 25(2), 161-170. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0047-7>
- Parker, A.K., García de Cortázar-Atauri, I., Van Leeuwen, C., Chuine, I., 2011. General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L. *Aust. J. Grape Wine Res.* 17, 206–216.
- Parry, C., Kustas, W., Knipper, K., Anderson, M., Alfieri, J., Prueger, J., & McElrone, A. (2019). Comparison of vineyard evapotranspiration estimates from surface renewal using measured and modelled energy balance components in the

GGRAPEX project. *Irrigation Science*, 37(3), 333–343.
<https://doi.org/10.1007/s00271-018-00618-y>

- Paw U, K. T., Snyder, R. L., Spano, D., and Su, H. B. 2005. "Surface renewal estimates of scalar exchange." *Micrometeorology in agricultural systems*, J. L. Hatfield, and J. M. Baker, eds., ASA Monograph No. 47, ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wis., 455–483 (16)
- Poblete-Echeverría, C. S.-R., & Ortega-Farías, S. (2017). Grapevine crop coefficient (Kc) determined by surface renewal method at different phenological periods. *Acta Hortic.*, 61-66. <https://doi:10.17660/ActaHortic.2017.1150.9>
- Poblete-Echeverría, C., Sepúlveda-Reyes, D., & Ortega-Farías, S. (2014). Effect of height and time lag on the estimation of sensible heat flux over a drip-irrigated vineyard using the surface renewal (SR) method across distinct phenological stages. *Agricultural Water Management*, 141, 74-83.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.006>
- Pszczółkowski Philippo y Gonzalo F. Gil. *Viticultura. Fundamentos para optimizar producción y calidad*. Santiago de Chile, Ediciones Universidad Católica de Chile, 2015. 670 páginas. ISBN 978-956-14-1609-3
- Reddy, K. (2015). Development of crop coefficient models of castor and maize crops. *European Journal of Agronomy*, 69, 59-62.
- Rosa, R., & Tanny, J. (2015). Surface renewal and eddy covariance measurements of sensible and latent heat fluxes of cotton during two growing seasons. *Biosystems Engineering*, 136, 149–161.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.05.012>
- SAG (2019). *Catastro Vitícola Nacional*. Ministerio de Agricultura. Santiago de Chile: Servicio agrícola y Ganadero (SAG) División de Protección Agrícola y Forestal. Recuperado el 21/5/2021. <https://www.sag.gob.cl/noticias/sag-presenta-catastro-viticola-nacional-2019>
- Sanchez-Elez Martin, S. 2015. Estudio de los efectos en el viñedo de la modificación del déficit hídrico continuo en los periodos anterior y posterior al envero (cv. Cabernet Sauvignon; *Vitis vinifera* L.) (Doctoral dissertation, Agronomos). Universidad Politécnica de Madrid, UPM, Madrid. España.
- Scholander, P. F., Bradstreet, E. D., Hemmingsen, E. A., & Hammel, H. T. (1965). Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science*, 148 (3668), 339-346. <https://doi.org/10.1126/science.148.3668.339>
- Shapland, T., McElrone, A., Snyder, R., & Paw, U. (2013). Structure function analysis of two-scale scalar ramps. Part I: Theory and modeling. *Boundary Layer Meteorology*.
- Shukla, S., Shrestha, N., Jaber, F., Srivastava, S., Obreza, T., & Boman, B. (2014). Evapotranspiration and crop coefficient for watermelon grown under plastic

- mulched conditions in sub-tropical Florida. *Agricultural Water Management* (132), 1-9.
- Stein, T., Carvalho, I. R., Zocche, R. G. S., Jacobs, S. A., Szarecki, V. J., Zocche, F., ... Souza, V. Q. de. (2018). Climatic Variables and Their Effects on Phenolic Maturation and Potassium Uptake in Cabernet Sauvignon Wines. *Journal of Agricultural Science*, 10(8), 388. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n8p388>
- Suvočarev, K., Castellví, F., Reba, M. L., & Runkle, B. R. (2019). Surface renewal measurements of H, λE and CO2 fluxes over two different agricultural systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107763>
- Tosoni, D., Meza, F., & Lacy, S. (2021). Independent estimation of sensible and latent fluxes in a vineyard using improved surface renewal analysis. *Theor Appl Climatol*, 144, 1375–1385. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03612-1>
- Van Atta, C. W.: 1977b, 'Coherent Structure Ramp Models for Structure Functions of Temperature in Turbulent Shear Flows', in H. Fiedler (ed.), *Lecture Notes in Physics — Structure and Mechanisms of Turbulence II*, Proc. Symp. on Turbulence, Berlin, 138–153.
- Verdugo-Vasquez, N., Panitrur-De la Fuente, C., & Ortega-Farías, S. (2017). Model development to predict phenological scale of table grapes (cvs. Thompson, crimson and superior seedless and red globe) using growing degree days. *OENO One*, 51, 277–288.
- Vila, H., Peña, J., & Cavagnaro, J. (2009). Evitación del estrés en la vid: estrategias varietales frente al déficit hídrico. *V Jornadas de actualización en riego y fertirriego: "Agricultura de regadío y adaptación al cambio climático: desafío para una producción sostenible de calidad"*. FCA, UNCuyo, Mendoza, Argentina. <https://www.ina.gov.ar/cra/index.php?seccion=11>
- Vita Serman, F. & Pringles, O. (2011). Water requirement of vitis vinifera L. "Syrah" grown in a warm region: Crop coefficient (Kc) estimations. *Acta Horticulturae*, 889, 91-98. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.889.8>
- Williams, L. E., & Trout, T. (2005). Relationships among vine- and soil-based measures of water status in a Thompson Seedless vineyard in response to high-frequency drip irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture*, 56(4), 357–366.
- Williams, L., & Ayars, J. (2005). Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy.
- Zapata, D., Salazar, M., Chaves, B., Keller, M., Hoogenboom, G., 2015. Estimation of the base temperature and growth phase duration in terms of thermal time for four grapevine cultivars. *Int. J. Biometeorol.* 1–11.
- Agricultural and Forest Meteorology*, 132(3), 201-211. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.07.010>
- Zúñiga, M., Ortega-Farías, S., Fuentes, S., Riveros-Burgos, C., & Poblete-Echeverría, C. (2018). Effects of three irrigation strategies on gas exchange

relationships, plant water status, yield components and water productivity on grafted carménère grapevines. *Frontiers in Plant Science*, 9 (july), 1-13.

9 ANEXOS

Anexo 1: Evolución de las estimaciones diarias de evapotranspiración del cultivo (ET) a través de Surface Renewal (SR) y Eddy Covariance (EC) en las temporadas 2018/2019 y 2019/2020. Las líneas discontinuas marcan de izq. a der.: Floración, Chapoda 1, chapoda 2 ,pinta , Cosecha ensayo , Cosecha comercial

