

estación experimental



MODELO SIMPLIFICADO DE ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES DE CALEFACCIÓN EN INVERNADEROS TIPO 'PARRAL'.

LÓPEZ HERNÁNDEZ, J. C.
BAILLE, A.
GONZÁLEZ REAL, M. M.
GÁZQUEZ GARRIDO, J. C.
PÉREZ-PARRA, J.

2º Congreso Nacional de Agroingeniería
Córdoba, 24 al 27 septiembre 2003
Resumen. Pág. 241-242

Modelo simplificado de estimación de las necesidades de calefacción en invernaderos de tipo “parral”

J.C. López, A. Baille¹, M. M. González-Real¹, J. Pérez-Parra

Estación Experimental de CAJAMAR “Las Palmerillas”. Autovía del Mediterráneo, km 419, 04710, El Ejido, Almería. Tel.950580548 Fax. 950580450 . jclh@cajamar.es

⁽¹⁾ *Universidad Politécnica de Cartagena. ETSIA, Paseo Alfonso XIII, 52, 30202 Cartagena*

Resumen

En un invernadero parral, ubicado en el Sureste español (Almería), se llevaron a cabo medidas de consumo energético durante cuatro periodos de calefacción (1997-2001), utilizando un sistema de calefacción por aire caliente con caldera alimentada por gas propano. Se han utilizado los valores diarios de consumo energético (Q , MJ m⁻² d⁻¹), medidos en 5 módulos idénticos mantenidos con diferentes niveles de temperatura de consigna del aire (T_c), y los valores mínimos de temperatura exterior durante 24h (T_o) para establecer relaciones entre Q y la diferencia ΔT ($= T_c - T_o$) con los datos del invierno 1998-1999. Las diferentes relaciones lineales entre Q y ΔT establecidas para cada nivel de T_c han dado resultados satisfactorios (r^2 entre 0.75 y 0.83), considerando que el único dato entrada del modelo es T_o . Cuando se tratan los datos de esta campaña de forma conjunta para los diferentes niveles de T_c la relación entre Q y ΔT es curvilínea, ajustándose a un polinomio de segundo orden: $Q = 0,049 \Delta T^2 - 0,001 \Delta T + 1,107$, $r^2 = 0.89$. La validación de este modelo, con los datos de las otras tres campañas, dio resultados satisfactorios a escala diaria ($r^2 = 0.95$), de una década ($r^2 = 0.95$) y anual ($r^2 = 0.99$). Este modelo sencillo puede ser interesante para agricultores como ayuda en la toma de decisiones, en invernaderos con calefacción, acerca del nivel de temperatura de consigna o del periodo de cultivo.

Palabras Clave: Consumo energético, calefacción, modelo, invernadero

Abstract. A simplified model for estimating heating requirements in parral greenhouses. Measurements of heat consumption in a typical parral-type greenhouse, equipped with an air-heated system using propane, were carried out along four heating seasons (1997-2001) in Southern Spain (Almería). From daily values of heat consumption (Q , MJ m⁻² d⁻¹) recorded under five identical compartments heated at different temperature set-points (T_c), and data of 24h minimum outside air temperature (T_o), relationships between Q and the temperature difference ΔT ($= T_c - T_o$) were established using only the data of the winter 1998-99. Lineal regressions between Q and ΔT for different levels of T_c gave satisfactory fits (r^2 ranging from 0.75 to 0.83) considering that T_o was the only input data of the model. When the data of this year for different values of T_c were pooled together, the correlation was curvilinear, the best fit to a 2nd order polynomial being $Q = 0,049 \Delta T^2 - 0,001 \Delta T + 1,107$, $r^2 = 0.89$. Validation of this model was performed using the data measured along the three other heating seasons, giving a fair agreement at daily ($r^2 = 0.86$), decadal ($r^2 = 0.95$) and yearly ($r^2 = 0.99$) time scale. This simple model could be of interest to growers for decision-making related to the choice of set-point temperature or the crop planning in heated greenhouses.

Keywords: Heat consumption, heating systems, decision making

1. Introducción

Existe una gran cantidad de estudios e información acerca de la calefacción de invernaderos en los países del Norte de Europa, donde este medio de climatización es comúnmente utilizado (Baille, 1999a). La bibliografía sobre este aspecto es muy abundante, sobre todo durante los años 70 y 80, cuando tuvieron lugar las llamadas “crisis del petróleo” (Baille y von Elsner, 1989, González-Real y Baille, 2001). No se puede decir lo mismo acerca de los estudios de calefacción en los invernaderos típicos de los países del entorno del Mediterráneo (Pérez-Parra, 1998; Baille, 1999b). Existen hoy en día pocos estudios cuantitativos sobre los consumos de calefacción de invernaderos en el Sudeste español, lo que impide llevar a cabo una evaluación realista del coste y, por consiguiente, del interés económico de la calefacción en esta zona (López y col., 2001). El estudio que se presenta tiene como objetivo analizar y modelizar el consumo de energía a partir de medidas obtenidas en invernaderos tipo “parral”.

2. Material y Métodos

Las medidas se realizaron en 6 módulos idénticos de un invernadero tipo parral asimétrico, orientado E-O con una superficie de 432 m² (Figura 1), debidamente aislado y ubicado en la Estación Experimental “Las Palmerillas” (latitud: 36° 47’ N, longitud: 2° 43’ O). Cada módulo tenía una temperatura de consigna (T_c) de calefacción diferente (entre 12 °C y 15 °C). El sistema de calefacción utilizado era por aire caliente (tipo “cañón”) con caldera alimentada por gas propano. Los consumos diarios de gas se registraron en cada módulo con contadores de gas individuales. Las temperaturas en el exterior y dentro de cada módulo se midieron con sensores conectados a un ordenador de climatización. El cultivo, durante los diferentes años de ensayos, fue la judía. En total, se realizaron cuatro campañas completas (1997-2001) de medida de calefacción. Para identificar los parámetros del modelo de estimación del consumo energético de la calefacción, se han utilizado los datos de la campaña 1998-99. El análisis de calidad de las predicciones del modelo se hizo con los datos de consumo de los otros tres años.

3. Resultados y discusión

3.1. Calibración del modelo

A partir de los valores diarios de consumo energético (Q, MJ m⁻² d⁻¹) y de los datos de temperatura mínima exterior (T_o), obtenidos durante el invierno 98-99, se han estudiado las relaciones entre Q y el salto térmico máximo ΔT (= T_c – T_o). Cuando se considera cada temperatura de consigna de forma independiente, las correlaciones entre Q y ΔT son lineales, con valores de r² variando de 0.75 a 0.83. Cuando se analizan en conjunto las diferentes temperaturas de consigna, T_c, la relación es ligeramente curvilínea:

$$Q = 0,050 \Delta T^2 - 0,001 \Delta T + 1,107 \quad (r^2 = 0,89) \quad (1)$$

Con una regresión lineal, se obtiene:

$$Q = 0,6053 \Delta T - 0,660 \quad (r^2 = 0,87) \quad (2)$$

Este resultado es bastante satisfactorio, teniendo en cuenta que la temperatura mínima exterior es la única variable de entrada para predecir el consumo energético. La Figura 3

presenta la comparación entre los valores medidos y estimados con la relación (1) del consumo acumulado en función del tiempo a lo largo del ciclo de invierno 98-99, para las temperaturas de consigna de 14 °C y 12 °C. Se observa que, para ambas temperaturas, el modelo da valores acumulados de Q cercanos de los valores medidos:

$$\begin{aligned} \text{para } T_c = 14 \text{ }^\circ\text{C} & \quad Q_{\text{medido}} = 257 \text{ MJ m}^{-2}; & \quad Q_{\text{modelo}} = 256 \text{ MJ m}^{-2} \\ \text{para } T_c = 12 \text{ }^\circ\text{C} & \quad Q_{\text{medido}} = 119 \text{ MJ m}^{-2}; & \quad Q_{\text{modelo}} = 122 \text{ MJ m}^{-2} \end{aligned}$$



Figura 1. Invernadero parral asimétrico donde tuvieron lugar los ensayos de calefacción

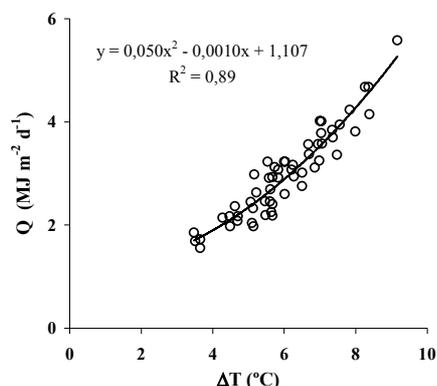


Figura 2. Correlación entre consumo energético diario (Q) y salto térmico ΔT para todas las temperaturas consigna T_c (1998-99)

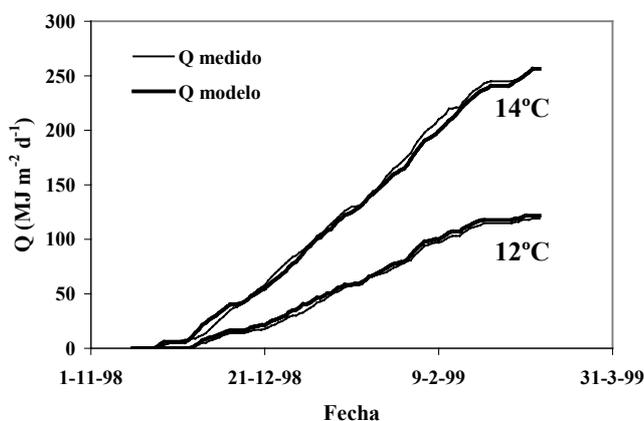


Figura 3. Consumo acumulado medido y calculado por el modelo durante el ciclo de invierno 98-99 para temperaturas de consigna de 14 °C y 12 °C.

Además de este modelo, también se analizaron los datos utilizando el salto térmico medio como la diferencia entre temperatura media nocturna en el interior y en el exterior, $\Delta T_m (= T_{i,m} - T_{o,m})$. La regresión lineal obtenida fue:

$$Q \text{ (W m}^{-2}\text{)} = 8.09 \Delta T_m \quad \text{con } r^2 = 0,88 \quad (3)$$

El valor del coeficiente de determinación ($r^2 = 0.88$) indica que con el salto térmico medio, ΔT_m , no se alcanza una mejor descripción de los consumos que con el salto térmico máximo, ΔT (ecuación 1, $r^2 = 0.89$).

3.2. Validación del modelo

Hay que señalar que los valores de temperatura mínima exterior del invierno utilizado para calibrar el modelo (98-99), fueron similares a los de un invierno medio en la zona de Almería, mientras que el invierno 97-98 fue bastante más suave y el invierno 1999-2000 se caracterizó por presentar, durante los meses de febrero y marzo, valores de temperatura mínima mucho más bajos que los que se registran en la zona. La aplicación del modelo a estos dos años se presenta en lo que sigue.

Campaña 1997-98

La Figura 4 muestra la comparación entre valores medidos y estimados con la ecn. 1 del consumo acumulado, Q (MJ m^{-2}) para $T_c = 15^\circ\text{C}$ y 12°C . Se observa que el modelo estima correctamente la evolución de la demanda energética a lo largo del ciclo. Al final del ciclo, el valor estimado de energía acumulada para $T_c = 15^\circ\text{C}$ fue de 204 MJ m^{-2} frente a un valor medido de 209 MJ m^{-2} . Para $T_c = 12^\circ\text{C}$, el valor estimado fue de 51 MJ m^{-2} y el medido 59 MJ m^{-2} .

Campaña 1999-2000

La Figura 5 presenta la comparación entre los valores medidos y estimados con la ecn. 1 del consumo acumulado, Q (MJ m^{-2}) para $T_c = 15^\circ\text{C}$ durante la fase vegetativa del cultivo (Enero), y durante el período posterior en el que T_c se mantuvo a 12°C (Febrero-Marzo). Se observa también una buena concordancia entre los valores medidos y los estimados por el modelo. Al final del ciclo, el valor estimado de energía acumulada fue de 253 MJ m^{-2} frente a un valor medido de 246 MJ m^{-2} .

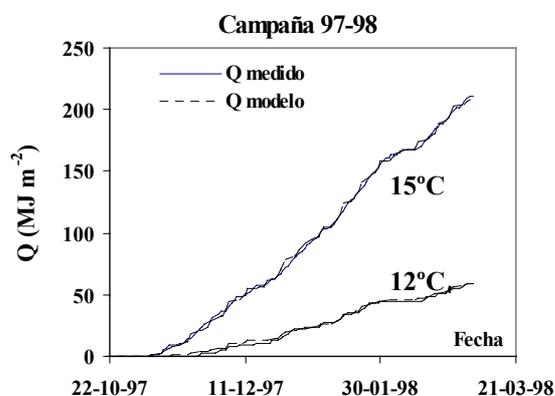


Figura 4. Consumo acumulado medido y calculado por el modelo durante el ciclo de invierno 1997-98 para temperaturas de consigna de 15°C y 12°C .

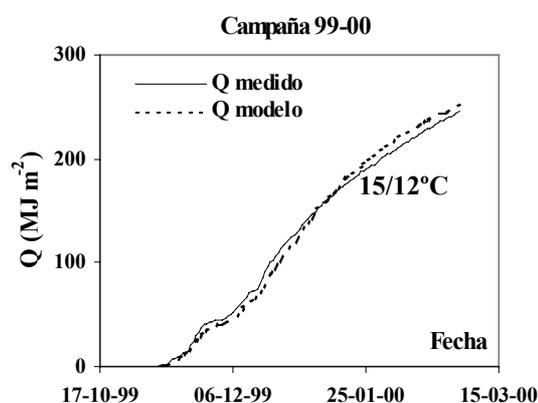


Figura 5. Consumo acumulado medido y calculado por el modelo durante el ciclo de invierno 1999-2000 para una temperatura de consigna de $15^\circ\text{C}/12^\circ\text{C}$.

Para evaluar la precisión del modelo, se ha realizado, con el conjunto de los datos obtenidos en las cuatro campañas, un análisis de los valores de Q a tres escalas: diaria (Figura 6.a), acumulada sobre 10 días (década, Figura 6b) y acumulada hasta el final del ciclo. Las regresiones lineales entre valores medidos y observados son las siguientes:

- a escala diaria:

$$Q_{\text{estimado}} = 0.98 Q_{\text{medido}} + 0.175 \quad (r^2 = 0.89)$$

- a escala de la década:

$$Q_{\text{estimado}} = 0.95 Q_{\text{medido}} + 0.60 \quad (r^2 = 0.96)$$

- a escala del ciclo de cultivo:

$$Q_{\text{estimado}} = 0.97 Q_{\text{medido}} + 3.2 \quad (r^2 = 0.99)$$

Se observa que la pendiente de las relaciones es próxima a la unidad (0.98, 0.95 y 0.97, respectivamente, para la escala diaria, de la década y del ciclo) y que las rectas pasan muy cerca del origen en los tres casos, lo que indica que la calidad del modelo es buena.

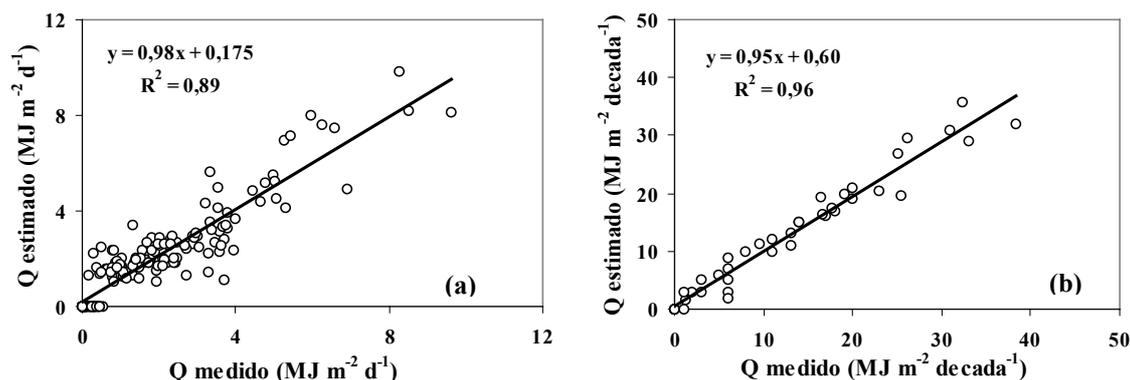


Figura 6. Comparación entre valores medidos del consumo (inviernos 97-98, 99-2000 y 2000-01) y valores estimados por el modelo, Q_{estimado} (a) a escala diaria y (b) de la década.

4. Conclusión

En este estudio se ha relacionado el consumo energético medido en invernaderos parral, durante varios años y con diferentes temperaturas de consigna (T_c entre 12°C y 15° C), con la temperatura mínima diaria exterior. El conjunto de los resultados se ha podido describir con una relación única, (Ecuación 1, Figura 1). El análisis de estos resultados sugiere que el modelo propuesto, para estimar los consumos de calefacción en la zona de Almería en función de la temperatura mínima diaria, permite describir de manera realista la demanda energética del invernadero (Figuras 3 a 6) durante inviernos con temperaturas más suaves (1997-98) o inferiores (1999-2000) a las que se registran en la zona durante un invierno medio. Además, es un modelo muy sencillo y práctico, ya que solamente necesita, como dato de entrada, la temperatura mínima diaria exterior, variable de fácil acceso y que se mide corrientemente en todas las estaciones climáticas. La limitación que presenta es inherente a todos los modelos empíricos utilizados para predecir los consumos energéticos de invernaderos, debido a que no pueden extrapolarse a zonas con condiciones climáticas muy diferentes de las del Levante español, ni tampoco a invernaderos parral de características diferentes a las del utilizado en este estudio.

Este tipo de modelos puede aplicarse en la optimización de estrategias de calefacción en la producción bajo invernadero en el Sur de España (Baille y González-Real, 2001), ya que permite estimar el coste de calefacción en función de la fecha de plantación y de la temperatura de consigna elegida. Comparando este coste con una estimación de los beneficios derivados de un aumento o de una mejora de la calidad de la producción

(López y col., 2002), se podría recomendar la estrategia que permite maximizar la diferencia entre beneficios y costes adicionales inducidos por la calefacción.

4. Referencias

1. A. Baille, *Energy Cycle, The Greenhouse Ecosystem*. Enoch and Stanhill Eds. Elsevier, Chapter XI, (1999a), p. 265
2. A. Baille, *Greenhouse structure and equipment for improving crop production in mild winter climates, Acta Horticulturae, Vol. 491 (1999b) p. 37*
3. A. Baille y B. Von Elsner. *Energy conservation and Renewable Energies for Greenhouse Heating*". REUR Technical Series n° 3, FAO, Chapter 11 (1998)
4. A. Baille y M.M. González-Real. *Utilización de Modelos para el control y la ayuda a la decisión en invernaderos. "Incorporación de Tecnología al Invernadero Mediterráneo"*, Ed. Cajamar, (2001) p. 73
5. M.M. González-Real y A. Baille. *La calefacción de invernadero, Tecnología de Invernaderos II*. J. Pérez Parra, M. Cuadrado Gómez Ed., F.I.A.P.A. Almería, (1998) p. 339
6. J.C. López y col., *Balance energético y necesidades de calefacción en invernaderos tipo "parral" en la región de Almería, Actas del Iº Congreso Nacional de Agro-Ingeniería, Comunicación n° AG01 0708, Valencia, España (2001)*
7. J.C. López y col. *Effect of heating strategy on earliness and yield of snap beans (Phaseolus vulgaris L.) grown under parral plastic greenhouses. International ISHS Symposium "Product and process innovation for protected cultivation in mild-winter climates", Ragusa, Italia (2002)*
8. J. Pérez-Parra, *Invernadero Parral Almería y su evolución, Tecnología de Invernaderos II*". J. Pérez Parra, M. Cuadrado Gómez Ed., F.I.A.P.A. Almería (1998) p. 193