

## Eficiencia en el uso del agua y la energía en una instalación de enfriamiento evaporativo en un invernadero con cultivo de cáñamo (*Cannabis sativa* L.)

S. Pardo-Pina<sup>1</sup>, F.J. Ferrández-Pastor<sup>2</sup>, M. Carvajal<sup>3</sup> y J.M. Cámara-Zapata<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigación en Innovación Agroalimentaria y Agroambiental, CIAGRO, Universidad Miguel Hernández, Ctra de Beniel, s/n, 03312, Orihuela, Alicante, España.

<sup>2</sup> Grupo I2RC, EPS Universidad de Alicante, Carretera San Vicente s/n 03690, Alicante, España.

<sup>3</sup> Departamento de Nutrición Vegetal, Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS, CSIC), Campus Universitario de Espinardo, Edificio 25, 30100 Murcia

### Introducción

La producción de cultivos de elevado valor añadido, como el cáñamo (*Cannabis sativa*, L.), requiere cultivar en invernadero para conseguir un adecuado control del clima y la fertirrigación. El incremento de las temperaturas exige el empleo de actuadores climáticos para refrigeración con el fin de garantizar la producción agrícola. En climas cálidos y secos, el enfriamiento evaporativo es muy eficiente y si se combina con sistemas de conducción del aire en el interior del invernadero, proporciona una distribución de temperaturas homogénea. Este tipo de sistemas de refrigeración es compatible con los invernaderos semicerrados, que limitan los intercambios de materia y energía, para reducir el consumo de recursos, especialmente, agua y energía, y proporcionan un elevado control del clima y la fertirrigación gracias a un gran equipamiento tecnológico. En este trabajo se modela el funcionamiento de un panel evaporativo con distribución de aire en un invernadero con cultivo de cáñamo con el fin de predecir su comportamiento y poder evaluar el efecto de estrategias de optimización del uso del agua y la energía.



Figura 1. Conexión del sistema de distribución de aire con la cámara de enfriamiento y sistema de distribución del aire

### Materiales y métodos

Se ha realizado un cultivo de cáñamo, Tiborszallasi, entre abril y julio de 2023 en un invernadero de 300 m<sup>2</sup> (12 x 25 m) del CEBAS-CSIC, Murcia (coordenadas 38° 6' 26" N y 1° 2' 7" W). El cerramiento es de polietileno tricapa de 800 galgas de espesor, con una altura de la cumbre de 7,5 m y del canal de 5,0 m. Se dispone de un panel evaporativo de celulosa corrugada de 10,5 m<sup>2</sup> de área y 0,1 m de espesor (Celdek Munters, Suecia) instalado en su cara norte. Entre el panel y el interior del invernadero hay una cámara de enfriamiento, de 1,0 m de anchura, con seis ventiladores, cada uno de 6.580 m<sup>3</sup>/h de caudal, 740 W de potencia, 45,1 % de rendimiento y 0,63 m de diámetro. Cada ventilador dirige el aire enfriado hacia el interior por una tubería de plástico perforada de diámetro 60 cm. La separación entre líneas de cultivo es de 1,6 m. Se dispone de estaciones Davis Vantage Pro2 para registrar los valores de la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento.

### Resultados y discusión

La consigna de la velocidad del aire a su paso por el panel se fija en 0,5 m/s, resultando un caudal unitario de 6,350 m<sup>3</sup>/h y una pérdida de carga estática de 180 Pa. Estos valores indican que los ventiladores seleccionados tienen un punto óptimo de funcionamiento apropiado. La estimación de la velocidad del aire a su paso por el panel es de 0,54 m/s cuando la temperatura en el exterior es de 35°C y la humedad relativa del 45%. La velocidad del aire en la salida del ventilador hacia el conducto es de 5,90 m/s. La temperatura del aire en el interior del invernadero, XT,g, varía en función del clima en el exterior como se muestra en la Figura 2. El valor de la XT,g aumenta proporcionalmente con la PT,o y la PRH,o. La Tabla 4 muestra los valores de la XW (W), el XF (m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>) y la XΔPe (Pa) producida por el ventilador seleccionado cuando el valor nominal de la Vn (Hz) se reduce entre 50 y 46 Hz. Las condiciones climáticas en el exterior vienen dadas por los valores de PT,o (35 °C), PHR,o (30 %) y PSR,o (800 W m<sup>-2</sup>). La Figura 8 muestra la evolución temporal de la XT,g en función de la Vn. Los cambios en el funcionamiento del sistema de extracción-impulsión debido a la variación de la frecuencia empleada apenas afectan al valor de la XT,g. Al disminuir el valor de la frecuencia, el valor inicial de la temperatura en el interior del invernadero tiende a aumentar, aunque su valor estacionario tiende a ser menor.

Tabla 1 - Valores de las propiedades unitarias de funcionamiento del sistema de extracción-impulsión para frecuencia entre 50 y 46 Hz. T<sub>o</sub>: 35 °C, HR<sub>o</sub>: 60 %, SR<sub>o</sub>: 800 W/m<sup>2</sup>

n (Hz)	50	49	48	47	46
n (rpm)	1450	1420	1390	1360	1330
W (W)	750	710	670	630	590
F (m <sup>3</sup> /h)	5790	5670	5560	5440	5330
ΔPe (Pa)	220	210	200	195	190

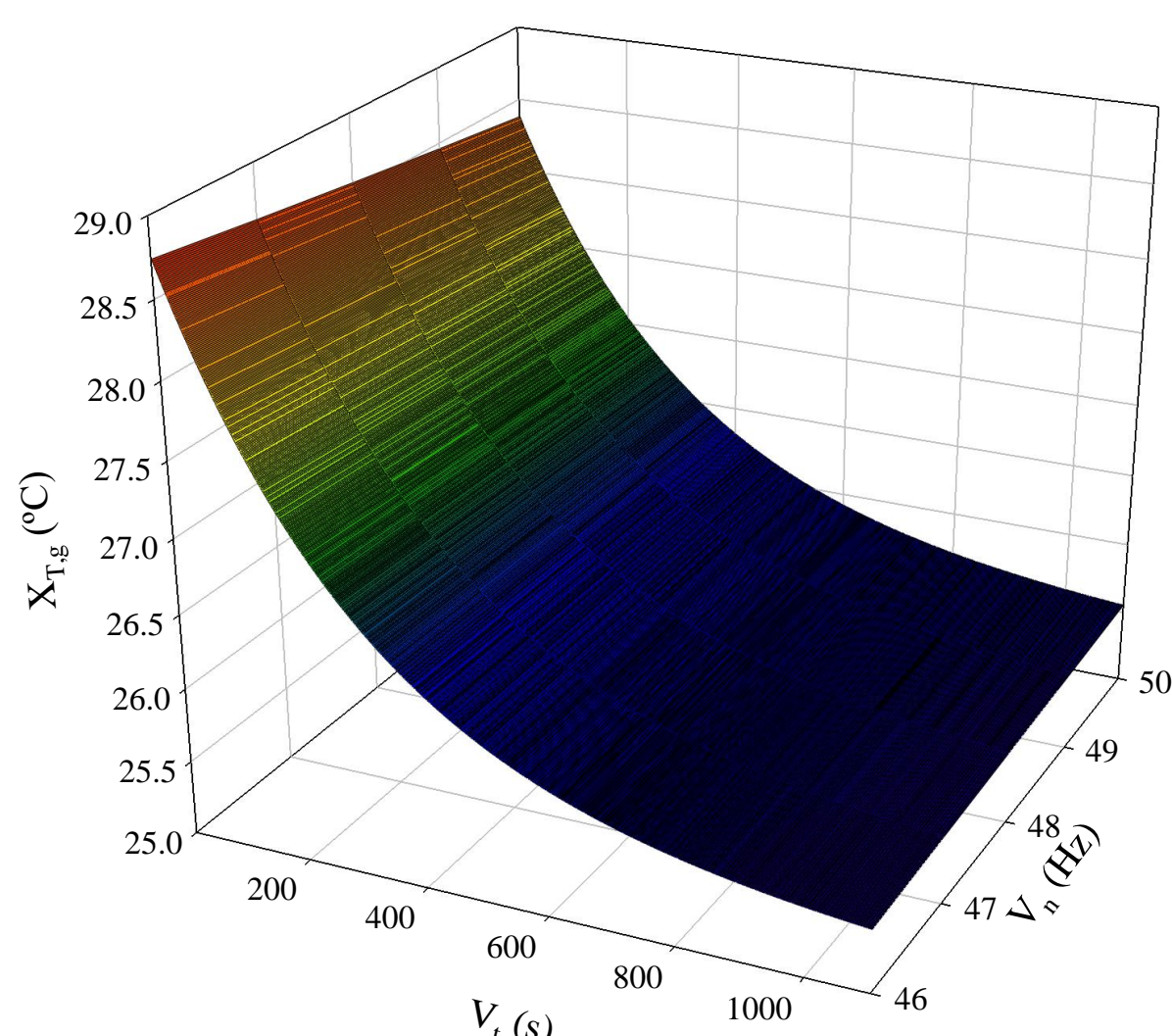


Figura 3. Evolución temporal de la temperatura en el interior del invernadero en función de la frecuencia de la corriente eléctrica

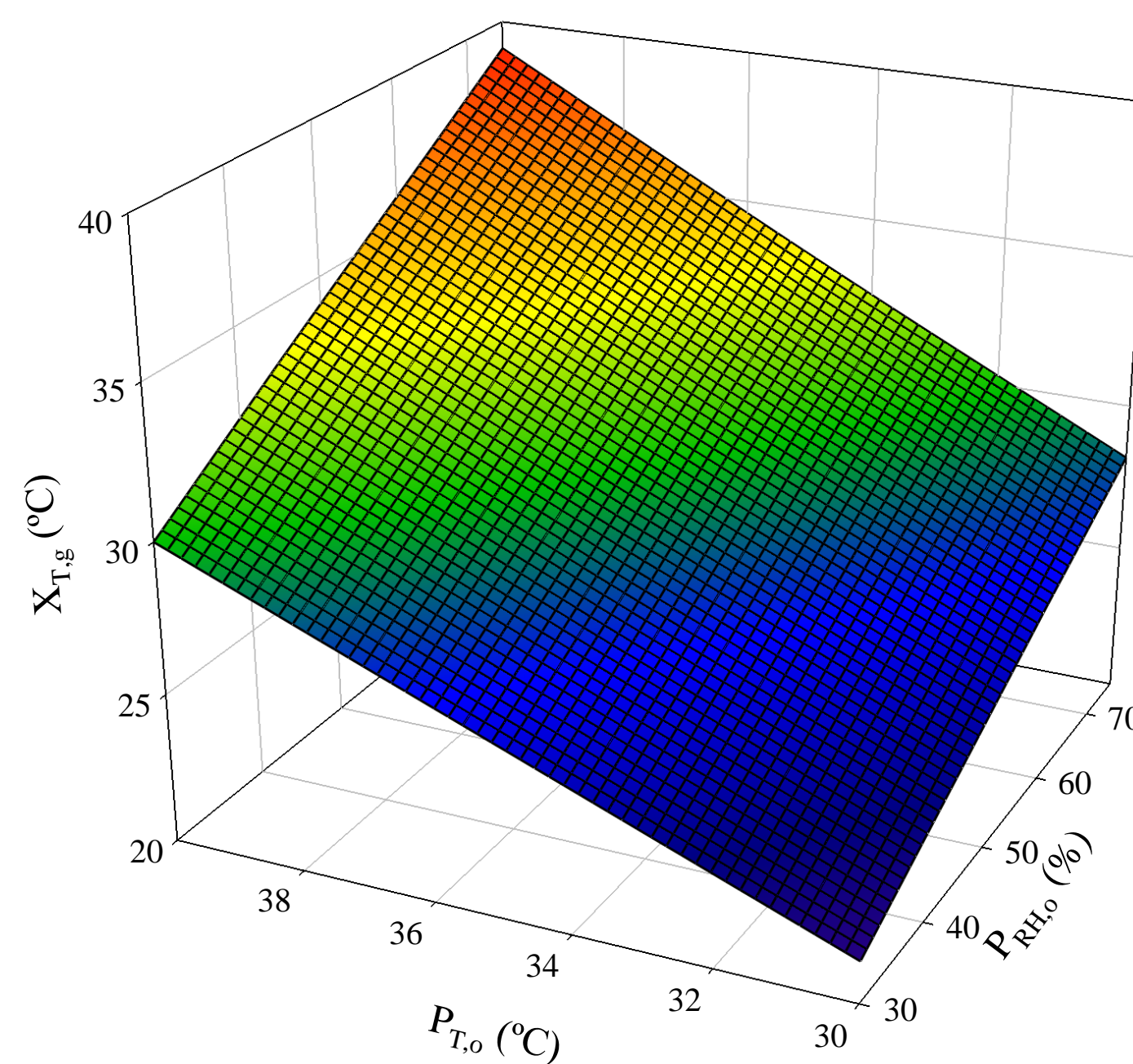


Figura 2. Variación de la XT,g en función del clima exterior, PT,o y la PRH,o

### Referencias bibliográficas

- Ghoulem, M., El Moueddeb, K., Nehdi, E., Boukhanouf, R., Calautit, J.K. 2019. Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status. *Biosyst. Eng.* 183, 121-150.
- Dannehl, D.; Josuttis, M.; Ulrichs, C.; Schmidt, U. The potential of a confined closed greenhouse in terms of sustainable production, crop growth, yield and valuable plant compounds of tomatoes. *J. Appl. Bot. Food Qual.* 2014, 87, 210-219.

### Conclusiones

El estado inicial del aire exterior influye sobre el funcionamiento de una instalación de enfriamiento evaporativo para refrigeración de invernaderos. Los valores consignados de la temperatura en el interior del invernadero pueden resultar comprometidos en función del estado del clima en el exterior. La reducción de la frecuencia de la energía eléctrica mediante un variador de frecuencia puede contribuir a un ahorro de energía sin afectar los valores de la temperatura en el interior del invernadero.

### Agradecimientos

Este estudio forma parte del programa AGROALNEXT (AGROALNEXT/2022/048) y ha sido apoyado por MCIN con financiación de la Unión Europea NextGenerationEU (PRTR-C17.11) y de la Generalitat Valenciana.