

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

Análisis de la variación del microclima generada mediante el aumento de la superficie de ventilación lateral en un invernadero multitúnel con cultivo de tomate

Mención:

Industrias Agrarias y Alimentarias

Curso 2017/2018

Alumno/a:

Diego Montero Curiel

Director/es:

Francisco Domingo Molina Aiz
Alejandro López Martínez



ÍNDICE

1. INTERES Y OJETIVOS.....	7
1.1. CONTEXTO.....	7
1.2. OBJETIVOS.....	9
2.FASES DE REALIZACIÓN DEL TFG Y CRONOGRAMA ASOCIADO.....	11
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1. MICROCLIMA.....	13
3.1.1. RADIACIÓN SOLAR	13
3.1.2. HUMEDAD.....	13
3.1.2.1. INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN EL CULTIVO.....	14
3.1.2.1.1. INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN LA TRANSPIRACIÓN.....	14
3.1.2.1.2. INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN LA FOTOSÍNTESIS.....	15
3.1.2.2. PERFILES DE HUMEDAD.....	15
3.1.3. TEMPERATURA.....	16
3.1.3.1. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL CULTIVO.....	17
3.1.3.1.1. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA TRANSPIRACIÓN.....	18
3.1.3.1.2. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA RESPIRACIÓN.....	18
3.1.3.1.3. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA FOTOSÍNTESIS.....	19
3.1.3.1.4. PUNTO DE COMPENSACIÓN.....	20
3.1.3.2. LA TEMPERATURA DEL SUELO.....	21
3.1.3.3. PATRONES Y PERFILES DE TEMPERATURA.....	22
3.1.3.3.1. PATRONES Y PERFILES DE TEMPERATURA DEL SUELO.....	23
3.1.4. LA CONCENTRACIÓN DE ANHÍDRIDO CARBÓNICO, CO ₂	24
3.1.4.1. INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE CO ₂ SOBRE EL CULTIVO.....	24
3.1.4.1.1. INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE CO ₂ SOBRE FOTOSINTESIS.....	24
3.1.4.1.2. INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE CO ₂ SOBRE LA TRANSPIRACIÓN.....	27
3.1.4.2. PROBLEMAS ASOCIADOS AL EMPOBRECIMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE CO ₂	27
3.1.4.3. PERFILES DE CO ₂	27
3.2. CAMBIO CLIMÁTICO.....	29
3.3. EL VIENTO.....	31
3.3.1. EL TRANSPORTE TURBULENTO.....	31
3.3.2. EL VIENTO EN ALMERÍA	33
3.4. EL INVERNADERO TIPO MULTITÚNEL	34
3.5. ORIENTACIÓN Y SITUACIÓN.....	35
3.6. LA VENTILACIÓN.....	37
3.6.1. NECESIDADES DE VENTILACIÓN.....	39
3.6.2. VENTILACIÓN DEFICIENTE.....	40

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

3.6.3. INCONVENIENTES DE LA VENTILACIÓN.....	41
3.6.4. TIPOS DE VENTILACIÓN.....	41
3.6.4.1. VENTILACIÓN FORZADA.....	41
3.6.4.2. VENTILACIÓN NATURAL O PASIVA.....	42
3.6.4.2.1. FUNDAMENTOS MECÁNICOS DE LA VENTILACIÓN NATURAL.....	43
3.6.5. SITUACIÓN DE LA VENTILACIÓN EN INVERNADEROS DE ALMERÍA.....	44
3.6.6. VENTANAS.....	44
3.6.6.1. DISTRIBUCIÓN DE LAS VENTANAS.....	45
3.6.6.2. TIPOS DE VENTANAS Y RESPUESTA.....	46
3.7. MALLAS ANTI-INSECTOS.....	49
3.8. CULTIVO Y SUSTRATO.....	51
4. MATERIAL Y MÉTODOS.....	53
4.1. INVERNADERO Y CULTIVO.....	53
4.2. MEDIDA DE PARÁMETROS CLIMÁTICOS EN CONTINUO.....	55
4.3. ESTIMACIÓN DE FLUJO DE AIRE EN LAS VENTANAS LATERALES.....	61
4.3.1. MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE VIENTO EN LAS VENTANAS LATERALES.....	61
4.3.2. CÁLCULO DEL CAUDAL DE VENTILACIÓN CON EL ANEMÓMETRO SÓNICO.....	63
4.4. ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE CO ₂ Y H ₂ O EN EL INVERNADERO.....	65
4.5. MEDIDA DE LA FOTOSÍNTESIS Y LA TRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO.....	67
4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	68
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	69
5.1. MEDIDA EN LA VELOCIDAD DEL AIRE EN LAS VENTANAS.....	69
5.2. CÁLCULO DEL CAUDAL DE AIRE EN LAS VENTANAS.....	79
5.3. ANÁLISIS DEL MICROCLIMA DEL INVERNADERO.....	85
5.3.1. ANÁLISIS DE TEMPERATURAS.....	85
5.3.1.1. VALORES MEDIOS DE TEMPERATURA DEL AIRE.....	85
5.3.1.2. VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE TEMPERATURA.....	89
5.3.1.3. TEMPERATURA DEL CULTIVO.....	89
5.3.2. ANÁLISIS DE LA HUMEDAD DEL AIRE.....	92
5.3.2.1. VALORES MEDIOS DE HUMEDAD.....	92
5.3.3. ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN SOLAR INTERIOR.....	101
5.4. ESTIMACIÓN DE LA FOTOSÍNTESIS Y LA TRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO.....	104
5.4.1. CÁLCULO DEL FLUJO DE CO ₂ EN LAS VENTANAS DEL INVERNADERO.....	104
5.4.2. CÁLCULO DE LA FOTOSÍNTESIS DEL CULTIVO.....	105
5.4.3. CÁLCULO DEL FLUJO DE H ₂ O EN LAS VENTANAS DEL INVERNADERO.....	106
5.4.4. CÁLCULO DE LA TRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO.....	107
5.4. ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN.....	108
6. CONCLUSIONES.....	109

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

7.BIBLIOGRAFÍA.....111

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

RESUMEN

El principal objetivo del presente trabajo ha sido evaluar el efecto del incremento de la superficie de ventilación lateral sobre la capacidad de ventilación y el microclima de un invernadero. El experimento desarrolló en el invernadero U11 del Campo de Prácticas de la Universidad de Almería (Centro de Innovación y Tecnología "Fundación UAL-ANECOOP") en dos sectores separados por una lámina de polietileno. El sector Oeste (U11O), con unas dimensiones de 24 × 20 m, estaba dotado de ventanas laterales de 0.9 m de alto y en el sector Este (U11E), de 24 × 25 m, se instalaron unas nuevas ventanas de 3.3 m de altura.

Durante el ciclo de cultivo de primavera-verano de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) se realizaron dos tipos de medidas del microclima. Primero, se registraron en continuo (con una frecuencia de 1 minuto) la temperatura, humedad y velocidad del aire y la temperatura del cultivo, con las ventanas abriendo de forma automatizada. En segundo lugar, se realizaron ensayos puntuales para medir el caudal de aire y el flujo de CO₂ y H₂O en el invernadero con las ventanas cenitales cerradas y las laterales abiertas a su máxima capacidad. Además, se midieron la fotosíntesis y la transpiración de las hojas de tomate mediante un sensor de fotosíntesis portátil.

Comparando los valores medios de velocidad medidos en los ensayos puntuales con anemómetros 2D situados en las ventanas laterales de los dos sectores, se observó que en la ventana Norte la velocidad del sector U11O fue un 35% superior a la media de la ventana U11E. Sin embargo, el valor medio registrado en las dos posiciones de la ventana Norte del sector U11E libres de obstáculos fue superior, lo que hace suponer que estas diferencias se debieron principalmente a la presencia de la nave del controlador, y no al efecto del tamaño de la ventana. Las medidas de los sensores 2D en la ventana Sur mostraron valores de velocidad más cercanos, de -0.35 m s^{-1} en el sector U11E y -0.31 m s^{-1} en el sector U11O, por lo que el caudal de ventilación aumentó a más del doble en el invernadero con las ventanas laterales de mayor tamaño. Como consecuencia, la velocidad del aire en medio de las líneas de cultivo a 1.5 m de altura, fue de 0.38 m s^{-1} en el sector Este, un 58% superior a la registrada en el lado Oeste de 0.24 m s^{-1} .

El caudal medio de ventilación medido en el sector U11E fue de $24.0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, correspondiente a una tasa de ventilación de 25.2 h^{-1} . Este valor medido utilizando solo las dos ventanas laterales (y con las tres ventanas cenitales cerradas) es más del doble del obtenido para vientos similares (en torno a 8 m s^{-1}) en el mismo invernadero experimental U11 con las ventanas cenitales abiertas cuando todas las ventanas laterales eran del tipo estándar como las instaladas en el sector U11O. Este incremento del caudal indica que el aumento de la superficie de ventilación lateral mejora de forma significativa la capacidad de ventilación del invernadero. Como consecuencia del aumento de esta capacidad de ventilación, reflejada en el aumento de la velocidad del aire dentro del invernadero, se registraron temperaturas interiores al medio día unos 2-3°C inferiores en el sector U11E con las ventanas grandes que en el U11O con las ventanas estándar.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERNADERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Mediante el análisis estadístico de los datos registrados de forma continua a lo largo de todo el periodo de crecimiento del cultivo, se observaron diferencias estadísticamente significativas en las temperaturas medias del aire, siendo de media 1.1 °C inferiores a 1 m y 0.8 °C a 2 m en el sector Este con las ventanas de mayor tamaño. También se han observado valores de temperaturas máximas significativamente inferiores para todos los sensores del lado Este, así como para las temperaturas de las hojas de cultivo en ese sector.

A partir de los valores de flujo de aire calculados en las dos ventanas laterales y de las concentraciones de CO₂ medidas en dichos puntos con un IRGASON, se ha estimado el flujo neto de CO₂ en el invernadero en 114 mg s⁻¹. Este valor es superior al calculado (89 mg s⁻¹) multiplicando la fotosíntesis de una planta, medida en las hojas de cultivo con un sensor manual LCI, por el número de plantas cultivadas con un índice de área foliar de LAI = 1.055 m² m⁻². De igual forma se calculó la evapotranspiración del cultivo en el conjunto del invernadero como la diferencia entre el flujo de vapor de agua que entraba y salía a través de las ventanas (27.9 g s⁻¹) y como la transpiración de una planta medida en las hojas de tomate con el sensor portátil multiplicado por el número de plantas existentes dentro del invernadero (86.9 g s⁻¹). Las diferencias se basan en la inexactitud en la medida del flujo de aire en las ventanas y en la suposición de que todas las plantas del invernadero tienen una misma superficie foliar y que transpiran lo mismo.

Abstract

The main objective of the present work has been to evaluate the effect on the ventilation capacity and the microclimate of a greenhouse of the increase in the side vent surface. The experiment was developed in the greenhouse U11 of the Experimental Farm of the University of Almería (Center for Innovation and Technology "Fundación UAL-ANECOOP") in two sectors separated by a polyethylene sheet. The West sector (U11W), with dimensions of 24 × 20 m, was endowed with side vents of 0.9 m high and in the East sector (U11E), 24 × 25 m, new vents 3.3 m high were installed.

During the spring-summer tomato cultivation cycle (*Lycopersicon Esculentum* Mill) two types of microclimate measurements were carried out. First, we recorded continuously (with a frequency of 1 minute) the temperature, humidity and velocity of air and crop temperature, with vents automatically opening. Secondly, isolated tests were carried out to measure air flow and CO₂ and H₂O flux in the greenhouse with the roof windows enclosed and the side vents opened at their maximum capacity. In addition, photosynthesis and transpiration of tomato leaves were measured using a portable photosynthesis sensor.

Comparing average velocities measured in the isolated testes with 2D anemometers located in the side vents of the two sectors, we can observe that velocity at the north vent of the U11O sector was 35% higher than the average of the U11E vent. However, the average values recorded in the two positions free of obstacles of the north vent of the U11E sector was higher, which makes it suppose that these differences are produced mainly by the presence of the controller building, and not to the effect of the size of the side vents. Measurements of air velocity with the 2D sensors in the south vents showed closer values, from -0.35 m s^{-1} in the U11E sector and -0.31 m s^{-1} in the U11O sector, so the ventilation flow increased to more than double in the greenhouse with the larger side vent. As a result, air velocity in the middle of the crop lines at 1.5 m high, was 0.38 m s^{-1} in the east sector, 58% higher than that recorded on the west side of 0.24 m s^{-1} .

The average ventilation airflow measured in the U11E sector was $24.0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, corresponding to a ventilation rate of 25.2 h^{-1} . This measured value using only the two side vents (and with the three roof windows closed) is more than double the obtained for similar winds (around 8 m s^{-1}) in the same experimental greenhouse U11 with all roof windows opened, when all side vents were of the standard type, as this installed in the U11O sector. This increase in airflow indicates that the increase of the side vent surface improv in a meaningful way the ventilation capacity of the greenhouse. As a result of the increase of this ventilation capacity, observed in the increase of the air velocity within the greenhouse, mid-day inside temperatures were 2-3 °C lower in the U11E sector with large side vents that in the U11O with the standard vents.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Statistical analysis of the data recorded continuously throughout the crop growing period showed statistically significant differences in average temperatures of air, being 1.1 °C lower at 1 m and 0.8 °C lower to 2 m in the East sector with larger vents. Also, values of maximum temperatures significantly lower for all sensors on the East sector have been observed, as well as for the temperatures of tomato leaves in that sector.

From the air flow values calculated on the two side vents and the CO₂ concentrations measured in these points with an IRGASON sensor, net CO₂ flux has been estimated in the greenhouse in 114 mg s⁻¹. This value is higher than that calculated (89 mg s⁻¹) multiplying photosynthesis of one plant, measured in the crop leaves with a LCI portable sensor, by the number of cultivated plants with a leaf area index of LAI=1.055 m² m⁻². Likewise, evapotranspiration of the crop was calculated in the greenhouse as the difference between the water vapor flux entering and that exit through the side vents (27.9 g s⁻¹). A second value was obtained from transpiration measured in the tomato leaves with the portable sensor multiplied by the number of plants existing within the greenhouse (86 g s⁻¹). The differences are based on inaccuracy in the measurement of the airflow at the vents and on the assumption that all plants in the greenhouse have the same foliar surface and that transpire the same.

1. INTERÉS Y OBJETIVOS

1.1. Contexto

Los invernaderos de Almería han sido desde hace años la principal fuente de desarrollo demográfico y socioeconómico de la provincia. Constituyen la mayor concentración de invernaderos del mundo. Según la Agencia Andaluza de Promoción Exterior (EXTENDA), Andalucía se presenta como líder en 2013 de exportaciones agroalimentarias, jugando la horticultura almeriense un peso crucial en esta situación al aportar la mayor cuota al comercio internacional agroalimentario andaluz (Valera et al., 2014).

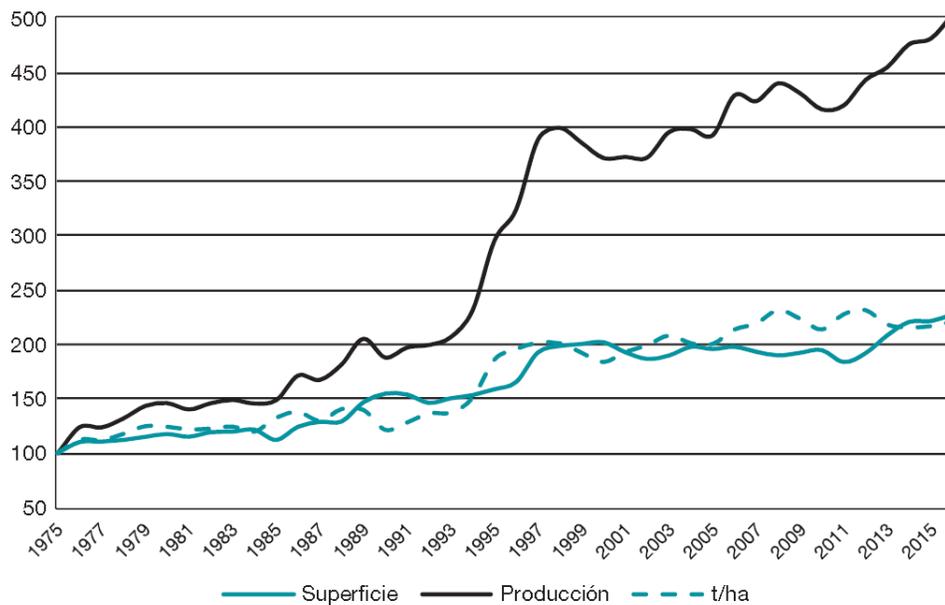


Figura 1. Evolución de la superficie, producción y rendimientos. Índice 1975=100. Estimación realizada por Fundación Cajamar a partir de datos de la Junta de Andalucía, SOIVRE y empresas del sector (Cabrera Sanchez et al., 2016).

A pesar de todos los buenos rendimientos y exportaciones, continúa el proceso de pérdida de renta por parte de los agricultores (Figura 1). El descenso de los precios está produciendo una pérdida de renta por parte de los agricultores (Fundación Cajamar, 2012). La creciente competencia desde el Norte a base de tecnología y desde el Sur reduciendo costes puede considerarse como una de las razones (Valera et al., 2014)

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERNADERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Es por esto qué se debe continuar trabajando en una mejora de la comercialización; la reducción de los costes de producción; la diferenciación respecto a nuestros competidores (Control Biológico, Residuo Cero, seguridad alimentaria, ...); junto con el aumento de la producción física entre otros aspectos. Y es en muchos de estos donde una correcta climatización de nuestro invernadero puede jugar un papel crucial, entendiéndose por climatización, el uso de sistemas y técnicas que nos permitan actuar y controlar los elementos del microclima de la forma más eficiente posible. Y es aquí donde la ventilación adquiere gran importancia (Valera et al., 2014).

La elevada temperatura de los invernaderos es uno de los problemas más importantes de la horticultura protegida mediterránea. El clima de áreas mediterráneas, caracterizado por una elevada radiación y altas temperaturas exteriores, origina temperaturas excesivas dentro del invernadero durante gran parte del día desde abril hasta septiembre, lo que reduce la productividad y la calidad de los cultivos. La mayoría de los cultivos hortícolas en invernadero ven reducido su desarrollo en gran medida para valores de temperatura mayores de 30°C-35°C, valores fáciles de alcanzar por invernaderos de estas regiones (Bonachela, 2013).

El sistema de refrigeración del invernadero mediterráneo está basado prácticamente en la ventilación natural, a pesar de que normalmente se cuenta con sistemas poco eficientes (Baeza et al., 2010) y la mayoría de los agricultores recurren a sombrear la cubierta mediante el blanqueo afectando a la radiación que incide en el cultivo y por tanto a la producción (Céspedes et al., 2009).

La principal vía para mejorar de las condiciones climáticas en los tradicionales invernaderos almerienses apunta a una mejora en la eficiencia de los sistemas de ventilación natural (Valera et al., 2014).

El cultivo para el estudio ha sido de tomate, con el fin de recrear en mayor grado las condiciones de un invernadero estándar de la provincia de Almería.

La provincia cuenta con 10.232 ha de invernaderos para el cultivo de tomate con una producción de 958.462 toneladas (CAPMA, 2013b) que supone el 61 % de toda la producción en Andalucía y el 83,2 % de la superficie (Junta de Andalucía, 2010). El tomate, junto con el pimiento, es uno de los principales cultivos de la provincia, con un impacto económico de 377 millones de euros durante la campaña 2011/2012 (Fundación Cajamar, 2012).

1.2. Objetivos

El principal objetivo del trabajo es evaluar el efecto de la superficie de ventilación sobre la capacidad de ventilación y el microclima de un invernadero. Además, con el fin poder comparar la correlación entre una mayor superficie de ventilación y una mayor tasa de ventilación se han instalado diferentes ventanas laterales en cada uno de los módulos en los que se divide el invernadero: de 0,9 metros de alto en el módulo Este y de 3,3 metros en el Oeste.

Para alcanzar este objetivo general se han considerado los siguientes objetivos específicos:

1. Calcular el flujo de aire en las ventanas laterales de dos módulos de invernadero con diferente superficie de ventilación mediante medidas de anemometría sónica.
2. Analizar el efecto de la superficie de ventilación en las temperaturas del aire, del cultivo y del suelo, y en la humedad del aire.
3. Comparar las medidas de fotosíntesis de un cultivo de tomate obtenidas a partir de mediciones en hoja con las calculadas a partir del flujo de CO₂ en las ventanas del invernadero.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

2. FASE DE REALIZACIÓN DEL TFG Y CRONOGRAMA ASOCIADO

El trabajo se desarrollará en las siguientes fases:

- 1º. Montaje del dispositivo experimental (Mayo 2017).
- 2º. Desarrollo de un cultivo de tomate en invernadero y toma de datos en campo (Mayo-Agosto 2017).
- 3º. Análisis estadístico de los datos climáticos (Septiembre-Diciembre 2017).
- 4º. Análisis de los resultados obtenidos (Enero-Febrero 2018).
- 5º. Redacción del trabajo fin de grado (Marzo-Junio 2018).

CRONOGRAMA

	2017			2018
	Mayo	Agosto	Septiembre - Diciembre	Enero - Junio
Montaje del dispositivo experimental (sensores, registradores de datos, cultivo...)				
Desarrollo del cultivo y toma de datos de campo				
Análisis estadístico de datos climáticos				
Discusión de resultados y redacción del trabajo fin de grado				

Tabla 1. Cronograma de la elaboración del trabajo fin de grado.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. Microclima

El desarrollo de los cultivos, lo condicionan cuatro factores climáticos o ambientales: temperatura, luz humedad relativa, y CO₂. Las plantas necesitan la conjunción de estos para realizar sus funciones dentro de unos límites mínimos y máximos, los cuales si son trasgredidos pueden suponer desde una pérdida de producción hasta la muerte (INFOAGRO, 2011).

El microclima puede considerarse como un clima con características diferentes al clima local donde se encuentra. Los elementos que lo definen son la radiación, la temperatura, la humedad y la concentración de CO₂ desde el punto de vista agronómico. Pero la ventilación solo tiene efecto en tres.

3.1.1. Radiación solar

Aunque se sitúa entre 300 y 2500 nm del espectro, la planta solo utiliza para el proceso fotosintético aquella entre 400 y 700 nm y es conocida como radiación fotosintéticamente activa (PAR), constituye sobre el 50% de la radiación solar global que llega al nivel de la tierra. Sólo una pequeña proporción de la misma es usada para el proceso fotosintético, el resto es convertido en calor (Martínez et al., 2007). El cultivo bajo invernadero se diferencia del cultivo al aire libre en que las radiaciones son más bajas en invierno (pérdidas de alrededor de 30-50% por reflexión y absorción de los elementos del invernadero).

A pesar de que la ventilación, obviando el ligero descenso que la presencia de ventanas cenitales puede ocasionar, no afecta a la radiación global de nuestro invernadero, es necesario monitorizar sus valores a lo largo del estudio para comprobar que en los diferentes invernaderos este parámetro ha sido igual. De lo contrario las interpretaciones de actividad fotosintética pueden no ser fiables, al haber sido alterados por una radiación distinta.

3.1.2. Humedad

La humedad es la masa de agua en unidad de volumen, o en unidad de masa de aire. Para trabajar con este parámetro se usan tres conceptos, la humedad relativa y el déficit de presión de vapor y la humedad absoluta.

La presión del aire en la atmósfera es la suma de la presión parcial ejercida por todos los gases que la constituyen, entre ellos, el agua en forma de vapor ejerce una presión parcial a la que denominamos e_a .

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Cuando las moléculas de agua en estado líquido se liberan de sus fuerzas de atracción y se escapan desde una superficie formando vapor se considera que se ha producido un fenómeno de vaporación. Algunas moléculas se ponen en contacto con la superficie y son recapturadas por el líquido hasta que finalmente se establece un estado de equilibrio dinámico entre el número de moléculas que escapan y las que son recapturadas. En este punto se dice que el aire está saturado. La presión de vapor en condiciones de saturación e_s depende exclusivamente de la temperatura.

$$e_s = 0.61078 \exp \frac{17,275 T(^{\circ}\text{C})}{T(^{\circ}\text{C})+237,3} \quad (1)$$

Si aumentamos la temperatura el aire será capaz de retener más cantidad de vapor de agua y viceversa, por lo que haciendo descender la temperatura podemos generar unas condiciones saturantes.

La atmosfera normalmente no se encontrará en condiciones de saturación: $e_a < e_s$

La humedad relativa es el porcentaje de agua contenida en el aire, en relación con la máxima que sería capaz de contener a la misma temperatura.

$$\text{HR} = \frac{e_a}{e_s} \cdot 100 \quad (2)$$

El concepto DPV (déficit de presión de vapor) nos indica el poder desecante de la atmosfera:

$$e_s - e_a \quad (3)$$

Este concepto no permite establecer umbrales o consignas de trabajo, de ahí su utilidad. Para el cultivo de tomate se establecen unos límites de 0.5 y 2.5. Para un valor de 0.5 la transpiración está muy limitado y para 2.5 es demasiado alta.

(Hernández, 2013).

3.1.2.1. Influencia de la humedad en el cultivo

3.1.2.1.1. Influencia de la humedad en la transpiración

La transpiración tiene dos etapas: La que concierne a la evaporación del agua a través de las células del mesófilo a los espacios aéreos del mesófilo y aquella que supone la difusión del vapor de agua a través de los espacios aéreos del interior de la planta hasta el exterior, principalmente por los estomas (Barceló Coll, 2001).

Por las leyes de difusión, el flujo de una sustancia es proporcional a su gradiente de concentración. En la transpiración es aproximadamente proporcional a la diferencia de humedad entre la cámara

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

subestomática y el exterior. Un aumento de la humedad exterior supone una disminución de la transpiración al disminuirse esta diferencia. Un descenso, en principio, supone una mayor abertura estomática incrementando la transpiración siempre que no se supere un cierto valor mínimo que supondría un cierre como mecanismo de la planta para evitar marchitamiento.

3.1.2.2.1. Influencia de la humedad en la fotosíntesis

Un incremento en la humedad exterior produce un menor gradiente de humedad entre la cámara subestomática y el exterior produciendo por un lado una disminución del flujo de vapor de agua y una abertura estomática para corregirlo. Lo que en términos de flujo de CO₂ se traduce como un aumento.

El ascenso de elementos nutricionales y agua a la hoja se produce por la tensión hídrica que se produce mediante la transpiración, entre las células de la hoja principalmente y el sistema radical de la planta. Una reducción, por tanto, de la tasa de transpiración va a reducir el transporte de agua y nutrientes a las principales zonas fotosintéticamente activas, las hojas, pudiendo afectar a la eficiencia y velocidad de este proceso, aun disponiendo de una entrada de CO₂ más abundante en la cámara subestomática debido a una reducción de la resistencia estomática (Martínez et al., 2007).

Por otro lado, humedades relativas bajas, conllevan para una gran parte de plantas cultivadas un cierre de estomas, con lo que la absorción carbónica puede disminuir y la mengua de sustancias orgánicas sintetizadas que ello supone, repercutiendo en una menor productividad (Maroto, 2008).

3.1.2.2. Perfiles de humedad

La evolución diaria del contenido de vapor de agua que le llegue al cultivo va a depender de la cantidad de energía que le llegue al mismo, lo que a su vez depende de la temperatura y la radiación; del grado de desarrollo del mismo y de las prácticas culturales.

Durante el día el cultivo transpira gran cantidad de agua a medida que aumenta la temperatura aumentando la cantidad de vapor de agua en el ambiente y por ende la presión de vapor. Sin embargo, la humedad relativa se reduce debido a dicho aumento de la temperatura. Durante la noche a pesar de una menor evapotranspiración del cultivo, la humedad relativa es mayor debido a menores temperaturas (Figura 2) (Hernández, 2013).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

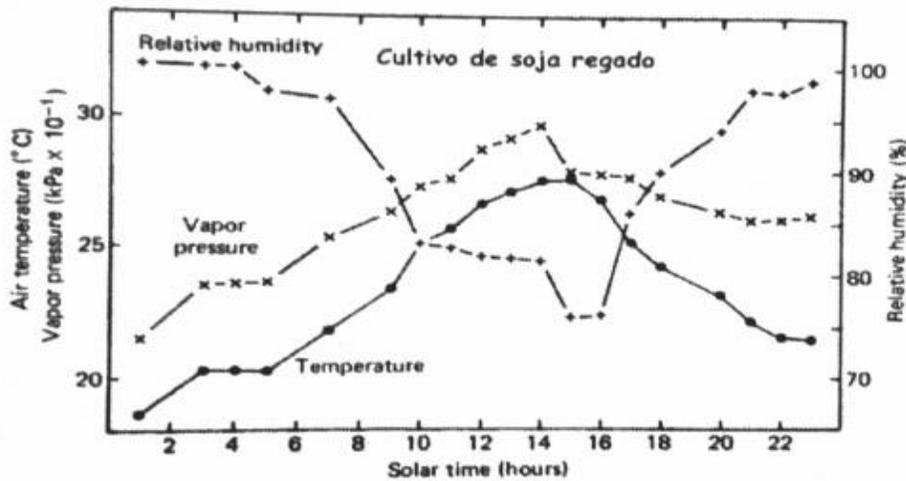


Figura 2. Evolución a lo largo del día de la humedad relativa (%), la presión de vapor $kPa \cdot 10^{-1}$ y la temperatura ($^{\circ}C$) de un cultivo de soja regado (Hernández, 2013).

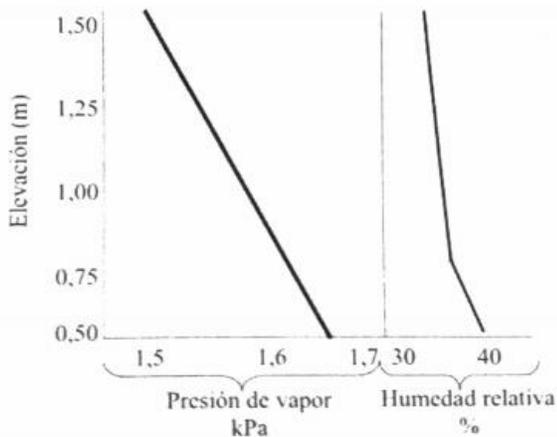


Figura 3. Perfil de altura de la evolución de la humedad relativa (%) y la presión de vapor kPa (Hernández, 2013).

La presencia de cultivos provoca un gradiente vertical de los valores de humedad. Como se muestra en la figura 3 los valores de humedad son más altos conforme nos acercamos al cultivo. Los gradientes de presión de vapor en altura son mayores al mediodía (cuando la tasa de evaporación es más alta), mientras que al amanecer y atardecer son más constantes con la elevación. El uso de ventanas en invernaderos va a contribuir en nuestro invernadero a generar turbulencias en el aire y por lo tanto a la homogenización del perfil de humedad.

3.1.3. Temperatura

La temperatura no es un factor de crecimiento, pero controla las tasas de reacciones metabólicas que producen el crecimiento y desarrollo de la planta, por tanto, la temperatura el principal factor de crecimiento. Cada especie tiene su crecimiento limitado por unos niveles de temperatura que son específicos incluso para cada estadio fenológico y fisiológico. Éstos son: el cero de vegetación, óptima de crecimiento, mínima y máxima biológica. La temperatura óptima para la mayoría de las plantas se encuentra entre los 12 y 22 $^{\circ}C$ (Martínez et al.).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

El calentamiento del invernadero se produce debido principalmente a la acción del infrarrojo largo, procedente de la radiación, que al atravesar la cubierta se transforma en calor. Esta radiación es por los diferentes elementos del invernadero. Como consecuencia, éstos emiten radiación de longitud más larga que tras pasar por el obstáculo que representa la cubierta, se emite radiación hacia el exterior y hacia el interior, calentando el invernadero.

El calor se transmite en el interior del invernadero por fenómenos de: irradiación, conducción, infiltración y por convección.

3.1.3.1. Influencia de la temperatura en el cultivo

La temperatura ambiente va a determinar por un lado la de las partes aéreas de la planta y por otro la del suelo y por ende la de las partes subterráneas de la misma.

Todos los fenómenos fisiológicos básicos de las plantas están modulados por la temperatura por lo que existirá un umbral de temperaturas máximas y mínimas, fuera del cual no se producirá dicho proceso fisiológico o puede invertirse; y un óptimo donde este se producirá a una velocidad máxima.

Además, para temperaturas elevadas la planta empieza a acumular sustancias tóxicas y puede darse la coagulación de los contenidos celulares provocando la muerte de los tejidos (Bonachela, 2013).

Tabla 2. Niveles térmicos importantes para cultivo de tomate en invernadero (Tesi, 1972)

Especie	T (°C) mínima letal	T (°C) mínima biológica	T (°C) optima NOCHE	T (°C) óptima DÍA	T (°C) máxima biológica	T (°C) óptima radicular
Tomate	0 a 2	8 a 10	13 a 16	22 a 26	26 a 30	15 a 20

Ventilar un invernadero de un clima mediterráneo en determinadas ocasiones por la noche puede suponer una estrategia interesante para reducir la humedad. Sin embargo, esto va a suponer una reducción de la temperatura media del mismo, lo que conlleva un riesgo desde el punto de vista para el cultivo: daños en fruto, calidad del polen... (Abad y Monteiro, 1989).

3.1.3.1.1. Influencia de la temperatura en la transpiración

La transpiración no depende de manera directa de la temperatura si no de la humedad relativa del ambiente o del déficit de vapor, que va a determinar el poder desecante de la atmósfera. Sin embargo, como hemos visto la presión de vapor de saturación es una función exponencial dependiente de la temperatura, por lo que, para un mismo contenido de vapor de agua en dos ambientes, la humedad relativa será menor donde la temperatura sea más alta, produciéndose una mayor transpiración (Hernández, 2013).

Por lo general aumentar la temperatura de 0 a 30°C favorece una mayor abertura estomática, aumentando la transpiración, pues en ese rango se promueve la fotosíntesis sobre la respiración (nos situamos a la izquierda del punto de compensación, figura 7). Para temperaturas superiores a 30° o 40°C ocurre lo contrario. (derecha del punto de compensación, figura 7) (Barceló Coll, 2001).

Para unos valores fijos de iluminación, con forme aumenta la temperatura, aumenta la transpiración sin que exista un máximo dentro de temperaturas que podemos considerar normales. Este es un mecanismo de defensa de las plantas ante altas temperaturas para disipar energía mediante la evaporación, reduciendo la temperatura en la superficie de la hoja. En condiciones de suficiente luz la planta seguirá transpirando hasta la marchitez (Hernández, 2013).

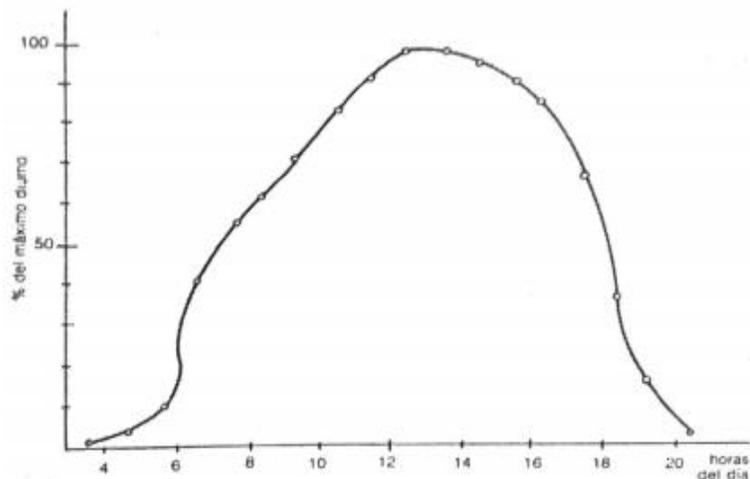


Figura 4. Evolución del % de máxima humedad diurna durante las horas de un día (Hernández, 2013).

3.1.3.1.2. Influencia de la temperatura en la respiración

Las plantas precisan de O₂ para la oxidación de sustratos orgánicos y conseguir así energía. La mayor parte de esta se disipa en forma de calor lo que va a afectar a la temperatura del aire.

La respiración aumenta conforme lo hace la temperatura alcanzando su máximo en células vegetales entre los 30 y 50 °C. A partir de 50°C disminuye debido a la destrucción de los sistemas enzimáticos de las células (Hernández, 2013).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

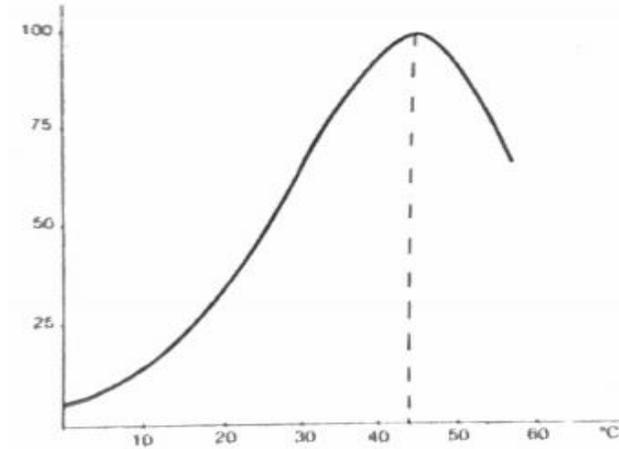


Figura 5. Temperatura (°C) frente a actividad respiratoria (%) de células vegetales (Hernández, 2013).

3.1.3.1.3. Influencia de la temperatura en la fotosíntesis

La fotosíntesis se realiza desde temperaturas muy bajas hasta los 35 a 40 °C. Esta depende de la radiación y la concentración de CO₂ en el aire controlando estos factores la actividad estomática.

Si no existe limitación de estas la fotosíntesis aumenta conforme lo hace la temperatura.

Si observamos que en la parte ascendente de la curva de la figura 6 cada 10 °C supone un incremento de 1.5 a 3 en la actividad fotosintética. Entorno a los 20 y 25 °C, dependiendo de la radiación que incida en el cultivo, la fotosíntesis detiene su incremento frente al de la temperatura y comienza a reducirse figura compensación (Hernández, 2013).

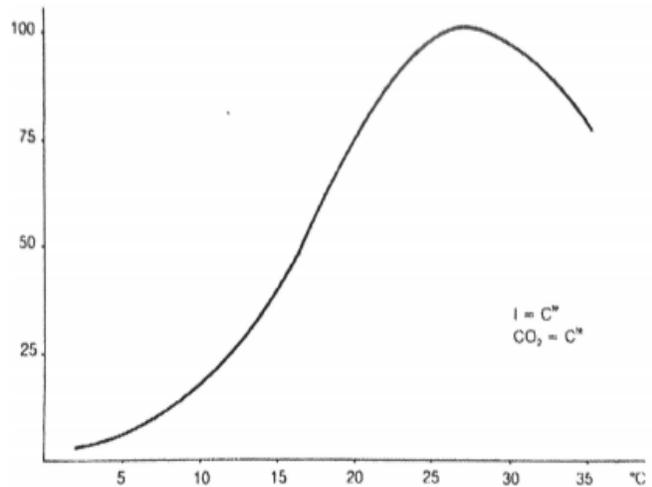


Figura 6. Temperatura (°C) frente a actividad fotosintética (%) de células vegetales (Hernández, 2013).

3.1.3.1.4. Punto de compensación

Podemos definir la asimilación neta de una planta como la diferencia entre su actividad fotosintética y la respiratoria que como hemos comentado actúa sobre los productos obtenidos en la primera. Si por las condiciones ambientales la actividad respiratoria es mayor que la fotosintética la planta decrece, consumiendo sus reservas, lo que en la figura 7 se traduce situado a la planta a la derecha del punto de compensación, en el que ambas actividades son iguales y la planta ni crece ni decrece. Si la planta permanece suficiente tiempo en este punto la planta morirá por inanición. Por el contrario, situarnos a la izquierda supone un crecimiento, situación la cual queremos promover, primando los procesos fotosintéticos y manteniendo al mínimo los respiratorios (Hernández, 2013).

Para una determinada temperatura diferentes plantas pueden situarse a la derecha o a la izquierda del punto de compensación, dependiendo de la radiación a las que estén expuestas que va a determinar la actividad fotosintética. Como vemos en la figura 7 para radiaciones elevadas el punto de compensación se alcanza a una mayor temperatura, lo que puede traducirse en una mayor capacidad del cultivo a crecer soportando temperaturas elevadas.

Según la figura 7, deducimos que las temperaturas donde podemos alcanzar un mayor crecimiento de la planta se registran antes de los 20 y 25 °C, un rango de temperaturas que es frecuentemente alcanzado en los otoños y primaveras de climas cálidos.

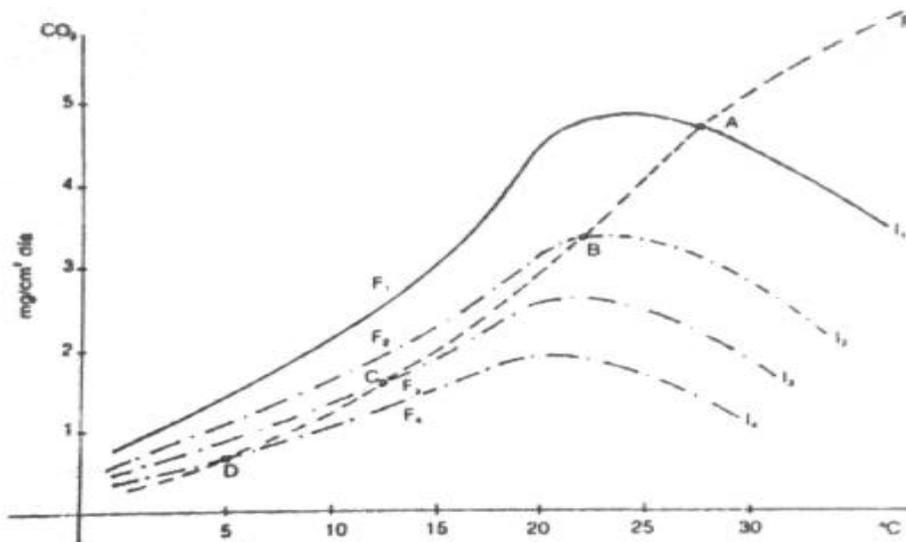


Figura 7. Temperatura (°C) frente a cantidad de CO₂ consumido por actividad fotosintética y producido por actividad respiratoria (mg/cm² día). Cada línea de actividad fotosintética (I₁ – I₄) ha estado sometida a diferentes dosis de radiación, de mayor a menor respectivamente (Hernández, 2013).

3.1.3.2. Temperatura del suelo

La temperatura del suelo influye en gran medida en los procesos de crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos como, por ejemplo:

- Procesos germinativos: temperaturas bajas alargan este proceso y la viabilidad de las mismas, y por tanto la fecha de siembra.
- Absorción de nutrientes: temperaturas excesivamente bajas van a reducir a la permeabilidad de las membranas, la tasa de absorción activa de nutrientes y la disponibilidad de otros. Además, la viscosidad de la solución de suelo aumenta conforme se reduce la temperatura de suelo, afectando a los movimientos de las masas de agua.
- Crecimiento radicular: bajas temperaturas pueden provocar un bajo desarrollo del sistema radicular y una escasa fasciculación, restringiendo la absorción de agua y nutrientes para ciertas zonas.

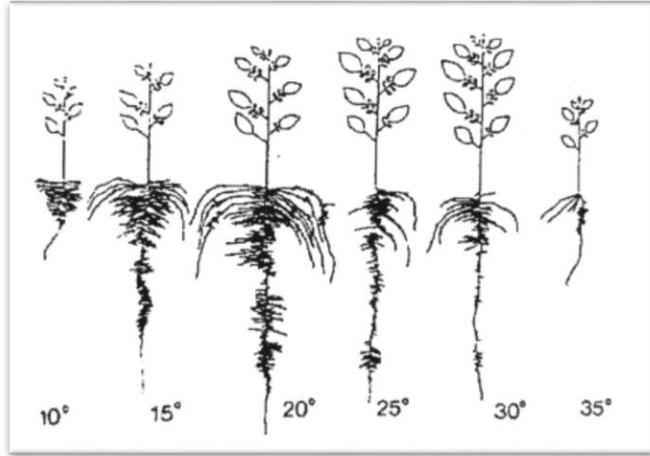


Figura 8. Desarrollo radicular para diferentes temperaturas de suelo (Hernández, 2013).

Bajas temperaturas van a afectar de manera negativa a la fijación simbiótica de nitrógeno y mineralización de la materia orgánica.

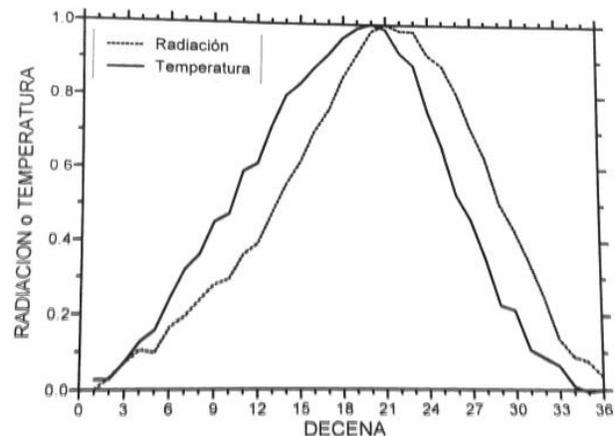
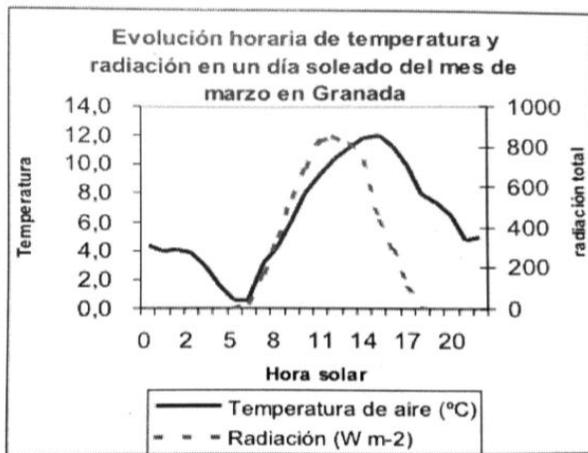
Y finalmente al rendimiento de los cultivos en general. En tomate, siendo los demás factores climáticos no limitantes, se han descrito valores máximos de materia aérea seca con una temperatura de suelo de 20 °C. Por todo esto, por lo general nos conviene evitar temperaturas de suelo bajas.

La temperatura del suelo depende de la cantidad de energía absorbida por el mismo, esta a su vez va a depender principalmente de la cantidad de radiación incidente, del color del suelo y de la disposición y la pendiente de la parcela; del calor específico y la conductividad térmica del mismo; y de la energía perdida por evaporación, lo que va a depender de manera directa de la cantidad de agua en suelo (Hernández, 2013).

3.1.3.3. Patrones y Perfiles de temperatura

La evolución tanto horaria como anual de la temperatura sigue un patrón sinusoidal al igual que la radiación, que puede verse afectado por la nubosidad o la entrada de frentes fríos. Además, en ambas circunstancias la evolución de la temperatura y la radiación presentan un desfase para sus valores máximos y mínimos. En el caso de la evolución horaria, los máximos térmicos se alcanzan aproximadamente dos horas después que los de radiación (Figura 9). Para los valores mínimos este desfase es mayor, como puede apreciarse en la figura 9 en la que los mínimos de radiación se alcanzan a las 6 del mediodía y los térmicos a las 6 de la mañana. Para la evolución anual este desfase es de aproximadamente un mes (Figura 10) (Hernández, 2013).

Dichos desfases se deben al tiempo que tarda la radiación o la falta de ella en calentar y enfriar las diferentes capas de aire.



Figuras 9 y 10. 9, izquierda) Evolución horaria de temperatura (°C) y radiación (W/m²) en un día soleado en la provincia de Granada. 10, derecha) Progresión anual de temperatura (°C) y radiación media (W/m²) en Córdoba. Valores normalizados respecto a los valores extremos (Hernández, 2013).

Los patrones de temperatura varían con la altura. Normalmente durante el día ocurre hay un máximo de temperatura a la altura de mayor densidad foliar pues una mayor concentración de hojas permite mayor absorción de radiación. Por encima de esta altura el perfil es inestable: encontramos menores temperaturas a mayor altitud, y bajo dicha altura invertido: mayor temperatura a mayor altura (Villalobos, 2002).

Durante la noche, el perfil en el interior de cubierta es frecuentemente isoterma, debido a que el cultivo atrapa y reemite la radiación que emite el suelo. Sobre el cultivo, el perfil es invertido, mayor temperatura a mayor altura. Provocando que las oscilaciones térmicas entre el día y la noche sean mayores a menor altura (Villalobos, 2002).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Estos patrones pueden verse modificados por muchos factores cómo, por ejemplo, la acción del viento que va a homogenizar el perfil de temperaturas o por una alta nubosidad. (Hernández, 2013).

3.1.3.3.1. Patrones y perfiles de temperatura en el suelo

La evolución horaria y anual de las temperaturas del suelo sigue un patrón sinusoidal, pero con menores amplitudes que la evolución de las temperaturas del aire.

El desfase presente entre radiación y temperatura del aire que hemos comentado anteriormente se vuelve más acusado en cuanto a la temperatura del suelo y del aire, de unas tres horas para las máximas.

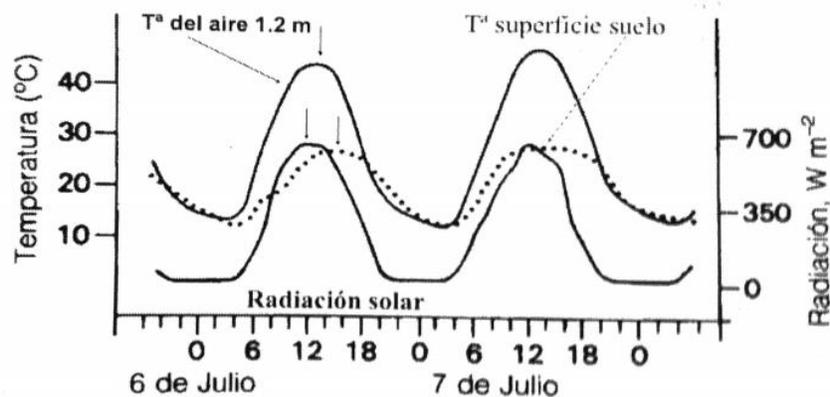


Figura 11. Evolución diaria de radiación solar, de la temperatura del aire y del suelo (Hernández, 2013).

El flujo de calor al suelo durante el día produce una conducción de calor hacia las capas más profundas, mientras que por la noche este proceso se invierte y son las capas más profundas las que ceden calor a las más superficiales y estas a las capas de aire más próximas al suelo. De esta manera se generan distintos perfiles de temperatura en función de la profundidad. La amplitud térmica va a reducirse y el desfase agrandarse conforme nos alejemos de la superficie. Los perfiles de temperatura en el interior de la cubierta son bastante distintos de los observados sobre la cubierta del mismo.

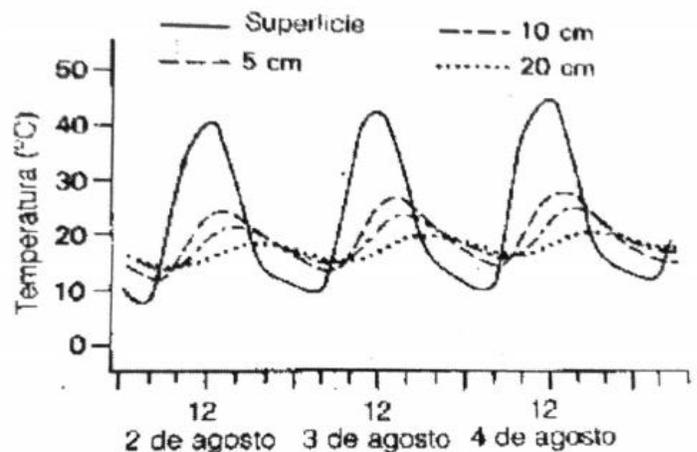


Figura 12. Evolución diaria de la temperatura del suelo a diferentes profundidades (Hernández, 2012).

3.1.4. Concentración de CO₂ o Anhídrido Carbónico

El carbono, C, constituye el 40-45% del total de materia de las plantas. Se absorbe como CO₂ de la atmósfera. La concentración considerada óptima de CO₂ en el ambiente es aquella con la que las plantas alcanzan un 98% de la tasa máxima de crecimiento y se sitúa entre las 600 y 1000 ppm. La concentración normal en el aire ambiente es de 400 a 415 ppm (Martínez et al., 2007)

La concentración de CO₂ atmosférica durante los mil años previos a la revolución industrial rondaban los 270 ppm ($\mu\text{mol mol}^{-1}$). En 2009 se estimó un valor medio de 384 ppm, un 40% superior que en los últimos 20 millones de años. (Pagani et al., 1999); (Pearson y Palmer, 2000). Existen predicciones que plantean que para mediados de siglo llegaremos a las 500 ppm y para finales a 700ppm (Prentice et al., 2001).

Es bien sabido, que la actividad fotosintética aumenta con la concentración de CO₂ atmosférico. La entrada en la planta se realiza principalmente a través de los estomas desde la capa límite y depende del gradiente de concentraciones entre esta y el interior de la cámara subestomática.

La abertura estomática se ajusta en principio a las necesidades fotosintéticas de la planta. Así, una determinada demanda de CO₂ requiere un gradiente (Barceló Coll, 2001).

Conforme disminuye la concentración de anhídrido carbónico (CO₂) en la atmósfera, la abertura de los estomas aumenta, por lo que la resistencia estomática desciende y en consecuencia se incrementa la velocidad de flujo de CO₂ y de vapor de agua (Barceló Coll, 2001).

El margen de concentraciones de CO₂ al que los estomas son sensibles está en la mayoría de las plantas dentro de sus concentraciones habituales en la atmósfera (100 - 500 ppm). La respuesta estomática a los cambios en las concentraciones de es rápida, en 5 segundos ya se ha llevado a cabo la mitad de la magnitud final de respuesta. (Barceló Coll, 2001).

3.1.4.1. Influencia de la concentración de CO₂ en los cultivos

3.1.4.1.1. Influencia de la concentración de CO₂ sobre la fotosíntesis

Cuando se analiza la respuesta de la fotosíntesis neta para diferentes niveles de CO₂, se observa que la concentración ambiental se sitúa en la pendiente máxima de esta relación. Cualquier aumento o disminución de esta supone un cambio muy notable sobre la asimilación neta.

Como hemos desarrollado anteriormente (fotosíntesis), la actividad fotosintética depende de un gran número de factores, principalmente a la radiación que intercepta el cultivo. Esta depende a su vez de la radiación incidente y del LAI (Índice de área foliar), y de la concentración de CO₂ en la cámara subestomática, que va a depender de la concentración exterior para plantas C3.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

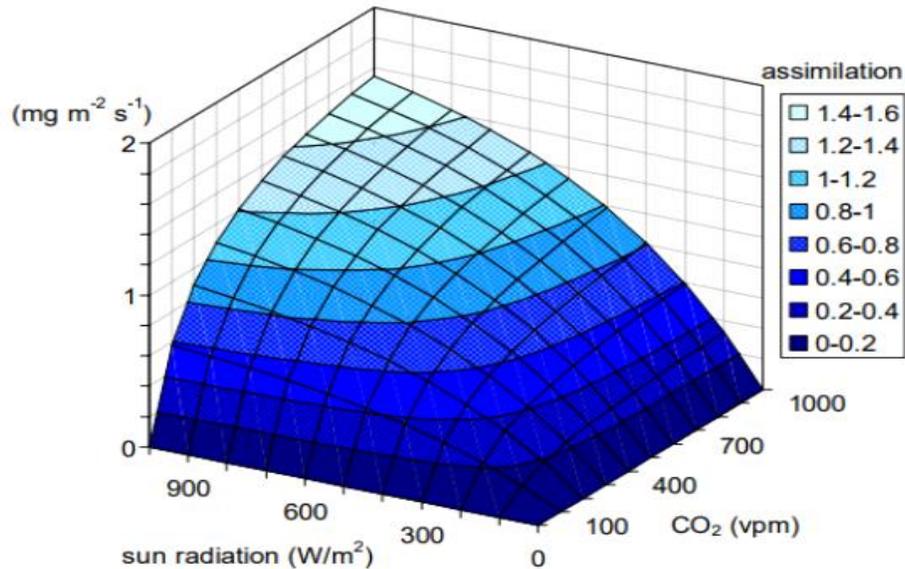


Figura 13. Asimilación neta ($\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$) de cultivo de tomate frente a la radiación incidente (W m^{-2}) y concentración de CO_2 (vpm) (Nederhoff, 1994).

Existen valores límites para ambos factores (CO_2 y radiación) en los que el crecimiento prácticamente no aumenta y bajo los cuales el cultivo puede incluso sufrir daños. En el caso de un aumento indefinido del CO_2 para plantas C_3 , se debe a que se supera la capacidad para regenerar la ribulosa-1, 5-bisfosfato (RuBisCO), el aceptor primario de CO_2 .

La PEP carboxilasa de C_4 tiene mucha más afinidad por el CO_2 que la RuBisCO. El C_4 al tener un mecanismo de concentración de CO_2 , en el momento en el que suba la concentración de CO_2 atmosférica rápidamente se satura.

Lo que puede suponer una desventaja frente a las plantas C_4 si la concentración de nuestro microclima desciende mucho respecto a la atmosférica afectando drásticamente a la fotosíntesis, o una ventaja si este posee una mayor concentración de CO_2 , aumentando la actividad fotosintética notablemente (Azcón y Talón, 2013)

Estos valores límite dependen de parámetros

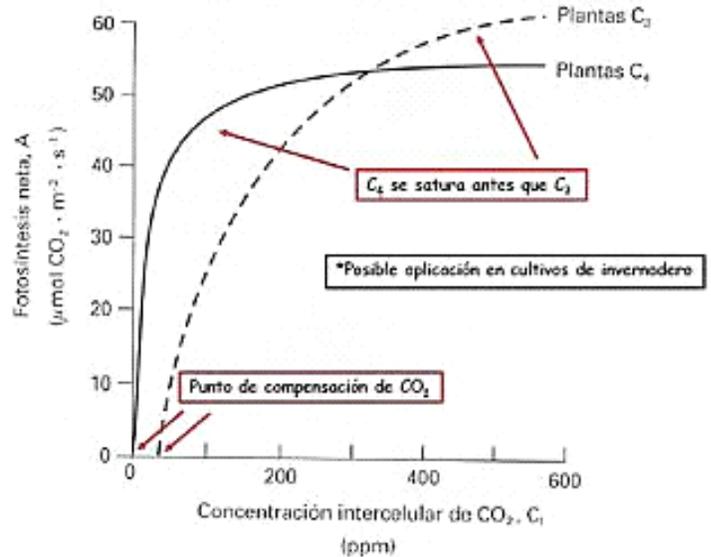


Figura 14. Asimilación neta ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) de una planta C_3 y C_4 frente a la concentración de CO_2 (ppm).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

como el tipo y grado de desarrollo del cultivo, y del valor del otro factor. Es decir, para una misma planta bajo condiciones de radiación diferentes el valor límite para la concentración de CO₂ en el que la planta no aumenta su actividad fotosintética será más alto para la planta que esté sometida a mayor radiación (Edwards, 2008).

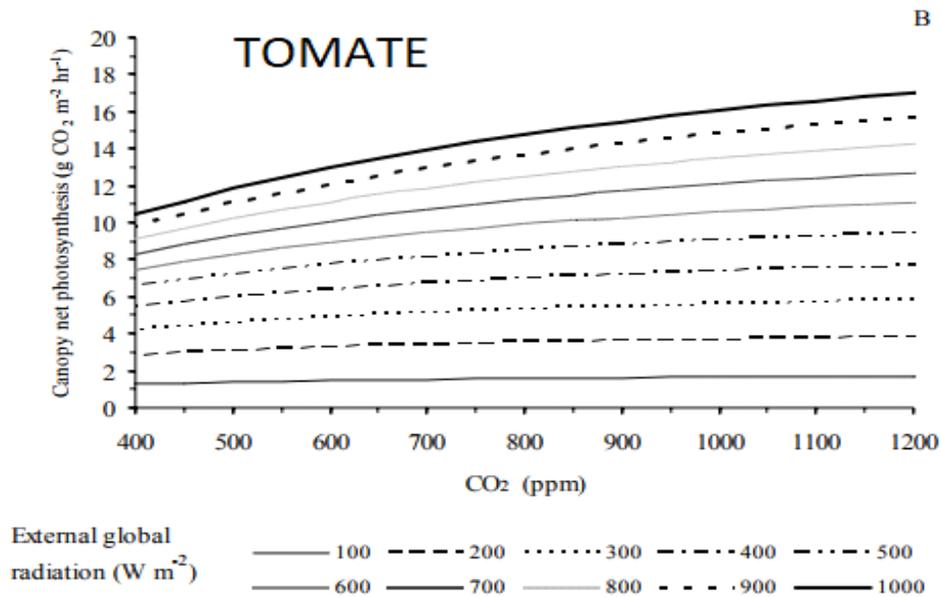


Figura 15. Asimilación neta en hoja ($g CO_2 m^{-2} h^{-1}$) de una planta de tomate frente a la concentración CO₂ (ppm) para diferentes valores de radiación global externa ($W m^{-2}$) (Edwards, 2008).

La concentración de CO₂ también va a influir en el punto de temperatura óptimo para los procesos fotosintéticos.

En condiciones de CO₂ saturante, la temperatura óptima a la cual se consigue la mayor tasa de fotosíntesis es mayor de 25°C, la curva es parecida a la curva de C4 (Azcón y Talón, 2013).

3.1.4.1.2. Influencia de la concentración de CO₂ sobre la transpiración

El empobrecimiento de los niveles de CO₂ es muy desfavorable para el crecimiento de los cultivos. La resistencia estomática puede disminuir un 50% bajo condiciones de entre 350 a 200 ppm de CO₂ (Stanghellini y Bunce, 1993), produciendo mayor sensibilidad a daños en el cultivo por déficit hídrico (Sánchez-Guerrero et al., 2010).

3.1.4.2. Problemas asociados al empobrecimiento de la concentración de CO₂

Durante las horas de luz y con un cultivo desarrollado es de esperar que le produzca un empobrecimiento de los niveles de CO₂ en el invernadero debido a los procesos fotosintéticos del cultivo. En invernaderos comerciales se ha puesto de manifiesto el descenso en la concentración de CO₂ interior entorno al 20% (respecto a la concentración exterior) (Lorenzo et al., 1990) incluso cuando las ventanas están abiertas.

Las pérdidas en el rendimiento de tomate se estiman de 2.5 a 5% por cada 35 a 70 ppm por debajo de los niveles del ambiente. En consecuencia, el productor debe prevenir un descenso por debajo de los 350 ppm, situación que puede solventarse con una correcta tasa de ventilación (Marlow, 2011).

La optimización de la ventilación natural es por tanto una de las opciones más económicas y eficientes para reducir este detrimento de los niveles de CO₂.

Por otro lado, se debe considerar que cuando la actividad fotosintética en el invernadero es alta debido a una alta radiación y un dosel foliar desarrollado, puede no alcanzarse el valor exterior de CO₂. Ciertos registros de invernaderos con ventilación pasiva durante todo el ciclo de producción indican que la concentración de CO₂ más habitual es de 250 a 300 mmol mol⁻¹ durante las horas radiactivas (Sánchez-Guerrero et al., 2005).

3.1.4.3. Perfiles de CO₂

La concentración de CO₂ en un invernadero sufre un ciclo anual y diario, que dependerá principalmente de la tasa de ventilación en cada momento y de la actividad fotosintética del cultivo (Scurlock y Hall, 1991).

La figura 16 muestra la evolución de la concentración de CO₂ en un invernadero ventilado de Almería y de Sicilia en relación con la radiación 19 noviembre de 2006 para una concentración exterior de 378 ppm. Como podemos apreciar los descensos más drásticos se dan en las horas de mayor radiación cuando la tasa de absorción de la planta es más alta.

Durante la noche, exceptuando un cultivo de plantas tipo CAM, cabe esperar un ascenso progresivo de la concentración de CO₂ hasta alcanzar valores próximos a 700ppm antes de la salida del amanecer debido a la respiración del cultivo si está desarrollado y no se ventila. Lo que puede suponer un incremento productivo importante durante las primeras horas de la mañana, dependiendo de las necesidades de ventilación, debido esta alta concentración de CO₂, siempre y cuando la humedad durante la noche no sea muy alta y el invernadero requiera ventilación para reducir posibles enfermedades y patologías derivados

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

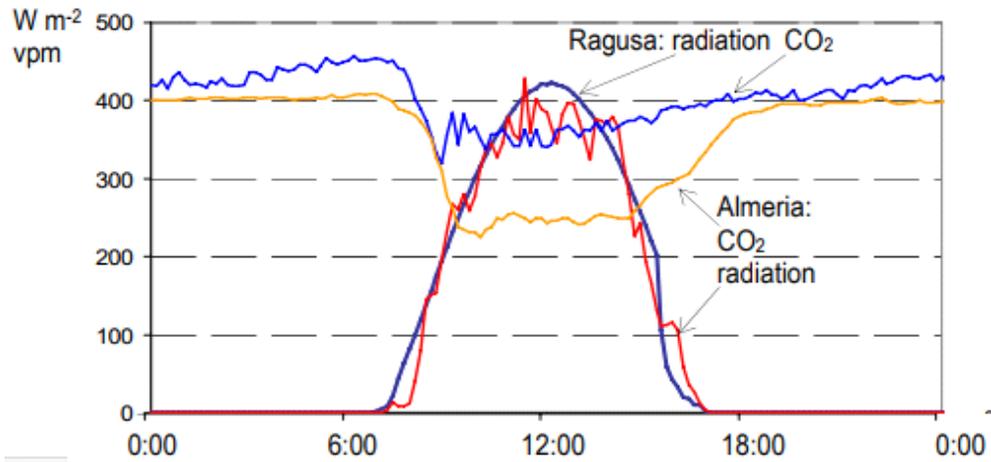


Figura 16. Evolución de la concentración de CO₂ en un invernadero ventilado de Almería y de Sicilia frente la radiación(W/M2) el 19 noviembre de 2006 (Stanghellini et al., 2007).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

3.2. Cambio climático

Los efectos del cambio climático, por otra parte, suscitan un aumento significativo de las temperaturas medias, así como las máximas en zonas de clima cálido como en Almería.

Para analizar la evolución espacial del incremento de la temperatura media anual, se han seleccionado los escenarios A2 y B1, que definen el rango más amplio de posibilidades de cambio y el modelo de circulación general CNCM3.

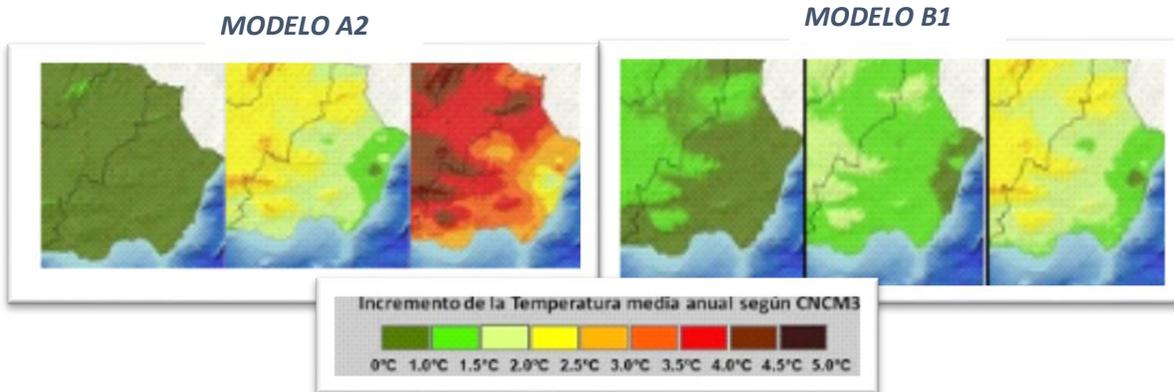


Figura 17. Evolución de las temperaturas medias en este siglo en la provincia de Almería según modelos A2 y B1 (juntadeandalucia.es/medioambiente).

Observamos el incremento de 1,8 °C para el modelo B1 y de 4,3 °C para el A2, para finales de siglo (Figura 18).

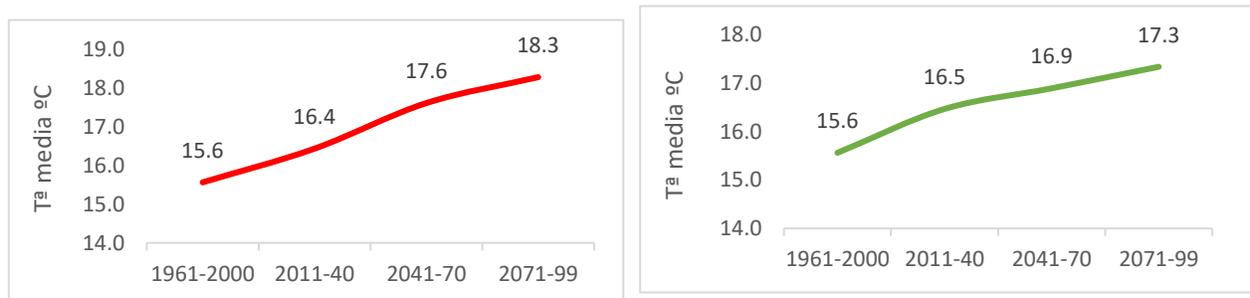


Figura 18. Evolución de las temperaturas medias en este siglo en la provincia de Almería según modelos A2 y B1 (juntadeandalucia.es/medioambiente).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

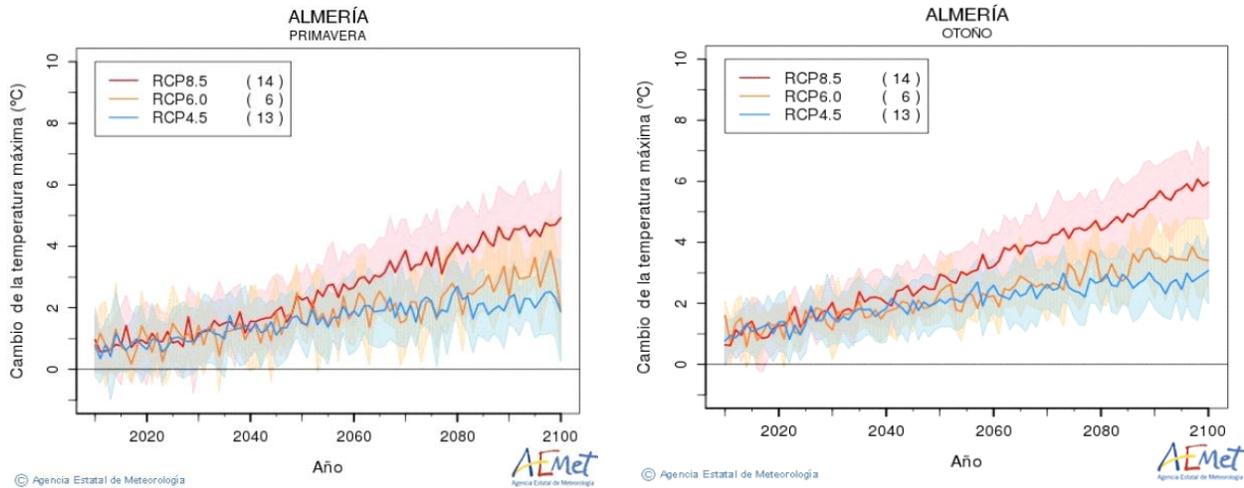


Figura 19. Previsión del incremento de las temperaturas máximas (°C) de otoño y primavera durante el siglo para modelos RCP8.5 (---), RCP6.0(---), RCP4.5(---). Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medioambiente. Agencia estatal de meteorología (A. E. Met.).

Respecto a las temperaturas máximas en primavera y otoño según los datos del ministerio, las previsiones sugieren un incremento importante de las mismas. (Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medioambiente, 2017).

Tabla 3. Previsión del incremento de las temperaturas máximas (°C) de otoño y primavera para final de siglo y 2060 según modelos RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5.

MODELO	RCP8.5	RCP6.0	RCP4.5
OTOÑO 2060	3	2	2.5
PRIMAVERA 2060	2.6	1.8	1.8
OTOÑO 2100	6	3.5	3
PRIMAVERA 2100	4.9	3.8	2

Si la temperatura media exterior para poder cultivar en invernaderos (Von Elsner B., 2000), debe oscilar entre los 12 y 22°C para un correcto desarrollo de la práctica agrícola y suponemos que la importancia de procesos de refrigeración en invernaderos en la provincia de Almería aumenta de manera importante de cara a los próximos años.

3.3. Viento

El viento puede considerarse el fenómeno natural el cual intentamos reproducir mediante la ventilación. Los movimientos de masas de aire en la inmediación de los cultivos van a definir el microclima.

Presenta efectos beneficiosos para los cultivos, como por ejemplo facilitar el transporte turbulento de vapor de agua, y calor, afectando por ende a la fotosíntesis, la transpiración y la respiración. Además de perjudiciales: puede dar lugar a daños mecánicos en plantas y frutos; propagación de plagas y enfermedades; e incluso procesos transpirativos excesivos (Villalobos, 2002).

Sin embargo, las incidencias de estos efectos dañinos para el cultivo van a verse reducidas por la acción de la estructura de los invernaderos como cortavientos, siendo además una buena opción el cierre total o parcial de las ventanas para vientos excesivos.

3.3.1. Transporte turbulento

Cuando analizamos los movimientos de masas de aire encontramos dos zonas:

- Subcapa laminar o capa límite. Es una capa de apenas unos milímetros que se encuentra en la superficie del cultivo o del suelo, donde los procesos de transferencia se producen exclusivamente por difusión molecular. En la hoja se conoce como capa límite, en ella se producen intercambios de vapor de agua y CO_2 con la cámara estomática. Ambos presentan una restricción o resistencia al movimiento de CO_2 , agua y a la transferencia de calor, que se expresan en s m^{-1} (Hernández, 2013).
- Capa turbulenta. Tiene un espesor de 50 a 100 metros. En ella se producen procesos continuos de movimientos de aire llamados torbellinos o eddies, considerados pequeños paquetes de vapor de agua, CO_2 , calor, etc... (Hernández, 2013).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

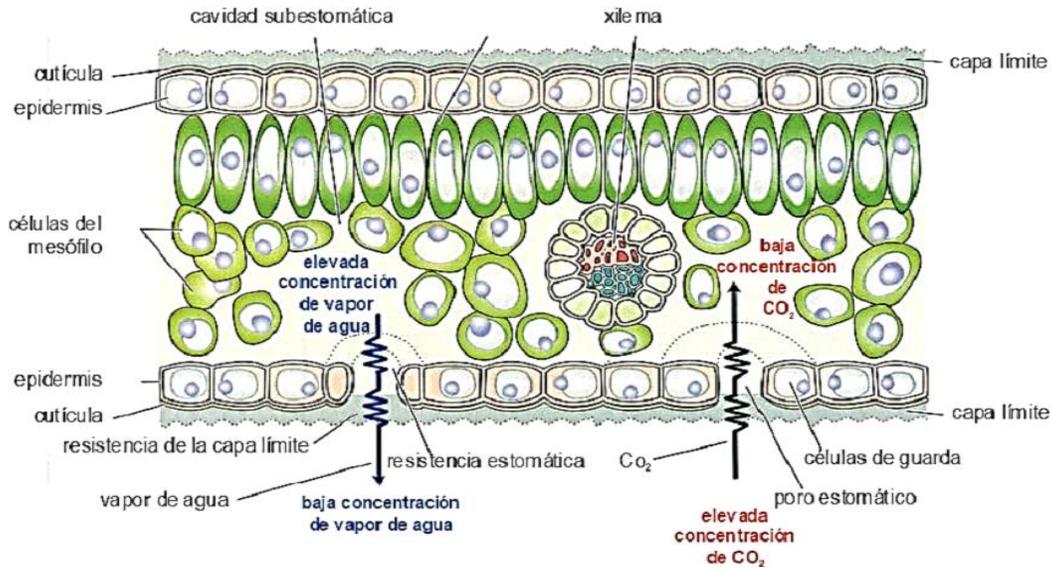


Figura 20. Estructura celular de una hoja y flujo de CO₂ y vapor de agua en la misma (Edwards, 2008).

Cuando no existe turbulencia la resistencia de la capa límite es alta. k_h es el coeficiente de turbulencia que suele oscilar entre 100 cm s^{-1} y 10^5 cm s^{-1} . En la imagen 2 podemos observar que el flujo de vapor de agua en condiciones de aire quieto, es decir para un valor de k_h pequeño, es bajo (Hernández, 2013).

Si no existe un transporte turbulento el vapor de agua que sale por los estomas llevaría a condiciones muy próximas a la saturación a la capa límite, limitando la transpiración. Además de imposibilitando la renovación de CO₂, reduciéndose la actividad fotosintética (Hernández, 2013).

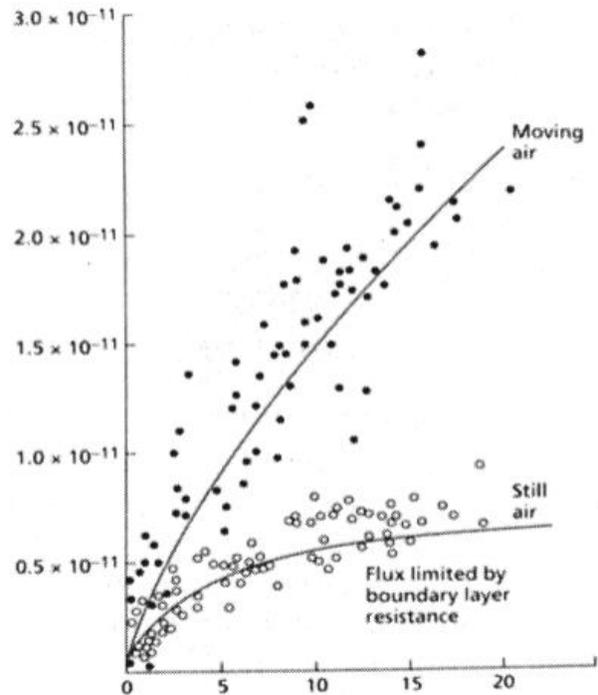


Figura 21. Abertura estomática (μm) frente a flujo transpirativo ($\text{g vapor de agua} \cdot \text{m}^{-2} \text{ superficie de hoja} \cdot \text{s}^{-1}$) (Hernández, 2013).

3.3.2. El viento en Almería

Aunque existen bastantes tipos de vientos en la provincia de Almería, los más representativos para nuestro estudio y los más frecuentes se consideran el Levante y el Poniente (Kuciauskas et al., 1998).

El viento de levante se forma por la diferencia de presión entre una o varias borrascas en el Atlántico y un anticiclón debajo (norte de África). La cantidad de humedad de la que se carga depende del recorrido que siga. En la provincia de Almería por lo general se considera un viento de dirección suroeste-oeste (Molina, 1990).

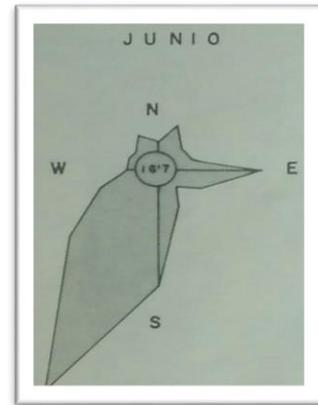


Figura 22. Frecuencias anuales de las direcciones del viento en Almería en el mes de junio y anualmente, respectivamente (Molina, 1990).

El viento del poniente, por otro lado, es un viento del oeste, se desplaza con dirección este y que a medida que avanza pierde la humedad y gana temperatura, por lo que provoca temperaturas altas y ambiente seco en la costa del levante y sur de Cataluña. Sin embargo, en la provincia de Almería se considera un viento de dirección noreste-este (Sail and Trip S.L., s.f.).

Para la situación concreta de nuestro invernadero, podemos considerar el viento de Poniente como un viento predominantemente húmedo y fresco, comprendido entre los 180 y 270 ° en nuestra rosa de los vientos. En el cuanto al Levante, lo consideramos como seco y cálido que abarca desde los 45 hasta los 135° (Kuciauskas et al., 1998).

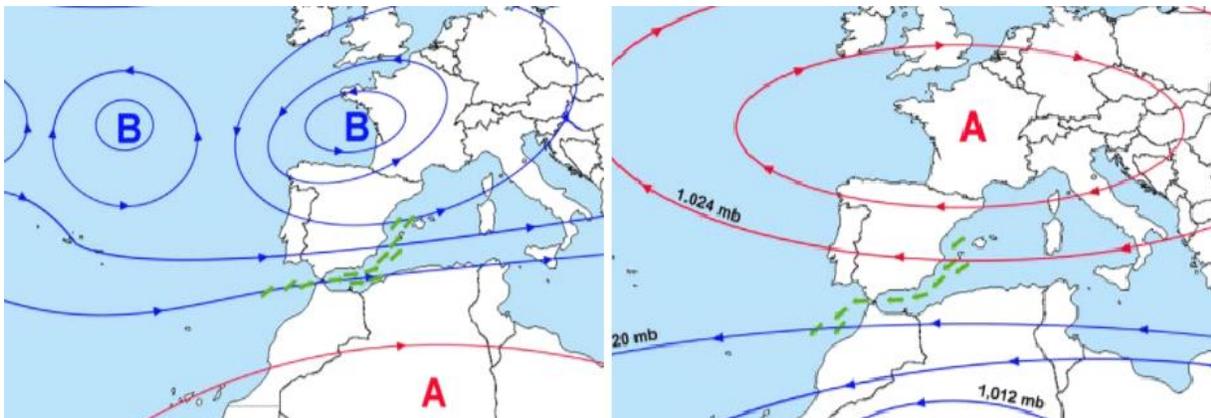


Figura 23. Viento de Poniente a la izquierda y viento de Levante a la derecha (Sail and Trip S.L.).

3.4. Invernadero Multitúnel

El invernadero multitúnel, también llamado de tipo industrial, se caracteriza por la forma semicilíndrica de su cubierta y por su estructura completamente metálica (Figura 24). Este tipo de invernadero se está extendiendo en la actualidad en explotaciones tecnificadas, por su mayor capacidad para el control de las variables micro-climáticas.

En estos invernaderos se han eliminado los entramados de alambre típicos. Las ventajas de los invernaderos con cubierta semicilíndrica son varias:

- La separación de los apoyos permite la entrada de maquinaria en el invernadero.
- La elevada altura de estos invernaderos promueve la circulación del aire.
- Presentan una buena estanqueidad a la lluvia y al aire, lo que permite utilizar métodos de control climático
- Su cubierta curva permite un buen aprovechamiento de la radiación solar

Sus inconvenientes más representativos son:

- Su elevado precio de construcción, en torno a 12-25 €/m².
- El plástico está poco sujeto a la estructura.

(Valera Martínez et al., 2014)

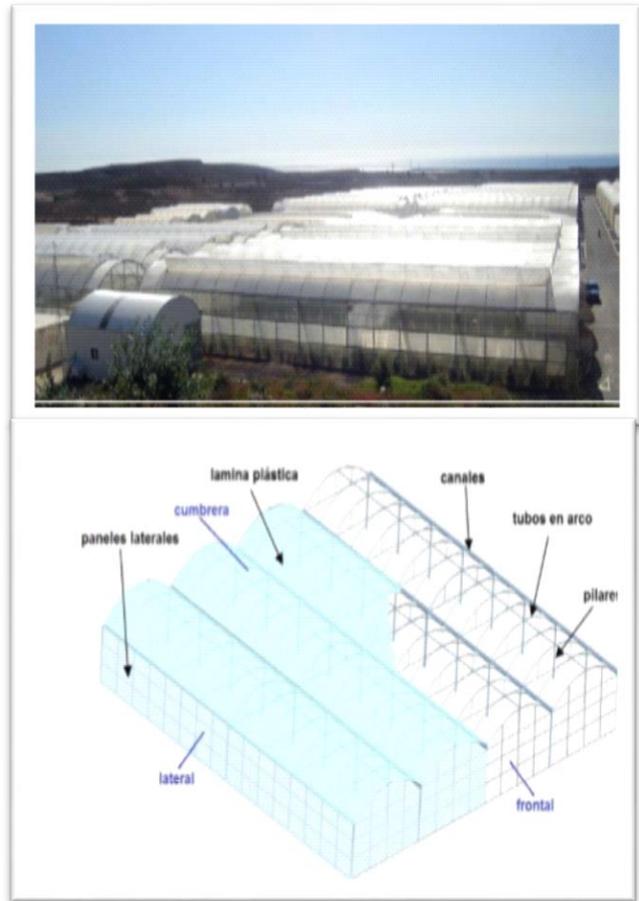


Figura 24. Arriba: Fotografía de invernadero tipo multitúnel de la finca experimental ANECOP. Abajo: Esquema estructural y partes de invernadero tipo multitúnel (Valera et al., 2014).

3.5. Situación y Orientación

Para obtener un resultado representativo en nuestro estudio es de vital importancia tener en consideración los aspectos tanto de situación como de orientación con el fin de recrear unas condiciones lo más parecidas posibles a un invernadero estándar bien diseñado en la provincia de Almería y que permitan llevar a cabo procesos de ventilación natural sin problemas de falta de viento.

Deben evitarse zonas sombrías y húmedas, aquellas excesivamente expuestas a la acción directa de fuertes vientos y las zonas donde la presencia de otros invernaderos puede dificultar en exceso



Figura 25. Imagen aérea del invernadero donde se desarrolla en experimento localización: 36°51'53.2"N 2°16'58.8"W. Fuente: googlemaps.

la ventilación natural, ya que este es el principal método de control climático en los invernaderos almerienses.

Otro de los factores que hay que considerar es su orientación. En los invernaderos es recomendable que las líneas de cultivos se dispongan de manera paralela a la dirección de los vientos dominantes, aumentando así el número de renovaciones de aire por hora (FAO, 2002).

Desde el punto de vista de la ventilación, la mejor orientación de sus ventanas es la perpendicular a los vientos dominantes en primavera y verano, cuando la ventilación se

hace más necesaria. Sin embargo, esta práctica en la provincia de Almería supone una disminución en la cantidad de radiación de nuestro microclima.

Para una correcta interpretación de los datos recogidos, debemos tener en cuenta posibles obstáculos en el terreno que puedan influir en la dirección, velocidad y distribución de las masas de aire. La finca donde va a desarrollarse el estudio se encuentra junto a otro invernadero multitúnel en su cara suroeste, además en su cara nordeste está próximo a pequeña nave (Imagen 9). También debemos considerar que cabe esperar la entrada de aire más seco por las ventanas orientadas dirección Nordeste debido al viento de Levante. Y más húmedo a través de aquellas orientadas dirección Sureste debido al viento de Poniente.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERNADERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

El ángulo de incidencia del viento sobre las ventanas, no parece tener una importancia significativa, tanto en los invernaderos de tipo venlo, con ventanas discontinuas (Fernández, 1993);(Campen, 2003) como en los invernaderos multitúnel (Boulard, 1995) o tipo Almería (Campen y Bot, 2003), con ventanas continuas a lo largo de todo el invernadero. Pero suele ser importante el sentido del viento ya qué, la efectividad a barlovento o sotavento de las ventanas varía (Valera Martínez et al., 2014).

Finalmente, es importante tener en cuenta debido a la latitud en la que se encuentra España, aquellas zonas de un invernadero situadas más al sur, van a recibir una mayor cantidad de radiación que las partes localizadas al norte principalmente en invierno, debido la trayectoria que describe el sol respecto los puntos cardinales (Castilla N., 2007).

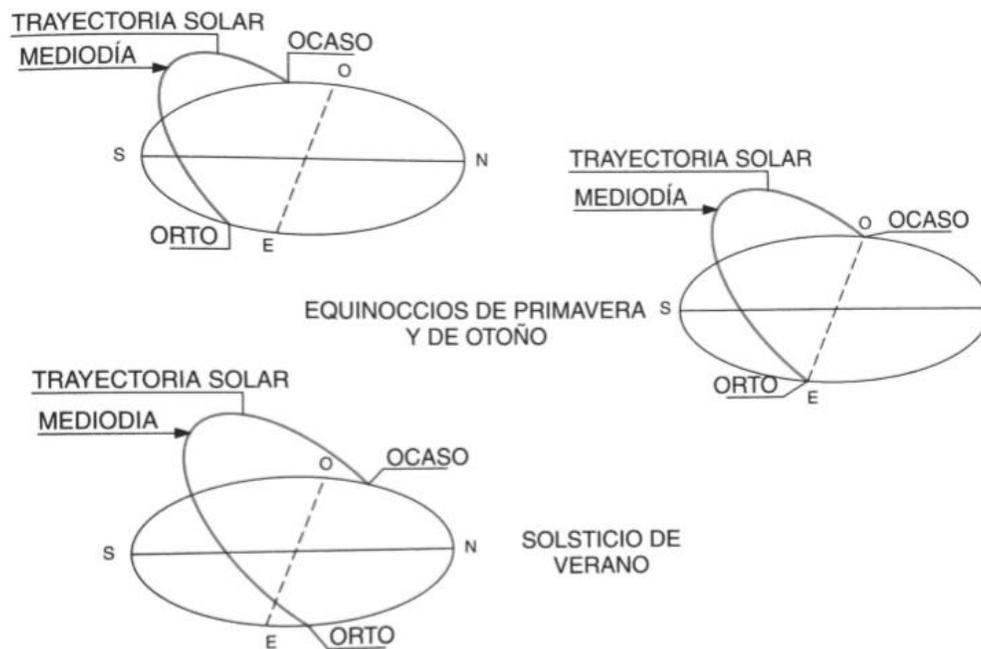


Figura 26. Trayectoria aparente del sol con respecto al plano del horizonte en latitudes medias del hemisferio norte, en el solsticio de invierno, en los equinoccios de primavera y otoño y el solsticio de verano (Castilla N., 2007).

3.6. La Ventilación

Si consideramos un umbral de temperaturas medias exteriores entre 12 y 20°C para poder cultivar en los invernaderos utilizando únicamente ventilación natural (Von Elsner B., 2000), se observa que en zonas cálidas como Agadir (Marruecos) o Almería (España) no son necesarios otros sistemas de climatización. Por otra parte, en zonas frías como Holanda o Francia el uso de calefacción es imprescindible la mayoría del año. (Figura 27). (Molina-Aiz et al., 2017).

Rigurosos estudios han comprobado una correlación entre la producción de 6 cultivos de tomate y la capacidad máxima de ventilación en los invernaderos. Produciéndose un incremento en la productividad de los cultivos de tomate de un 1% por cada 1% de incremento de la superficie de ventilación aproximadamente (Molina-Aiz et al., 2017; (Vanthoor B.H.E., 2008)) además observaron un aumento de producción de 0.63% por cada 1% en la superficie de ventilación (Zwart, 1996). Quedando patente el interés económico de invertir en mejorar la ventilación pasiva, al obtenerse un aumento de la producción a partir de un costo muy reducido, siendo de aproximadamente 12-15 € el precio por metro lineal de ventana instalada (Molina-Aiz et al., 2017).

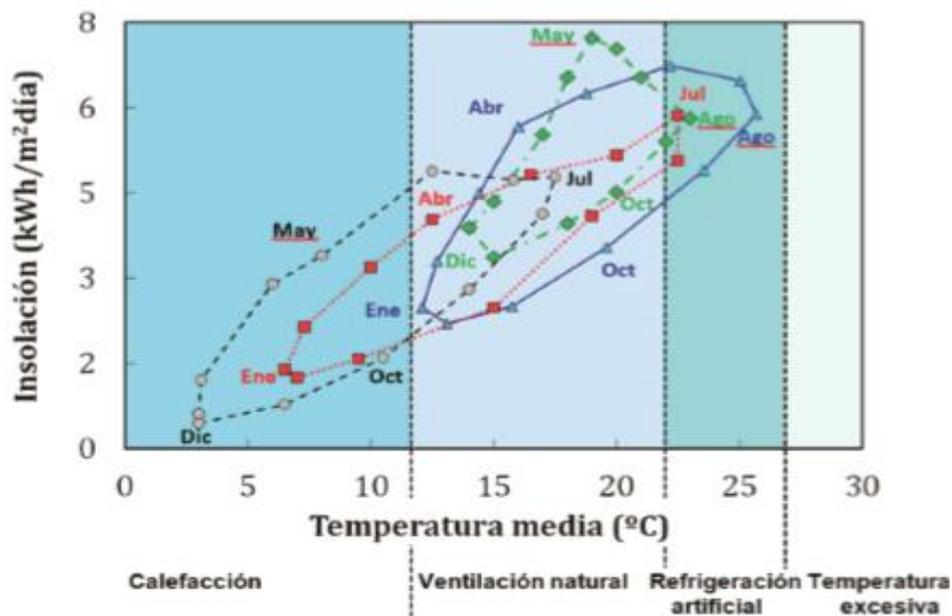


Figura 27. Insolución media diaria con respecto a la temperatura media diaria correspondiente a las ciudades de: Almería en España (▲) durante el periodo 1934-2003 (Molina-Aiz, 2010); Agadir en Marruecos (◆) durante el periodo 1971-2000 (Hassan, 2013); Toulouse en Francia (■) durante el periodo 1980-2009 (Felten et al., 2011); De Bilt en Holanda (●) durante el periodo 1976-2005 (Klein Tank y Lenderink, 2009).

Otros estudios climáticos tan cerca de las ventanas laterales como alejados de ellas arrojaron

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

valores de temperaturas excesivas de hasta 10 °C superiores a las exteriores, suponiendo una pérdida productiva del 40% (Arellano et al., 2003 (Molina-Aiz et al., 2003) (Valera Martínez et al., 2014)).

La mayoría de los estudios en ventilación se han basado en estimar de forma global el nivel de intercambio de aire de un invernadero mediante un gas trazador (Rüther, 1985); de Jong, 1990; (Fernández, 1992); (Boulard y Draoui, 1995); (Kittas et al., 1997) (Papadakis et al., 1996) (Baptista et al., 1999). La mayor parte de la información disponible hasta la fecha sobre el efecto de los parámetros de ventilación que influyen en el clima interior y en la producción, procede de trabajos experimentales que suelen usar invernaderos vacíos y pequeños, módulos aislados y modelos a escala.

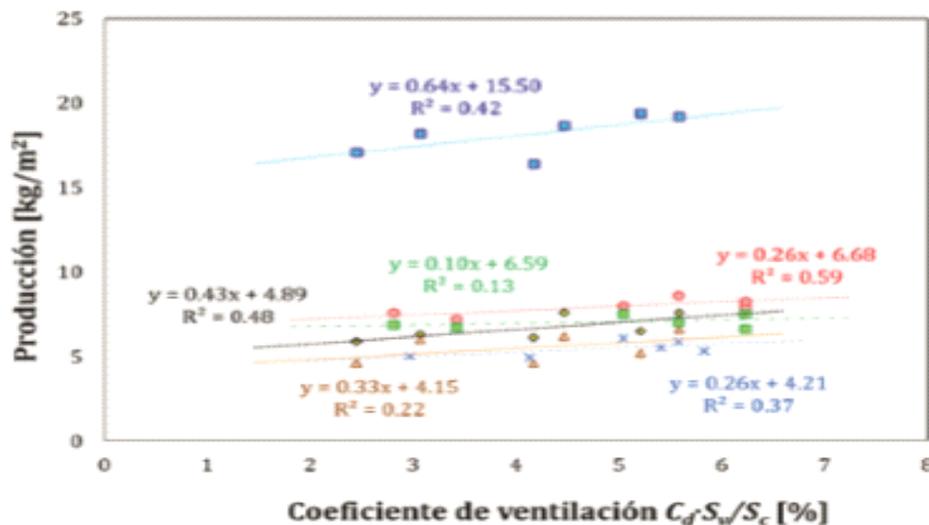


Figura 28. Efecto de la relación entre la superficie máxima de ventilación S_v y la superficie de suelo cubierta S_c (multiplicado por el coeficiente de descarga de las ventanas C_d con diferentes mallas anti-insecto) sobre la producción de 6 cultivos de tomate: Cherry primavera-verano 2008 (×); Ramo otoño-invierno 2008/09 (●); Cherry primavera-verano 2009 (■); Ramo ciclo largo 2011/12 (■); Ramo otoño-invierno 2012/13 (◆); Ramo otoño-invierno 2013/14 (▲) (Molina-Aiz et al., 2017).

Bajo determinadas circunstancias en las que la bajada de las temperaturas no supone un riesgo para los cultivos y la humedad externa no es muy elevada, la ventilación nocturna puede jugar un papel contra diferentes enfermedades como *Severyty* que afecta a las hojas del tomate por *Botrytis cinerea*, al reducir la humedad relativa (Baptista et al., 2001). La ventilación nocturna puede contribuir a evitar o disminuir la inversión térmica propia de este periodo.

3.6.1. Necesidades de ventilación

Considerando un rango de temperaturas medias exteriores entre 12°C y 22°C para poder cultivar en los invernaderos utilizando solo la ventilación natural (Von Elsner B., 2000), se observa como en zonas cálidas como Almería (España) y Agadir (Marruecos) no necesitan otros sistemas de climatización cuando la climatología corresponde a los valores medios (Molina-Aiz et al., 2017).

Las necesidades de ventilación, por otro lado, son variables y deben ajustarse en cada momento a los requisitos climáticos de desarrollo de los cultivos, y principalmente a las condiciones climáticas exteriores (Molina-Aiz et al., 2017).

Una ventilación efectiva debe cumplir tres criterios: Proporcionar un intercambio eficiente entre el invernadero y el exterior; garantizar una óptima mezcla entre el aire entrante y saliente del invernadero y crear un movimiento interno de aire que induzca un buen intercambio de calor y masa entre la planta y el aire (Valera et al., 2014). Cuanto más aire se haga circular por las ventanas, más se acercarán las condiciones interiores a las del aire exterior (Molina-Aiz et al., 2017).

La capacidad de renovación de aire necesaria en los invernaderos se puede medir en renovaciones de aire por hora (h^{-1}), que indica el número de veces que un volumen de aire igual al que cabe en un invernadero se ha intercambiado con el exterior en el tiempo de una hora. Otra forma de expresar su valor es el caudal de aire en (m^3s^{-1}), que se intercambia con el exterior dividido por la superficie de suelo cubierta por el invernadero en (m^2) (Molina-Aiz et al., 2017).

Ambos parámetros permiten comparar los niveles de ventilación de invernaderos de diferentes superficies. Aunque mediante la primera medida (en renovaciones de aire por hora) se tiene en cuenta la altura de los invernaderos, mientras que en la segunda ($m^3s^{-1} m^2$) solo se tiene en cuenta la superficie del invernadero, pero no su altura (Molina-Aiz et al., 2017).

Usando balances de energía se puede calcular la tasa de ventilación que es necesaria para establecer la diferencia una determinada diferencia entra la temperatura interior y el exterior del invernadero. La figura 29 muestra la relación entre la tasa de evapotranspiración del cultivo en invernadero, el salto térmico y la tasa de ventilación para una radiación solar global de 700 W/m² (Sánchez-Guerrero et al., 2010).

El efecto de la ventilación en la temperatura del invernadero no es de tipo lineal, más allá de una cierta tasa de ventilación (0,1 m³ s⁻¹ m⁻²) el efecto de refrigeración está muy limitado (Figura 29) (Seginer, 1997).

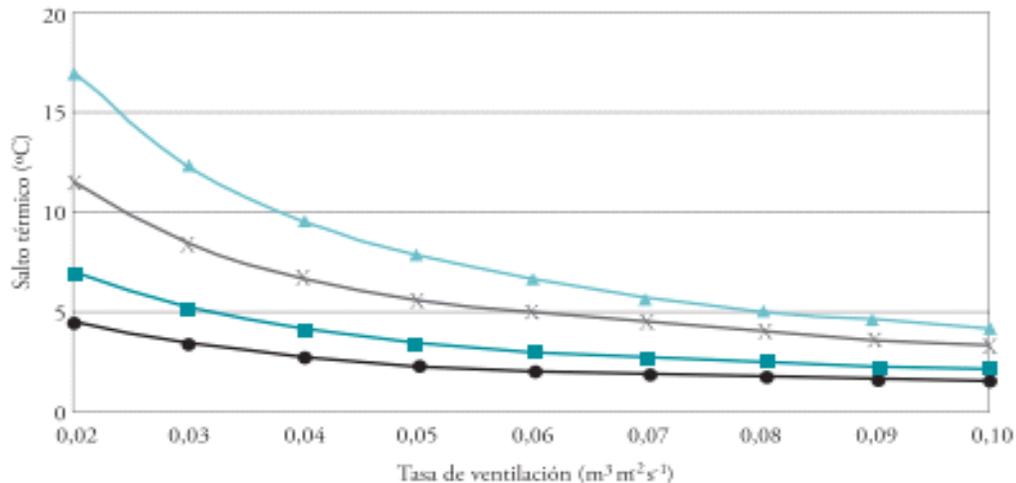


Figura 29. Diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior de un invernadero en función de la tasa de ventilación ($m^3 s^{-1} m^2$) para cuatro niveles de evapotranspiración del cultivo (LETP). En porcentaje de la radiación neta dentro del invernadero (Rn): 20 % (●), 50 % (x), 70 % (■) y 80 % (▲) (Sánchez-Guerrero et al., 2010).

La recomendación de capacidad de renovación necesaria varía entre 2 renovaciones por hora en invierno hasta 60, en verano (Buffington et al., 1987). Según Businger (1963), en verano es necesario un valor mínimo de 10 renovaciones por hora, siendo recomendables valores de 50 a 100. Del mismo modo los valores de renovación necesarios para obtener un salto térmico concreto varían dependiendo el nivel de evapotranspiración del cultivo entre 35 y 90 (ASAE, 2003), con un valor óptimo de 45-60 (Hellickson y Walker, 1983) También existen recomendaciones de valores de renovación de aire (1.5-3.5) necesarios para evitar condensación en la cubierta (Buffington et al., 1987).

3.6.2. Ventilación deficiente

Una ventilación deficiente puede dar lugar a una pérdida de productividad, de enfermedades y problemas fisiológicos de cultivo (Carmona, 2011). Además de déficits en la concentración de CO_2 que puede suponer, (Hand, 1984); (Lorenzo et al., 1990); (Lorenzo, 1994) van a limitar de esta manera la actividad fotosintética.

Humedades relativas excesivas que pueden provocar varios problemas: desequilibrios higrométricos que pueden originar deficiencias minerales como consecuencia de la restricciones en la transpiración por bajos valores de DPV (Lorenzo, 1994); (Mistriotis et al., 1997); condensación en la cubierta del invernadero, reduciendo la transmisibilidad del mismo y afectando de manera directa a la producción y posteriores desarrollos de enfermedades causadas

por hongos y bacterias (Hand, 1984); (Mistriotis et al., 1997).

Normalmente durante la noche se cierran las ventanas y se detienen los procesos de ventilación. Pero en ocasiones al producirse la inversión térmica, el aire del invernadero puede alcanzar la temperatura de rocío, condensando agua en los frutos y demás partes del cultivo. La ventilación puede solucionar o reducir este problema ayudando a igualar la temperatura interior a la exterior (Sánchez-Guerrero et al., 2010). Generalmente se pretenden prevenir valores altos de humedad relativa (Bailey, 1995).

3.6.3. Inconvenientes de la ventilación

La ventilación puede presentar inconvenientes para nuestro invernadero como:

La corriente de aire que se genera en el invernadero, procedente de las ventanas laterales o cenitales puede deshidratar en determinados momentos del año al cultivo (Carmona, 2011).

Cada vez es más frecuente instalar mallas muy tupidas en las ventanas para evitar la entrada de plagas. Lo que produce un descenso en la capacidad de ventilación, según su porosidad y estructura (Carmona, 2011).

Las altas necesidades de ventilación de los invernaderos de climas cálidos suponen un obstáculo para el uso de sistemas de fertilización carbónica que en otros climas más fríos y cuyos invernaderos requieren un menor número de renovaciones de aire al día, suponen un incremento de la notable de la productividad. Para tomate: 30-40% (Bailey., 2002).

3.6.4. Tipos de ventilación

La mejor forma de clasificar los tipos de ventilación es basándonos en la forma en que se realiza la renovación del aire.

3.6.4.1. Ventilación forzada

Es aquella en la cual se actúa activamente en el movimiento del aire del invernadero, se realiza mediante ventiladores o utilizando fuerzas térmicas que crean corrientes de aire a través de una abertura, como estufas, pudiendo considerarse como una ventilación combinada en este caso (Carmona, 2011).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Con el uso de los ventiladores se puede lograr un control más preciso de las condiciones medioambientales de un invernadero del que podría lograrse con el uso de la ventilación pasiva. Este produce un flujo horizontal de aire que proporciona ventajas para crear una distribución uniforme del clima (Walter y Duncan, 1973; (Koths, 1979); (Goeijenbier, 1984); (Bruggeret al., 1987).



Figura 30. Fotografía de ventiladores en un invernadero multitúnel (Carmona, 2011).

3.6.4.2. Ventilación natural

La ventilación natural es el sistema de control climático más importante en invernaderos de climas cálidos ya que permite actuar sobre tres de los cuatro parámetros (entre los que se incluiría la radiación solar) que definen el microclima en el cual se desarrollan los cultivos: la temperatura y humedad del aire y la concentración de CO_2 . Permite el intercambio de aire entre el interior del invernadero y el ambiente exterior, por lo que su eficacia en el control del clima depende de las condiciones exteriores, del caudal de aire que atraviesa las ventanas y de la forma en la que el aire circula dentro del invernadero y principalmente en la zona ocupada por el cultivo (Molina-Aiz et al., 2017).

Cuando las condiciones interiores son favorables y en el exterior el clima es excesivamente frío, como en las noches del periodo invernal, la ventilación ocasiona una pérdida de energía que conviene reducir al máximo. Por ello, los sistemas de ventilación deben permitir un cierre lo más hermético posible. Sin embargo, en zonas cálidas la mayor parte del tiempo las ventanas permanecerán abiertas, en mayor o menor grado según el intercambio de aire que sea necesario, con el fin de introducir aire más fresco del exterior, con diferente humedad y mayor concentración de CO_2 (Molina-Aiz et al., 2017).

3.6.4.2.1. Fundamentos mecánicos de la ventilación natural

La ventilación natural se produce por el movimiento originado por las diferencias de presión en las ventanas entre el interior y el exterior del invernadero que se generan debido a:

- El efecto del viento sobre la estructura.
- El efecto térmico, de flotabilidad o chimenea: el aire caliente menos denso asciende verticalmente, debido a la gravedad, sobre el aire de menor temperatura más denso.
- El efecto de la turbulencia del viento, generado por la presión de las fluctuaciones de la velocidad del viento a lo largo y a través de las ventanas (Molina-Aiz et al., 2017).

El efecto del viento provoca sobrepresiones en la zona de la estructura en la que el aire exterior incide de forma directa, denominada barlovento, y genera depresiones en la parte del invernadero no expuesta de forma directa al viento, denominada sotavento.

De esta forma, el movimiento de aire generado por el efecto eólico es predominantemente horizontal (Imagen 9a), de barlovento a sotavento, aunque la situación y diseño de las ventanas puede permitir que el aire se mueva siguiendo una línea ascendente o descendente. El efecto térmico siempre produce un movimiento vertical del aire caliente que asciende debido a su menor densidad con respecto al aire más fresco (Imagen 9b). En general, el aire exterior que entra por las ventanas está a menor temperatura que el del interior y, conforme va absorbiendo calor por convección al entrar en contacto con las diferentes superficies que hay dentro del invernadero, se va calentando y moviéndose hacia la parte más alta del invernadero, donde conviene situar las ventanas cenitales (Molina-Aiz et al., 2017).

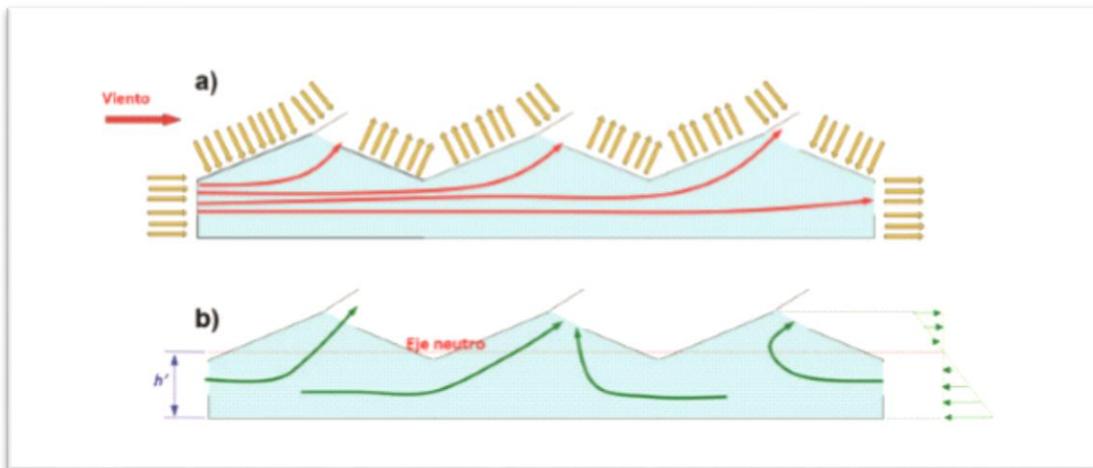


Figura 31. a) Flujos de aire debido al viento exterior y b) debido a la diferencia de temperatura (Molina-Aiz et al., 2017).

3.6.5. Situación de la ventilación en los invernaderos de Almería

Todos los invernaderos de Almería disponen de ventanas, las más utilizadas son las abatibles (Sánchez-Guerrero et al., 2010,).

En las últimas campañas desde la de 2000 se ha detectado una gran incorporación de ventanas cenitales fruto de una mayor preocupación en la mejora de la capacidad de ventilación en invernaderos. Durante los últimos 10 años, la Estación Experimental de la Fundación Cajamar, en colaboración con el IRTA ha llevado a cabo un amplio programa de trabajo encaminado a conocer los mecanismos responsables de la ventilación natural en un invernadero parral usando técnicas como el gas trazador, ensayos en túneles de viento y más recientemente simulación informática de dinámica de fluidos (CFD) que nos permitan optimizar los sistemas de ventilación natural (Sánchez-Guerrero et al., 2010).

Tablas 4 y 5. Distribución sistemas de ventilación lateral y cenital y su accionamiento en la provincia de Almería 2005/2006 (Sánchez-Guerrero et al., 2010).

Sistemas de ventilación lateral	Nº Invernaderos (%)	Superficie de invernaderos (%)	Sistemas de accionamiento (%) Nº		
			Control clima	Manual	Motorizado
Sin ventilación lateral	1,1	2,7			
Bandas plegables	94,3	91,8		92,9	
Ventanas enrollables	4,5	5,3	0,1	4,3	0,2
Ventanas abatibles	0,2	0,2		0,2	

Sistemas de ventilación cenital	Nº Invernaderos (%)	Superficie de invernaderos (%)	Sistemas de accionamiento (%) Nº		
			Control clima	Manual	Motorizado
Sin ventilación cenital	15,1	10,8			
Aperturas cenitales	40,0	35,1		40,0	
Ventanas abatibles	34,9	39,6	0,5	33,7	0,7
Ventanas piramidales	5,5	8,5		5,5	
Ventanas enrollables	4,5	6,0		4,5	

3.6.6. Ventanas

Además del tamaño de las ventanas, la posición, la forma y el funcionamiento tienen una gran importancia en cuanto a la capacidad de ventilación. Cada tipo de invernadero suele llevar asociado diseños propios de ventanas que se adaptan a su estructura y a las condiciones del viento característico de la zona, por lo que existen un gran número de tipos diferentes (Valera et al., 2014); (Molina-Aiz et al., 2017).

3.6.6.1. Distribución de las ventanas

Diferentes estudios (Pérez-Parra, 2004); (Baeza et al., 2009) muestran qué en zonas de clima cálido, y tanto si el invernadero ventila por efecto térmico o por efecto del viento, la mejor forma de garantizar un número adecuado de renovaciones es usar de manera conjunta ventanas laterales y cenitales (Sánchez-Guerrero et al., 2010).

En la figura 32 podemos apreciar un efecto sinérgico entre ambas, que va a depender de las dimensiones del invernadero, sobre todo de la distancia entre las ventanas laterales (ancho y/o largo). A partir de 40 m de ancho, las ventanas cenitales tienen mayor importancia que las laterales. Por ello en invernaderos de climas cálidos es recomendable limitar su anchura a 60 m. Así que para asegurar una buena ventilación natural es recomendable la construcción de invernaderos largos y estrechos combinando ventilación lateral y cenital (Sánchez-Guerrero et al., 2010).

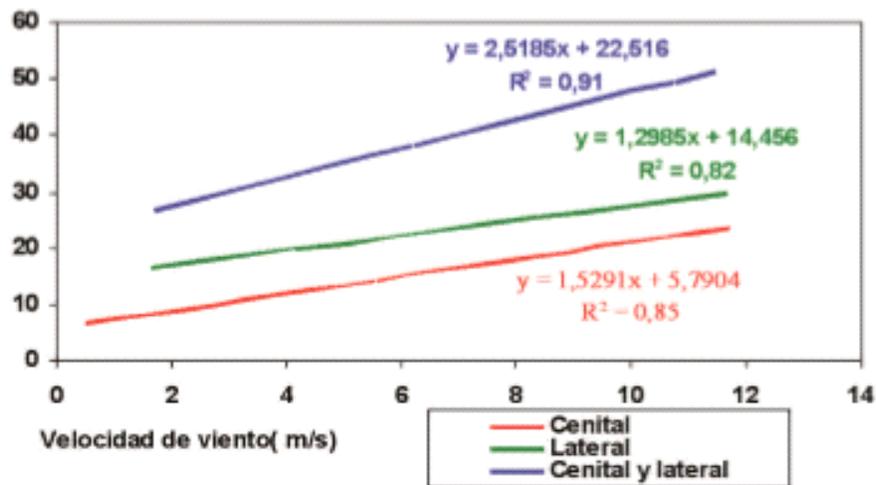


Figura 32. Tasa de ventilación para diferentes velocidades de viento con diferentes tipos de ventilación: cenital, lateral y combinada en un invernadero parral de 5 capillas (Sánchez-Guerrero et al., 2010).

En invernaderos individuales la superficie de ventanas laterales debe ser igual a la superficie de ventanas en el techo. Las ventanas cenitales deben poder formar un ángulo de 60 grados con el techo (FAO, 2002).

La orientación de las ventanas es fundamental sobre todo las laterales respecto a las líneas del cultivo. Un cultivo desarrollado dispuesto en líneas perpendiculares a las ventanas permite que el aire circule libremente entre las líneas de cultivo, mientras que si se disponen de forma paralela el propio cultivo interfiere en el flujo de aire oponiendo resistencia al mismo (Sease, 1989). La presencia de cultivo dentro del invernadero situado en líneas perpendiculares a las ventanas puede producir disminuciones en el flujo de ventilación de hasta un 28 % (Boulard et al., 1997b)

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERNADERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

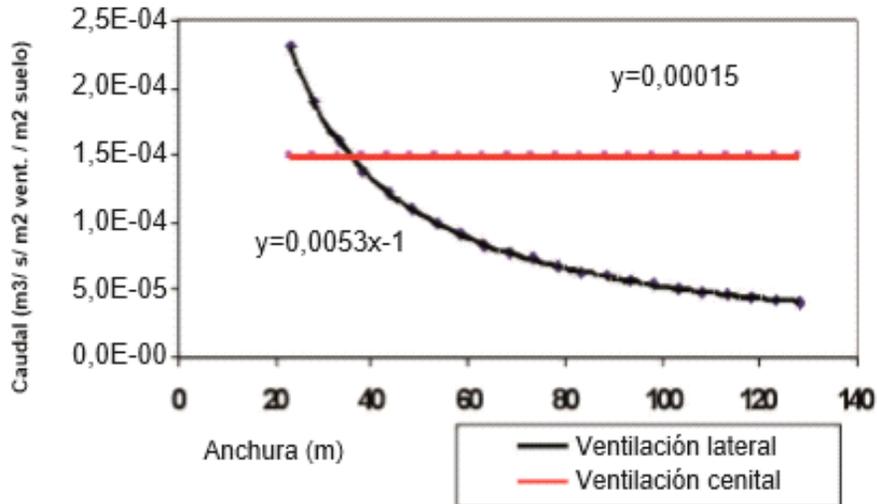


Figura 33. Progresión del caudal teórico de ventilación que aporta la ventilación lateral y cenital conforme aumenta la anchura del invernadero (Sánchez-Guerrero et al., 2010).

En el caso de invernaderos individuales o multimodulares con ventilación lateral, obtendremos la máxima tasa de renovación cuando estas se encuentren perpendicularmente a la dirección predominante del viento, mientras que, en el caso de estructuras multicelulares agrupadas con espacios entre dos estructuras, deben situarse paralelamente (FAO, 2002).

3.6.6.2. Tipos de ventanas y respuesta

Podemos considerar dos variantes fundamentales de ventanas: aquellas con un hueco en la cubierta del invernadero y las que tienen un alerón puede dirigir el movimiento. El primer sistema se utiliza fundamentalmente en las ventanas laterales, mientras que el segundo es el más empleado en las cenitales (Molina-Aiz et al., 2017). Los diferentes tipos de cierre de ventanas pueden ser desplazando o enrollando el plástico. También se pueden abrir de arriba a abajo, o de abajo hacia arriba, con accionamiento manual, motorizado o automatizado.

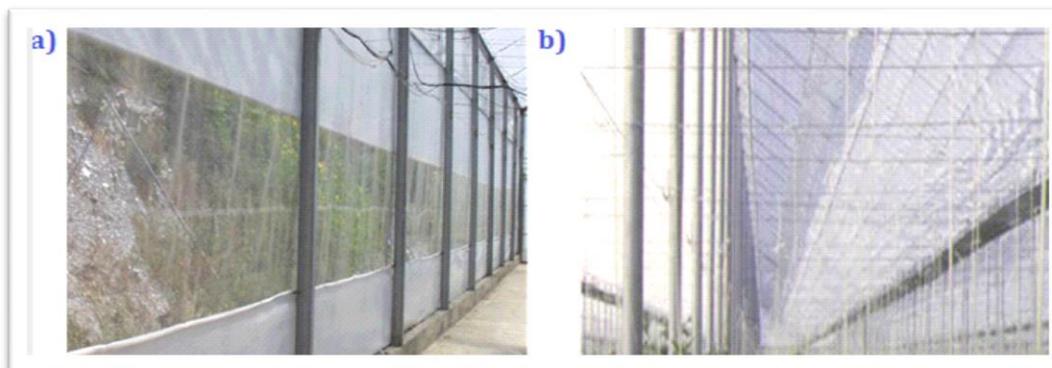


Figura 34. a) Ventana lateral. b) Ventana cenital de un invernadero parral. Fuente: (Carmona, 2011).

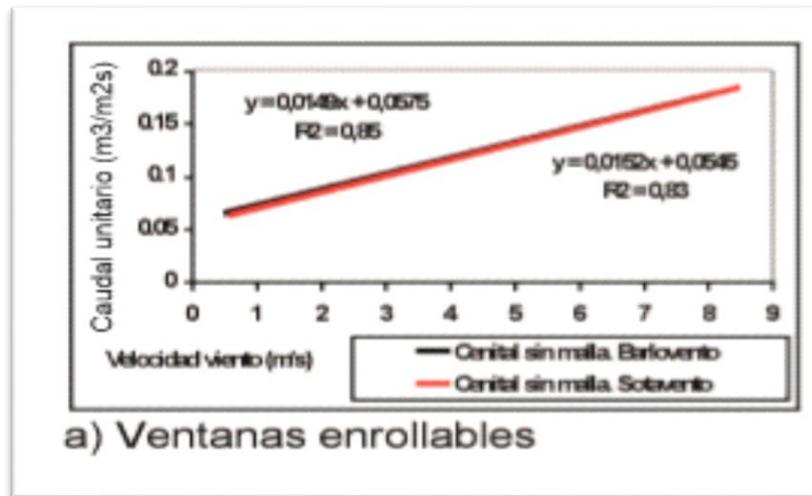


Figura 35. Tasa de ventilación para diferentes velocidades de viento para un invernadero tipo parral de 5 capillas con todas sus ventanas orientadas igual: a) enrollables con viento de barlovento (---) o sotavento (---). (Sánchez-Guerrero et al., 2010).

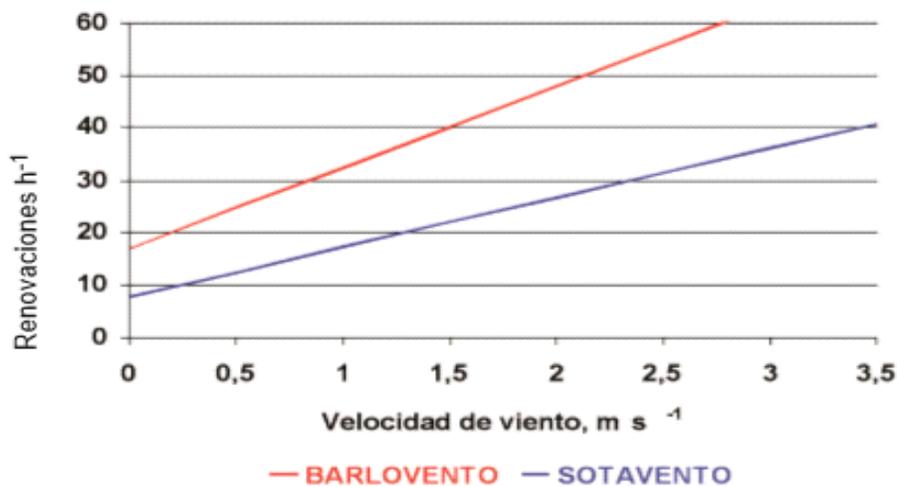


Figura 36. Tasa de ventilación para diferentes velocidades de viento obtenidas mediante gas trazador, para un invernadero multitúnel de 3 capillas con ventanas abatibles orientadas a barlovento o sotavento (Sánchez-Guerrero et al., 2010).

Estudios realizados con gas trazador han mostrado que la ubicación no es tan importante en el caso de las ventanas enrollables como en el de las abatibles (Pérez-Parra, 2004).

Para invernaderos tipo multitúnel a barlovento se producen flujos de aire menos homogéneos que a sotavento en cuanto a ventanas enrollables (Muñoz, 1998).

El principal inconveniente de las ventanas abatibles es que son más susceptibles de sufrir daños bajos vientos intensos. Por ello, en la mayoría de los invernaderos se suelen cerrar este tipo de

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

ventanas para velocidades de viento iguales o superiores a $8-10 \text{ m s}^{-1}$. El riesgo es directamente proporcional a la longitud del alerón, por lo que las más sensibles son las ventanas cenitales de medio arco de los invernaderos multitúnel cuya longitud puede llegar a los 4.5 m (Valera et al., 2014).

3.7. Mallas Anti-Insectos

La totalidad de los invernaderos Almerienses tienen instaladas mallas anti-insectos en las aberturas de ventilación para evitar la entrada de insectos que puedan suponer una plaga (Valera et al., 2014). Además, la legislación Andaluza para producción integrada como obligación la medida de instalar mallas con una densidad mínima de 10×20 hilos $\cdot \text{cm}^{-2}$ en las ventanas de los invernaderos de la Comunidad Autónoma de Almería (Orden de 10 de octubre de 2007, Reglamento Específico de Producción Integrada de Cultivos Hortícolas Protegidos, BOJA N°211 de 25 de octubre de 2007), pues las reducidas dimensiones del trips hacen ineficaces mallas con mayor porosidad (Valera et al., 2014).

Las plagas más importantes en los invernaderos de la provincia son los pulgones (*Myzus persicae* Sulzev y *Aphis gossypii* Glover), la mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum* Westwood y *Bemisia tabaci* Gennadius) y sobre todo los trips (*Frankliniella occidentalis* Pergande y *Thrips tabaci* Lindeman) (Acebedo, 2004). El uso de mallas en los invernaderos ha reducido las incidencias de plagas y enfermedades y por tanto supuesto una disminución en la necesidad de realizar tratamientos fitosanitarios (Baker y Jones, 1989); (Bell y Baker, 2000).

Las mallas en las ventanas del invernadero producen un considerable efecto negativo en el microclima interior al afectar a la tasa de ventilación. La resistencia de las mallas al flujo de aire se refleja en la pérdida de presión a través de la malla, que varía con la velocidad de aproximación del aire a la malla (Figura 37). Es recomendable que la caída de presión que se produce a través de la malla no sea superior a una presión estática de 7,35 Pa (Valera et al., 2014).

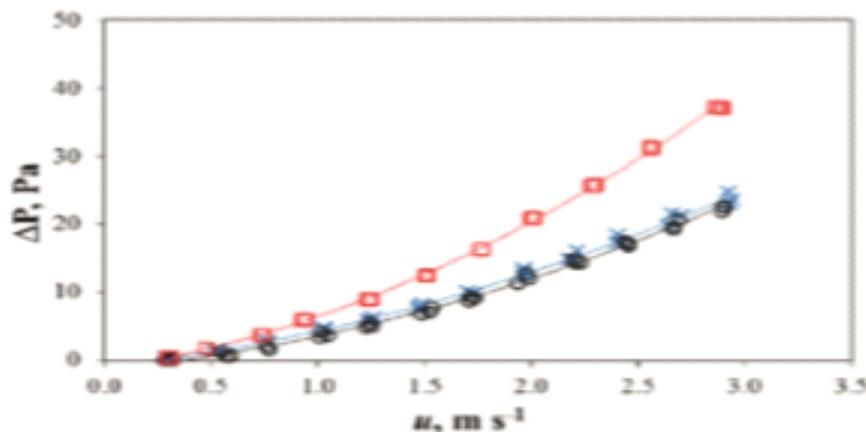


Figura 37. Caída de presión provocada por una malla anti-insectos (10.1×20 hilos $\cdot \text{cm}^{-2}$ según la velocidad del aire cuando está nueva (\times), vieja y lavada (\circ) y vieja y sucia reemplazada tras 3 años (\square) (Molina-Aiz, 2017).

3.8. Cultivo y Sustrato

El tomate *Solanum lycopersicum* pertenece a la familia Solanaceae. Aunque es de origen andino su domesticación parece ocurrir en Méjico (Camacho, 2003). Es una planta herbácea plurianual, que se cultiva como anual (ciclos cortos de 4-5 meses o ciclos largos de 8-9 meses), presenta un tallo rastrero capaz de emitir raíces, aunque normalmente se cultiva tutorado.

El marco de plantación suele ser de 80-100 cm entre líneas y 30-50 cm entre plantas (Marín, 2013), dependiendo su elección de la variedad, tipo de invernadero, ciclo de cultivo y suelo o sustrato (Camacho, 2003). Los ciclos de cultivo suelen ser: ciclos cortos de otoño, cortos de primavera y ciclos largos otoño-invierno primavera.

El desarrollo de nuestro cultivo será de primavera-verano (Mayo – Agosto)

Tabla 6. Niveles climáticos importantes para cultivo de tomate en invernadero (Tesi, 1972).

Especie	T (°C) mínima letal	T (°C) mínima biológica	T (°C) óptima NOCHE	T (°C) óptima DÍA	T (°C) máxima biológica	T (°C) óptima radicular	CO ₂ (ppm)	HR óptima (%)
Tomate	0 a 2	8 a 10	13 a 16	22 a 26	26 a 30	15 a 20	1000-2000	55-60

El cultivo se ha desarrollado en contenedores continuos a lo largo de las líneas de cultivo de fibra de coco, un sustrato orgánico muy extendido en cultivos hortícolas debido a las ventajas que plantea frente a otro tipo de sustratos, a la variedad de presentaciones (principalmente compactado en ladrillos) que existen en el mercado y a la competitividad de sus precios.

- Propiedades físicas medias:

Presenta una baja densidad aparente ($\approx 0.06-0.07 \text{ g cm}^{-3}$) y real ($\approx 1.5-1.55 \text{ g cm}^{-3}$); alta porosidad total ($\approx 86-95\%$); alta capacidad de aireación ($\approx 30-50\%$); y alta capacidad de retención de agua ($\approx 50-55\%$) con contenidos bajos-medios de agua fácilmente disponible ($\approx 10-25\%$) y de agua de reserva ($\approx 5-15\%$) y medios-altos de agua difícilmente disponible ($\approx 20-25\%$). La conductividad hidráulica insaturada es relativamente alta lo que permite tener elevada disponibilidad de agua y buen re-humedecimiento, a diferencia de otros sustratos (lana de roca) (Bonachela, 2013).

- Propiedades químicas medias:

Está compuesto en mayor medida por lignina y celulosa y poca hemicelulosa (fracción altamente atacable por los microorganismos), por lo que su durabilidad es mayor que otros sustratos orgánicos (turba). Posee un pH ligeramente básico (5-6), una conductividad eléctrica en el extracto de saturación entre 0.3 y 3.5 dS m^{-1} y una alta capacidad de intercambio catiónico:

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

50-110 meq/100g (Bonachela, 2013).

El sustrato ha sido cubierto con un acolchado para mejorar las condiciones térmicas del suelo e hídricas del suelo. Esta práctica afecta a los balances de agua y energía del sustrato y el aire dependiendo del material del acolchado; del estado hídrico del sustrato (Hernández, 2013).

4. MATERIAL Y MÉTODOS

La Organización Internacional para la Calibración (International Organization for Standardization (ISO) en principio no contempla estándares para los invernaderos experimentales. Sin embargo existe una gran variabilidad espacial y temporal en muchos de los parámetros que intervienen en estos. Es por ello, de vital importancia la consideración y presentación de factores lógicos como las coordenadas de nuestro invernadero; la orientación de este; sus sistemas de control; el método de procesamiento de los datos obtenidos; la distribución espacial de los sensores; o el impacto que estos pueden tener en los datos recogidos. Aunque se debe prestar especial atención y ser lo más rigurosos posible sobre aquellos que van a afectar al crecimiento y desarrollo del cultivo y que por tanto han de tenerse muy en cuenta, los principales son (Both et al., 2015):

- Radicación solar
- Concentración de vapor de agua y CO₂ en el aire
- Temperatura del aire
- Humedad del suelo

4.1. Invernadero y cultivo

El experimento desarrolló en el invernadero U11 (Figura 38) en el Campo de Prácticas de la Universidad de Almería (Centro de Innovación y Tecnología "Fundación UAL-ANECOOP", localización: 36°51'53.2"N 2°16'58.8"W; a 87 metros sobre el nivel del mar) en dos sectores separados por una lámina de polietileno: el primero situado en la mitad Este (U11E), con unas dimensiones de 24 × 25 m y el segundo situado en la mitad Oeste (U11O), con unas dimensiones de 24 × 20 m (Tabla 7), con una superficie total del invernadero es de 1080 m².

Tabla 7. Características de los dos sectores seleccionados para la realización del trabajo.

Nº	Dimensiones	Superficie S_c [m ²]	Nº plantas	Sistema de ventilación	Sup. Ventanas S_v [m ²]	S_v/S_c [%]
U11E	24 m × 25 m	600	446	2 laterales grandes y 3 cenitales	202.8	33.8
U11O	24 m × 20 m	480	354	2 laterales y 3 cenitales	80.5	16.8

El invernadero es de tipo multitúnel, orientado Noreste-Suroeste (28° respecto a la dirección Norte), dotado con un sistema de ventilación natural con ventanas laterales orientadas perpendicularmente respecto la cumbre. La mitad Este presenta ventanas de 3.3 m de altura, una superficie de ventilación (S_v) de 193.9 m² y una relación $S_v/S_c=33.8$ %; mientras que su mitad Oeste de 0.9 m de altura, $S_v=81.7$ m² y una relación $S_v/S_c=17$ %. La ventilación es regulada por el

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

software de control Synopta (HortiMax B.V., Maasdijk, Holanda) y un controlador MultiMa (HortiMax B.V., Maasdijk, Holanda).

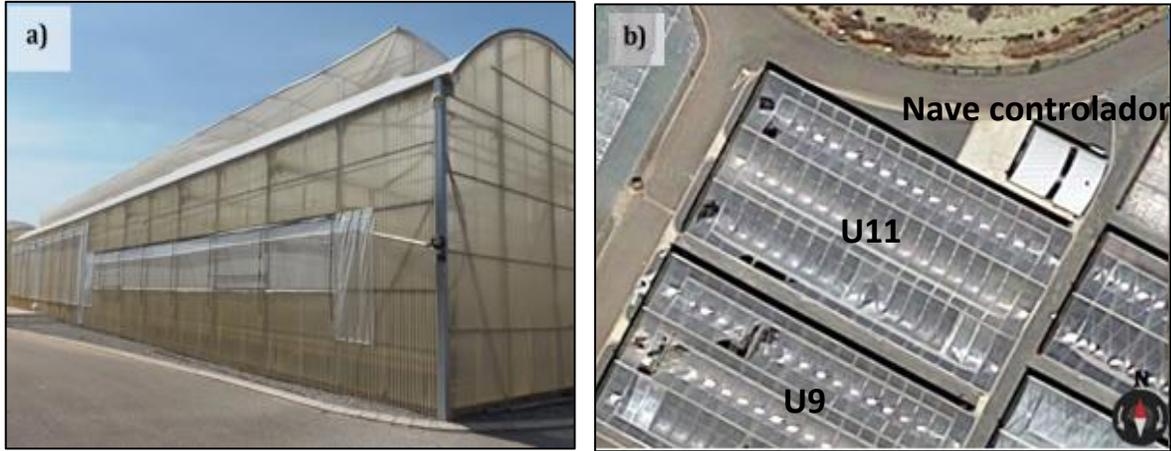


Figura 38. Invernadero experimental (a) con ventanas laterales tamaño estándar (lado derecho) y de gran formato (lado izquierdo) e imagen de satélite (b).

El invernadero se encuentra muy próximo (3 m) a otro similar (U9) en su parte Sureste, lo que va a afectar a la velocidad del aire que entre por las ventanas situadas en esta cara (López et al., 2011). Además, en la parte Norte junto a él se sitúa una pequeña nave auxiliar en la que se encuentra el controlador climático (Figura 38b).

Todas las ventanas están dotas de mallas anti-insectos de alta densidad de polietileno, con una porosidad del 26.3% (Tabla 8). Las características aerodinámicas de las mallas, permeabilidad K_p (m^2) y factor inercial Y se pueden obtener a partir de ensayos experimentales en túnel de viento (Valera et al., 2006; Molina-Aiz et al., 2009; López et al., 2016; Espinoza et al., 2015) de una muestra de malla anti-insectos.

Tabla 8. Características geométricas y aerodinámicas de la malla anti-insectos.

Parámetro	Valor
Densidad de hilos, D_r (hilos cm^{-2})	10 × 20
Porosidad, φ (%)	26.3%
Grosor de la malla, e_{scr} (m)	534.7×10^{-6}
Permeabilidad, K_p (m^2)	5.054×10^{-9}
Factor inercial, Y	0.276

4.2. Medida de parámetros climáticos en continuo

Durante el desarrollo del cultivo se realizaron dos tipos de medidas del microclima: a) Registro en continuo (con una frecuencia de 1 minuto) de diversos parámetros climáticos exteriores e interiores durante el ciclo de cultivo completo (Figura 39), con las ventanas abriendo de forma automatizada; b) Ensayos puntuales para medir el caudal de aire y el flujo de CO_2 y H_2O en el invernadero con las ventanas cenitales cerradas y las laterales abiertas a su máxima capacidad. Además, se midió la concentración de CO_2 a nivel de hoja mediante un sensor de fotosíntesis portátil.

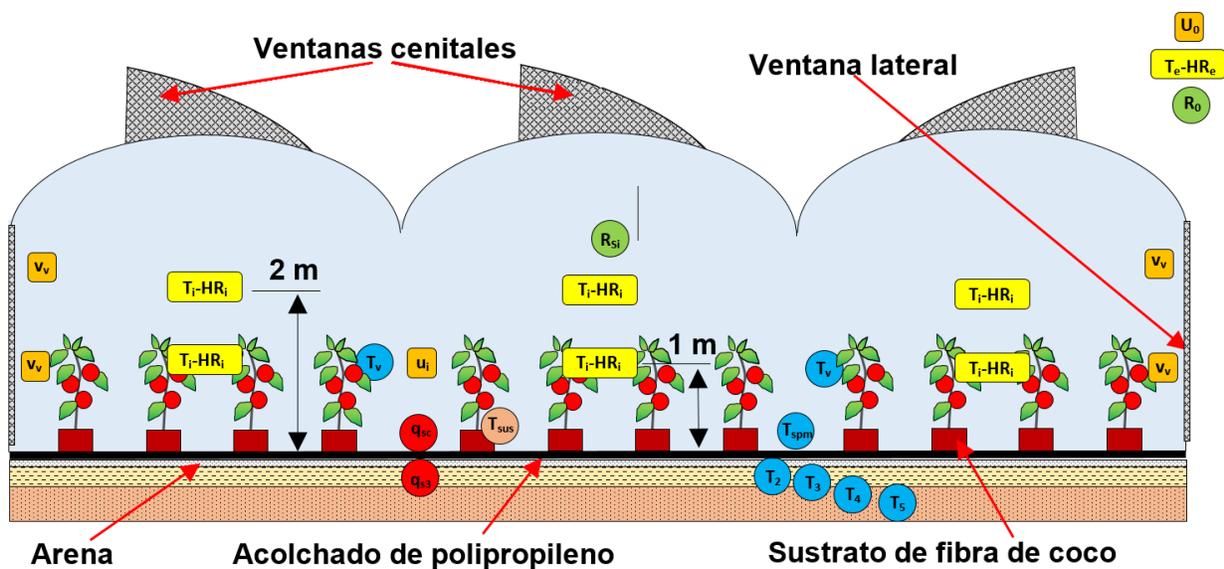


Figura 39. Disposición de los diferentes sensores utilizados para análisis del microclima en los dos sectores del invernadero multitúnel mediante un registro continuo con cultivo de tomate en sustrato (Ver Tabla 9).

El 4 de mayo de 2017 se trasplantó en los dos sectores del invernadero experimental un cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) de la variedad 'Marenza' (Enza Zaden España,S.L., Sta. María del Águila, Almería) de tipo grueso adaptado a plantaciones de primavera. Las líneas de cultivo perpendiculares al sentido de las cubreras, con un marco de plantación de 0.5×2 m y con una densidad real de plantación de 0.74 plantas m^{-2} (Tabla 7) teniendo en cuenta los pasillos y bordes sin cultivar.

En los registros continuos se midió la temperatura y humedad del aire a 1 y 2 m, con sensores con caja de protección de la radiación solar (Figura 39), situados bajo las cubreras de cada

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

módulo. Se usó un dispositivo experimental similar para a cada sector del invernadero (U11E y U11O), empleándose para ello 6 sensores CS215 (Campbell Scientific Spain, Barcelona) en cada sector (2 para cada zona: norte, centro y sur).

La temperatura del cultivo se midió utilizando termistores Betatherm 100K6A colocados envueltos por el envés de las hojas de tomate (Figura 384a) y con espuma de polietileno celular WICU®ClimDuo (KME Group S.p.A., Courbevoie cedex, Francia) para aislarlos térmicamente del aire interior y protegerlos de la radiación solar.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Tabla 9. Diferentes variables registradas y los equipos utilizados para ello.

Parámetro	Sensor	Fabricante	Rango	Exactitud
R_{si} – Radiación solar interior	2 × Piranómetros SP1110	Campbel Scientific		±5%
R_o – Radiación solar exterior				
T_{spm} – Temperatura del acolchado	10 × Termistores Betatherm 100K6A	Campbel Scientific	-5 - 95 °C	<±0.16 °C
T_2 – Temperatura del suelo a 0.01 m				
T_3 – Temperatura del suelo a 0.10 m				
T_4 – Temperatura del suelo a 0.20 m				
T_5 – Temperatura del suelo a 0.50 m				
T_{sus} – Temperatura del sustrato	2×Termopares TCAV	Campbel Scientific	0 - 350 °C	± 1.0 °C
q_{sc} – Flujo de calor bajo el acolchado	4 × HFP01	Campbel Scientific	±2000 W m ⁻²	-15 - 5%
q_{s3} – Flujo de calor en el suelo (a 10 cm)				
u_i – velocidad del aire interior	2×2D Windsonic	Campbel Scientific	0 - 60 m s ⁻¹	±2%
U_o – Velocidad del viento exterior (a 5 m)	1×2D Windsonic			
v_v – velocidad en las ventanas laterales	6×2D Windsonic			
	2 x 3D CSAT	Campbel Scientific	u_x : ±30 m s ⁻¹ u_y : ±60 m s ⁻¹ u_z : ±8 m s ⁻¹	u_x, u_y : 1 mm s ⁻¹ u_z : 0.5 mm s ⁻¹
U_{REF} – Velocidad del viento exterior (a 10 m)	Anemómetro- Meteostation II	Hortimax	0 - 40 m s ⁻¹	
ϑ_w – Dirección del viento	Veleta– Meteostation II	Hortimax	0 - 360°	
T_e – Temperatura del aire exterior (a 5 m)	1 × CS215	Campbel Scientific	0- 100% -40 - 70°C	HR: ±2% (10 - 90%) ±4% (0 - 100%) T: ±0.4°C (5 - 40 °C) ±0.9°C (40 - 70°C)
HR_e – Humedad relativa exterior (a 5 m)	1 × CS215			
T_i – Temperatura del aire interior	12 × CS215			
HR_i – Humedad relativa interior	12 × CS215			
T_e – Temperatura del aire exterior (a 10 m)	Pt1000-BUTRON II	Hotimax	-25 – 40 °C	
T_v – Temperatura de las hojas del cultivo	4 ×Termistores Betatherm 100K6A	Campbel Scientific	±2000 W m ⁻²	-15 - 5%
C_i – Concentración interior de CO ₂	IRGASON. Campbell Scientific	Campbel Scientific	0 - 1000 μmol/mol	1%
C_h – Concentración de CO ₂ cerca de las hojas	Analizador TCI-SD.	ABC Bioscientific	0 – 2000 ppm	1ppm

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE



Figura 40. Sensores de temperatura y humedad con caja de protección de la radiación solar situados a 1 y 2 m de altura y anemómetro 2D para la medida de la velocidad del aire interior, en el centro del sector U11E delimitado por la partición con lámina plástica de la parte izquierda de la imagen.

La temperatura de la superficie del suelo y del terreno fue medida mediante otros 10 termistores, 5 en cada uno de los dos sectores, situados a 0.01, 0.1, 0.2 y 0.5 m de profundidad (Tabla 9). Los sensores para la medición de la temperatura de la superficie del suelo T_{spm} fueron fijados en la cara superior de la lámina de acolchado de polipropileno (Figura 41b), cubriéndolos con el mismo aislante utilizado para las hojas de tomate.

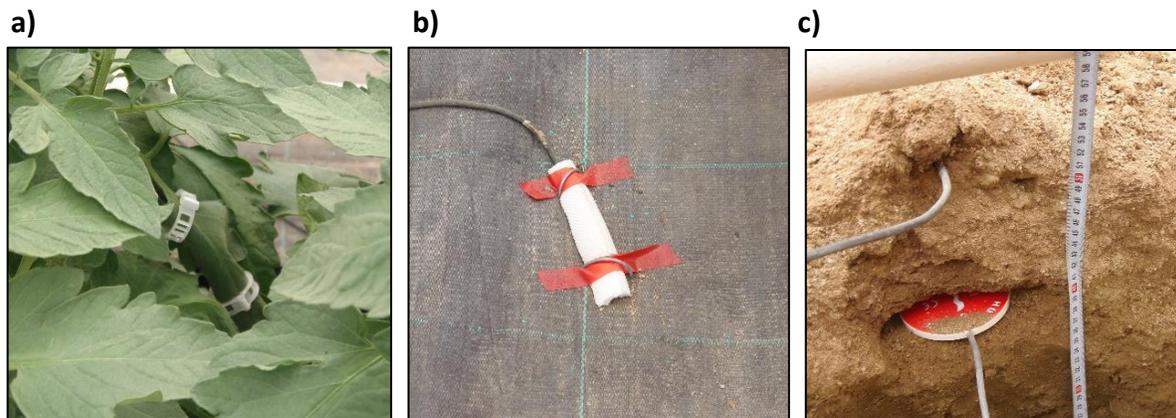


Figura 41. Sensores de temperatura para la medida de la temperatura de las hojas de cultivo (a), de la superficie del acolchado de polipropileno sobre el suelo (b) y del suelo (c) y de flujo de calor del suelo situado a 10 cm de profundidad (c).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERNADERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

También se midió la temperatura del sustrato en ambos sectores usando termopares TCAV que se clavaron en la fibra de coco. La radiación solar fue medida en el interior R_{si} y en el exterior R_g del invernadero con dos piranómetros, permitiendo así calcular la transmisividad de la cubierta. También se midió la radiación neta en el interior del invernadero (Figura 39).

El grosor de la cubierta de polipropileno en el suelo e_{spm} , de la cubierta del invernadero e_c y de la malla anti-insectos e_{scr} fueron medidos utilizando un dispositivo de medición óptico TESA-VISIO 300 (TESA S.A., Suiza) el cual tiene una resolución de $0.05 \mu\text{m}$ y una precisión de $E_{xy} = 2.9+10e/1000 \mu\text{m}$.

La velocidad del aire interior se midió con 8 anemómetros Windsonic 2D (Campbel Scientific Spain, Barcelona), empleando un sensor 1.5 m para el centro de cada sector (Figura 40) y 6 en las ventanas laterales, utilizando dos sensores en las ventanas del sector oeste a 2.15 m y cuatro en las de mayor tamaño situadas en el sector este a 1 y 2 m (Figura 39).

En el caso del registro de las variables exteriores: la dirección y velocidad del aire a 10 m se analizaron mediante una única estación meteorológica II (tabla), por otro lado, la velocidad del aire exterior a 5 m se registró usando un anemómetro 2D Windsonic; la temperatura exterior del aire fue medida por un lado mediante un sensor Pt1000-Butron II (HortiMax B.V., Maasdijk, Holanda) dispuesto a 10 m y por otro, junto a la humedad del aire exterior, mediante un sensor CS215 colocado a 5 m de altura (Tabla 9).

La radiación fue medida empleando dos piranómetros SP1110 en ambos sectores del invernadero y uno en el exterior (Tabla 9).

El almacenamiento de datos recogidos por las diferentes sondas llevó a cabo en los registradores de datos datalogger CR3000, excepto en el caso de la estación meteorológica II cuyos datos se han almacenado en continuo en un PC y el Analizador TCi-SD que posee una memoria externa. De manera periódica se han descargado las memorias externas de los datalogger y el Analizador TCi-SD en un PC.

4.3. Estimación del flujo de aire en las ventanas laterales

Para estimar el flujo de aire en las ventanas laterales, se realizaron dos sesiones de mediciones los días 8 y 16 de junio de 2017, aproximadamente al mediodía solar, entre las 11 y 14 horas (hora local en España, GMT+2 h) cuando las condiciones climáticas exteriores eran estables. Durante los ensayos dentro del invernadero el cultivo de tomate tenía una densidad de 1.0 [plantas·m⁻²] y un índice de área foliar de $L_{AI}=1.05$ [m²·m⁻²].

Tabla 10. Condiciones climáticas registradas dentro y fuera del invernadero (media±desviación estándar) durante los dos periodos de medición. Velocidad del viento v_R , dirección del viento ϑ_v , temperatura exterior t_e , diferencia de temperatura interior-exterior Δt_{ie} , humedad exterior HR_e , humedad interior HR_i y radiación solar exterior R_{se} .

Fecha	Hora local	v_R [m·s ⁻¹]	ϑ_v * [°]	t_e [°C]	Δt_{ie} [°C]	HR_e [%]	HR_i [%]	R_{se} [W·m ⁻²]	$v_R/\Delta t_{ie}^{0.5}$ [m·s ⁻¹ ·K ⁻¹]
8/06/17	11:00-14:00	8.3±0.6	27.0±14.7	29.3±0.8	2.0±0.1	30.9±1.9	28.3±2.0	813.7±92.2	5.86
16/06/17	10:50-13:15	2.7±1.1	46.6±80.7	29.8±2.5	5.3±0.9	53.5±13.6	43.9±6.9	739.3±87.0	1.16

* La dirección perpendicular a las ventanas es de 28° para el viento de *Levante* (NE).

El primer día de media hubo fuerte viento ($v_R > 5$ m·s⁻¹) perpendicular a las ventanas y muy estable tanto en intensidad como en dirección, que prácticamente fue perpendicular a las ventanas del invernadero (Tabla 9). De esta forma se obtiene una mayor exactitud en la estimación del caudal, puesto que se minimiza el efecto de flotabilidad térmica del aire (para bajas velocidades de viento) y las distorsiones producidas por el ángulo de incidencia del viento cuando se aleja de la dirección perpendicular (Molina-Aiz et al., 2009). Sin embargo, estas condiciones ambientales son raras por lo que es difícil de efectuar largas series de medidas o de disponer de datos correspondientes a muchos días. En nuestro caso, solo el primer día de medida fue óptimo para las mediciones, aunque con un solo día es suficiente para este tipo de ensayos (Boulard *et al.*, 1998a).

4.3.1. Medida de la velocidad del aire en las ventanas laterales

La medida de la velocidad se realizó mediante tres anemómetros sónicos triaxiales CSAT3 (Campbell Scientific Spain S.L., Barcelona) conectados a tres unidades de registro de datos Micrologger CR3000 (Campbell Scientific Spain S.L., Barcelona) situadas a unos 25 cm de las ventanas laterales (Figura 385a). El anemómetro 3D colocado en el centro de la posición de medida (Figura 385a) lleva acoplado un sistema de medida de concentraciones de CO₂ y vapor de agua denominado IRGASON. En cada una de las dos ventanas laterales se realizaron medidas de velocidad en 18 puntos diferentes (Figura 386). En cada punto se midió la velocidad del aire cada 0.1 segundos durante un periodo de 5 minutos (obteniendo 3000 datos para cada uno de los 36 puntos).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE



Figura 42. Anemómetros tridimensionales e IRGASON (a) para las medidas puntuales de velocidad del aire y anemómetros 2D para medidas continuas (b).

Como en cada una de las 12 localizaciones, 6 en cada ventana lateral (Figura 43), se midió la velocidad del aire que atraviesa la ventana durante 5 minutos, el proceso de medición duró aproximadamente 2-3 horas (Tabla 9), teniendo en cuenta el tiempo necesario para desplazarse entre las diferentes zonas de las ventanas.

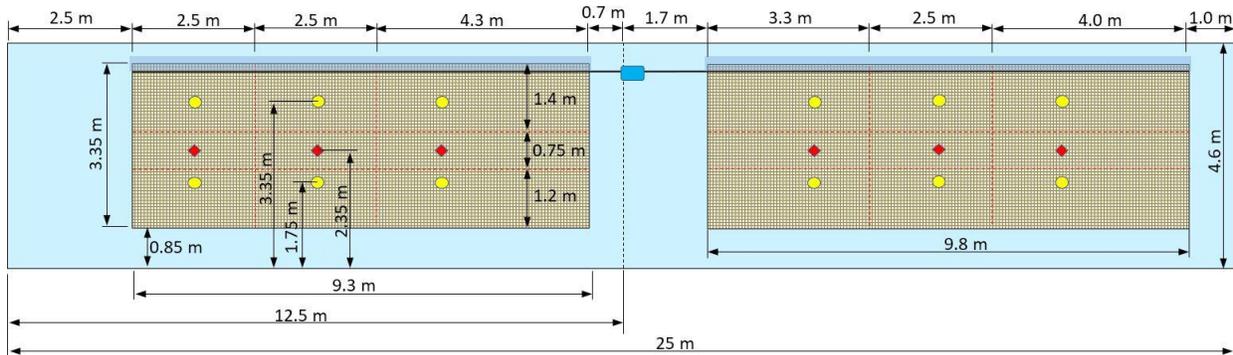


Figura 43. Dimensiones de la ventana lateral norte del sector U11E y posiciones de los puntos de medida con los anemómetros tridimensionales (o) y con el IRGASON (♦).

4.3.2. Cálculo del caudal de ventilación con el anemómetro sónico

Para obtener datos suficientemente exactos del caudal de ventilación en los ensayos, el viento debe mantenerse estable tanto en dirección como en intensidad durante 3 o 4 horas.

El caudal volumétrico de un flujo se puede determinar mediante el método transversal que consiste en medir la velocidad perpendicular a una sección transversal de un flujo en varios puntos. El caudal exacto vendría dado por la medida de la velocidad en todos los puntos de la sección (Siren *et al.*, 2001):

$$G = \int_{S_v} v \cdot dS \quad (4)$$

Donde dS es el área diferencial de la sección transversal, que en el caso del invernadero son sus ventanas. En la práctica el número de medidas locales de la velocidad es finito, y la integración se puede sustituir por una suma.

El caudal de ventilación medio a través de las dos ventanas laterales del invernadero se calculó multiplicando la componente media v_{xj} de la velocidad del aire normal a las ventanas (Figura 44) por su superficie elemental S_{vj} (Boulard *et al.*, 1998; Molina-Aiz *et al.*, 2009):

$$\bar{G}_j = \sum_{j=1}^n S_{vj} \bar{v}_{xj} \quad (5)$$

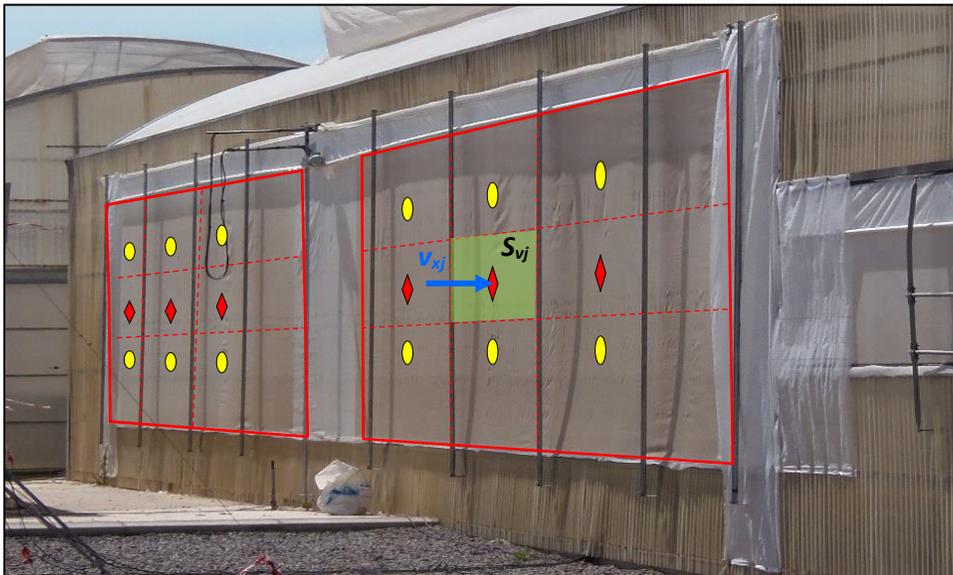


Figura 44. Distribución de los 18 puntos de medida de la velocidad v_{xj} y sus correspondientes superficies elementales S_{vj} en la ventana Norte del sector U11E.

Dado que solo se podía medir la velocidad del aire en una sola localización en cada instante, se produce una influencia del cambio de las condiciones climáticas exteriores a lo largo del periodo de medición en las 18 posiciones de los anemómetros (Figuras 43 y 44).

El efecto de la variación de la intensidad del viento se puede reducir seleccionando una dirección del viento exterior fija para las mediciones y corregir las velocidades del aire medidas por el anemómetro sónico en cada punto j en las ventanas del invernadero $v_j(t)$ mediante un proceso de escalado con la velocidad del viento (Molina-Aiz et al., 2009). Sin embargo, en nuestro caso se disponía de las medidas de los anemómetros bidimensionales (Figura 385b) que estuvieron fijos durante todo el periodo de crecimiento del cultivo y que permiten realizar comparaciones del flujo de aire en los dos sectores del invernadero U11.

4.4. Estimación del flujo de CO₂ y H₂O en el invernadero

En los ensayos puntuales, además de medir la velocidad del aire, se registraron las concentraciones de CO₂ y H₂O en los 6 puntos centrales de las ventanas laterales (Figuras 43 y 44) mediante un analizador de flujos IRGASON (Campbell Scientific Spain, Barcelona) formado por un analizador *open-path* integrado con un anemómetro sónico 3D (Figura 45a). Para la velocidad tiene una exactitud de ± 0.08 m/s (rango de medida de 0-30 m/s), para la concentración de CO₂ la exactitud es de ± 0.55 g/m³ (rango: 0-1830 mg/m³) y para el vapor de agua la exactitud es de ± 0.037 g/m³ (rango: 0-42 g/m³).

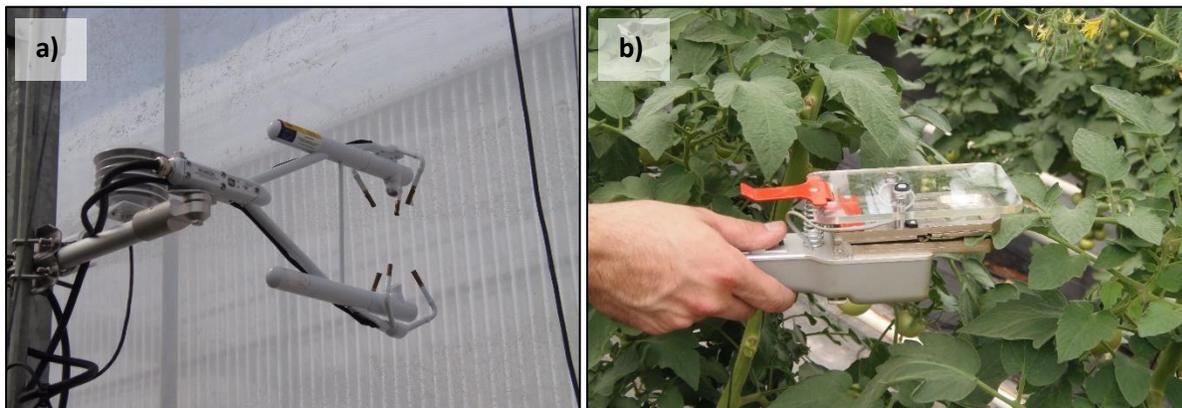


Figura 45. Sistema de medida del flujo de aire en las ventanas IRGASON (a) y sensor portátil para la medida de la fotosíntesis en las hojas del cultivo (b).

A partir de las medidas de velocidad del aire en las ventanas v_{xj} , de las concentraciones de CO₂ C_M y de vapor de agua x_m , se calcularon el flujo neto de CO₂ y de H₂O como diferencia de la cantidad que entra (valores positivos de velocidad del aire) y la que sale, obtenidas al multiplicar el caudal de aire en cada punto G_j por la concentración de dióxido de carbono C_M y de vapor de agua x_m .

Los resultados obtenidos se compararon con el método más tradicional, consistente en medir la actividad fotosintética en las hojas del cultivo mediante un analizador LCI Portable Photosynthesis System (ADC BioScientific Limited, Hertfordshire, Reino Unido).

Dado que las medidas de fotosíntesis se realizaron a nivel de hoja del cultivo (Figura 45b), fue necesario determinar el índice de área foliar de las plantas, para poder estimar la cantidad total de CO₂ absorbida por el cultivo dentro del invernadero. Para ello se determinó el índice de área foliar (*Leaf Area Index*) LAI (m² hojas/m² cultivo) tomando un reducido número de hojas de diferentes plantas a diferentes alturas, mediante un método poco destructivo. De esta manera se

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

obtuvo una distribución del área foliar de la planta en altura. La superficie de cada hoja se obtuvo escaneando el blanco y el negro las hojas del tomate (Figura 46) sobre folios DIN A3 y calculando posteriormente el porcentaje de píxeles negro-blancos (Molina-Aiz, 2010) mediante el programa ImageJ (<https://imagej.net>) para procesamiento de imágenes digitales de dominio público programado en Java desarrollado en el National Institutes of Health.

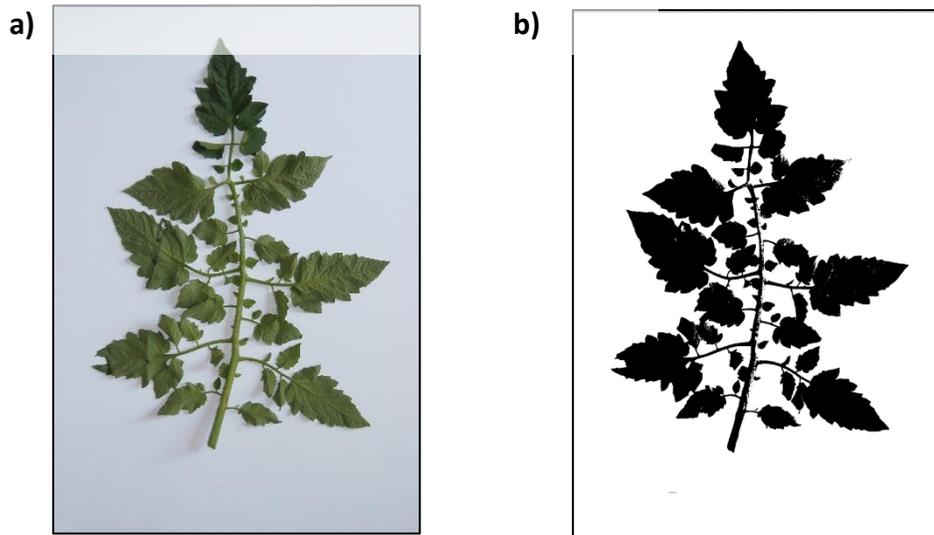


Figura 46. Fotografía de una hoja de tomate sobre un folio DIN A3 (a) e imagen en blanco y negro (b) utilizada para el cálculo de la superficie foliar.

En primer lugar, se calcula el caudal de aire que circula por cada zona de ventana como el producto de la componente v_{xj} [$m s^{-1}$] de velocidad de aire perpendicular a las ventanas en cada punto j por la superficie del hueco de ventana S_{vj} [m^2] correspondiente a ese punto. El flujo neto de CO_2 F_N [$mg s^{-1}$] se calcula como diferencia de la cantidad que entra (valores positivos de velocidad del aire) y la que sale, obtenidas al multiplicar el caudal de aire G_j [$m^3 s^{-1}$] en cada punto j por la concentración de dióxido de carbono C_j [$mg m^{-3}$]:

$$\overline{F_N} = \sum_{j=1}^n G_j \cdot C_j \quad (6)$$

Del mismo modo a como se estima el flujo de CO_2 , se puede estimar el flujo de vapor de agua X_N [$g s^{-1}$], con la concentración de H_2O medida con el IRGASON x_j [$g m^{-3}$]:

$$\overline{X_N} = \sum_{j=1}^n G_j \cdot x_j \quad (7)$$

4.5. Medida de la fotosíntesis y la transpiración del cultivo

El segundo método de cálculo de la fotosíntesis consiste en medir la actividad fotosintética en las hojas del cultivo (Figura 45b). Se tomaron 26 medidas a diferentes alturas mediante un analizador LCI Portable Photosynthesis System (ADC BioScientific Limited, Hertfordshire, UK) con una exactitud de $\pm 2\%$ para un rango de medida del CO_2 de 0-2000 ppm y una exactitud de $\pm 2\%$ para un rango de medida del H_2O de 0-75 mbar. También se midió la distribución de la superficie foliar en una planta de tomate y el número total de plantas que había dentro del invernadero.

De esta forma la fotosíntesis neta del cultivo P_N [$\text{mgCO}_2 \text{ s}^{-1}$] se puede estimar multiplicando el valor medio de fotosíntesis de las 26 hojas del cultivo de tomate p_m [$\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] por la superficie total de una planta S_p [$\text{m}^2 \text{ planta}^{-1}$] y por el número de plantas del invernadero n_p [plantas/invernadero]:

$$P_c = p_m \cdot S_p \cdot n_p \quad (8)$$

Este método supone que todas las hojas realizan por igual la fotosíntesis cuando en realidad las hojas donde la fotosíntesis es mayor tienen una superficie muy pequeña.

El sensor de fotosíntesis (Figura 45b), además de medir el flujo de CO_2 por unidad de superficie de hoja también mide el agua transpirada por el cultivo de tomate. Al igual que en el caso anterior, se ha tratado de determinar la variación de la transpiración con la altura de la planta. Con ella y con la variación de la superficie foliar se ha determinado la transpiración en cada parte de la planta para después obtener la correspondiente al conjunto de la planta como suma de estas y la de todo el cultivo multiplicando por el número de plantas.

También se ha calculado un segundo valor de transpiración X_c [$\text{gH}_2\text{O} \text{ s}^{-1}$] considerando solo el valor medio de transpiración del conjunto de medidas realizadas en las hojas x_m [$\text{gH}_2\text{O} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] y la superficie total de hoja en el cultivo:

$$X_c = x_m \cdot S_p \cdot n_p \quad (9)$$

4.5. Análisis estadístico

Mediante StarGraphics Centurion XVI (StatPoint, Technologies Inc., E.E.U.U.) hemos comprobado si existían diferencias estadísticamente significativas entre los valores recogidos por los diferentes sensores de ambos sectores del invernadero experimental con diferentes superficies de ventana laterales. Hemos dividido los valores micro-climáticos recogidos en tres grupos para su estudio: temperatura, humedad absoluta y radiación.

Mediante el Análisis de la Varianza se divide la variación total existente en un conjunto de datos, en diversas fuentes de variación, y se valora mediante un contraste de hipótesis, si la aproximación-relativa del factor analizado (en nuestro caso situación en cada uno de los dos sectores del invernadero, y localización dentro del perfil vertical) a la variación total, es significativa o no (García Pérez, 1992)

Mediante una Prueba de Rangos Múltiples se han comprobado entre que medias de los conjuntos de valores recogidos por los sensores homólogos de diferentes sectores existen diferencias significativas. El grupo homogéneo al que pertenece cada media ha quedado recogido mediante una letra minúscula (ver en Resultados).

Mediante la prueba de verificación de la varianza se ha evaluado si existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar los diferentes conjuntos de datos, con un nivel del 95,0% de confianza. Cuando existían diferencias significativas entre las desviaciones estándar se realizó un análisis gráfico de los resultados mediante el Gráfico de Caja y Bigotes de Tukey (Figura 48). Las muescas (figura) son construidas de forma que cuando aquellas de dos muestras no se traslapen, puede afirmarse que tienen medianas significativamente diferentes a un nivel de significancia del 5% (Stat point, 2010).

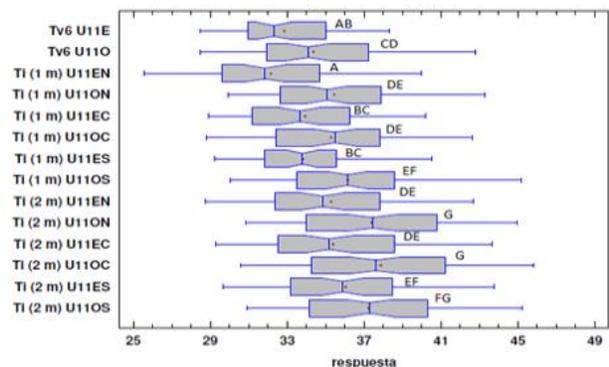
a) Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Ti (1 m) U11EN	58	32,1755	X
Tv6 U11E	48	32,8706	XX
Ti (1 m) U11ES	58	33,8259	XX
Ti (1 m) U11EC	58	33,9252	XX
Tv6 U11O	53	34,3645	XX
Ti (1 m) U11OC	58	35,2638	XX
Ti (2 m) U11EN	58	35,2762	XX
Ti (2 m) U11EC	58	35,3774	XX
Ti (1 m) U11ON	58	35,4419	XX
Ti (2 m) U11ES	58	36,0541	XX
Ti (1 m) U11OS	58	36,1395	XX
Ti (2 m) U11OS	58	37,2391	XX
Ti (2 m) U11ON	58	37,3981	X
Ti (2 m) U11OC	58	37,8543	X

b)

Gráfico Caja y Bigotes



Figuras 47 y 48. 47 (izquierda), tabla de grupos homogéneos de la prueba de Rangos Múltiples. 48 (derecha), Gráfica de Caja y Bigotes.

5. Resultados y discusión

Como resultados del presente proyecto, en el que se pretendía analizar el efecto en el microclima del incremento de la superficie de ventilación lateral en un invernadero multitúnel (U11), en primer lugar, se midió la velocidad del aire en 18 puntos de las nuevas ventanas laterales para dos momentos puntuales de viento perpendicular y estable. A partir de esos ensayos se pudo estimar el caudal de ventilación y el flujo de CO₂ y vapor de agua en el invernadero.

Además, durante todo el periodo de crecimiento del cultivo de tomate, se midió de forma continua la velocidad del aire en el centro de las ventanas laterales de los dos sectores en los que se dividía el invernadero (con ventanas estándar en el lado Oeste, U11O, y las nuevas ventanas más grandes en el lado Este, U11E), así como en medio de una línea de cultivo.

Para determinar el efecto de la variación de la capacidad de ventilación sobre el microclima del invernadero se midieron varios parámetros climáticos en continuo y de forma simultánea en las secciones medias de los sectores U11O y U11E.

Finalmente se presentan los resultados de la producción del cultivo de tomate en cada uno de los dos sectores del invernadero experimental, aunque hay que indicar que el seguimiento del cultivo y la medición de la producción no formaron parte de este trabajo.

5.1. Medida de la velocidad del aire en las ventanas

Para poder comparar la capacidad de ventilación de nueva ventana se instalaron los anemómetros bidimensionales en las ventanas laterales de los dos sectores del invernadero U11. Debido a la gran diferencia en el tamaño de las ventanas se instaló un solo sensor en el centro de la ventana U11O y dos en las ventanas del lado U11E.

La ventana del lado Oeste (Figura 49a) tiene una apertura máxima de 0.9 m y está accionada por un motorreductor P.GW10.230.26.K125 (De Gier B.V., Wateringen, Países Bajos) con una potencia de 0.18 kW, velocidad de giro de 2.6 rpm y un par torsor de 100 Nm. Este motorreductor, fijado a la estructura del invernadero, está conectado a través de una doble junta Cardan a una barra de mando de 5/4" (32 mm) en la que se enrolla el plástico. En la ventana Este se instaló el 11 de mayo de 2017 un motorreductor P.GXP10.400.40.KBS32.T (De Gier B.V., Wateringen, Países Bajos) con una potencia de 0.18 kW, velocidad de giro de 4.0 rpm y un par torsor de 100 Nm. En este caso, el eje del motorreductor se une de forma directa a la barra de mando sobre la que se enrolla el plástico. De esta forma el motorreductor se debe desplazar subiendo y bajando al abrir y cerrar la ventana, respectivamente. Inicialmente el sistema instalado por la empresa

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

especializada no funcionó al enrollarse el cable de alimentación junto con el plástico lo que provocó su rotura (Figura 49b). Para evitarlo se colocaron dos tubos de acero que separan los cables de la ventana aproximadamente 50 cm (Figura 49c) lo que evita que el cable se pueda enrollar junto con el plástico.

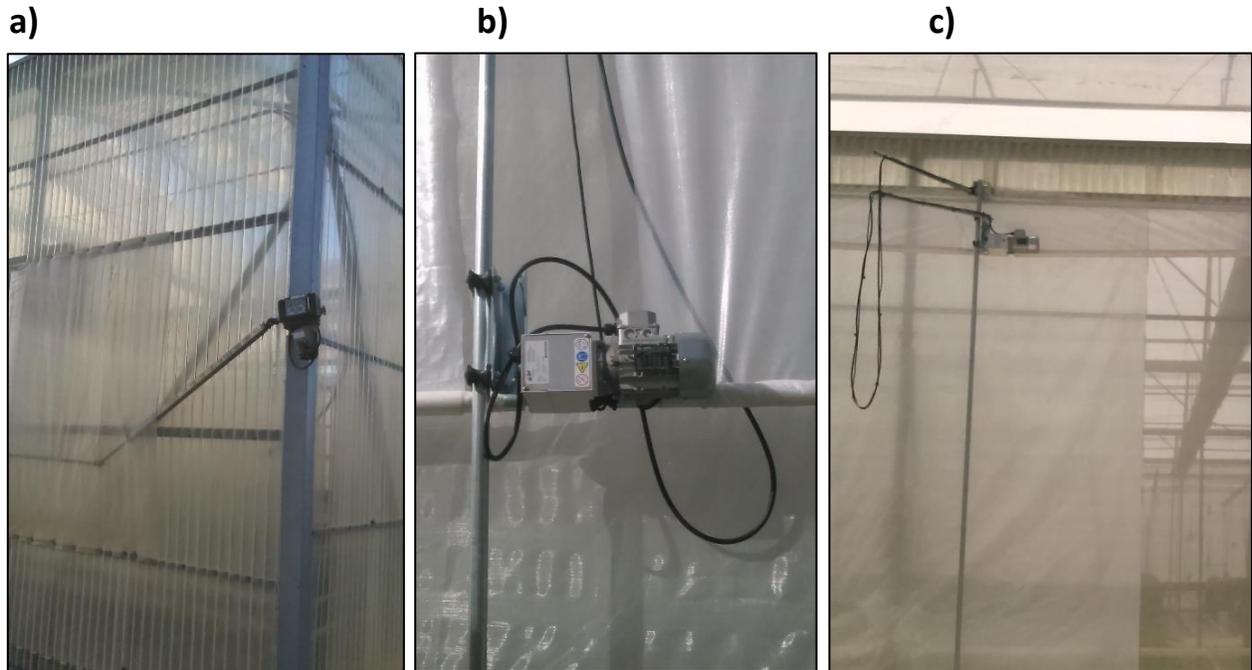


Figura 49. Imagen del sistema de apertura de la ventana lateral del sector U11O (a), del motorreductor instalado en la ventana lateral del sector U11E con el cable enrollado (b) y diseño modificado para evitar el enrollamiento del cable (c).

Al incrementar la superficie de ventilación en el lado U11E se observa una disminución de la velocidad en la sección central de la ventana (Figura 50a). Esto se debe a que el caudal de aire exterior impulsado por el viento de *Levante* (procedente del noreste) que impacta con el lateral norte se concentra en la ventana del lado Oeste y aumenta su velocidad. En el sector Este ese mismo caudal exterior puede entrar por un hueco mucho mayor por lo que, pese a que el volumen total de aire que entre en el invernadero sea superior, su velocidad es inferior (Figura 50a).

Sin embargo, al entrar más cantidad del aire por la ventana del sector Este, la velocidad registrada en el centro del invernadero a 1.5 m de altura por el anemómetro situado en medio de una línea de cultivo, es superior que la medida en el sector Oeste (Figura 50b).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

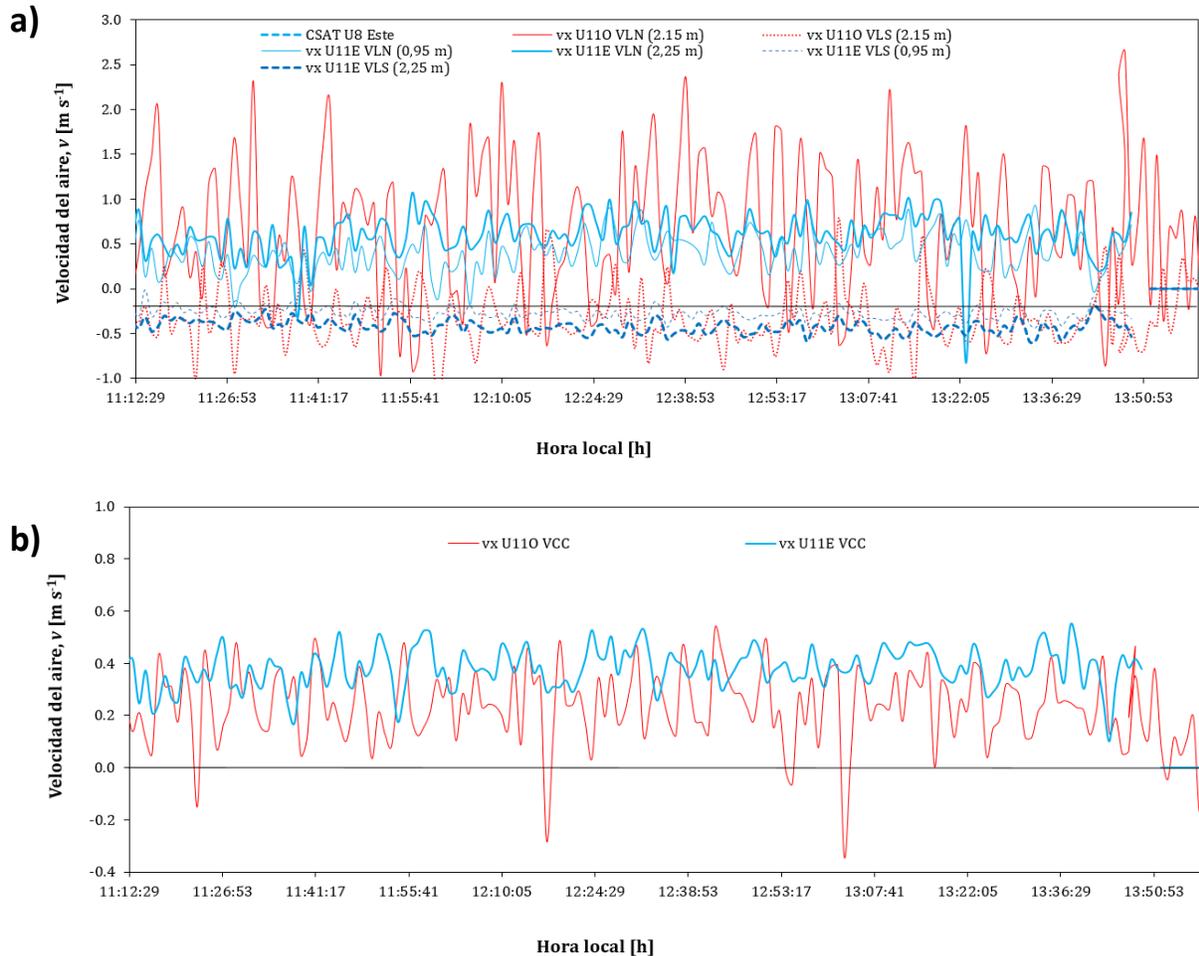


Figura 50. Evolución de las componentes perpendiculares de la velocidad del aire v_x medidas con los anemómetros 2D a través de las ventanas Norte y Sur del lado Oeste U110 (—) y del lado Este U11E (—) a lo largo del primer ensayo realizado con viento de *Levante* el 8/6/2017 (a) y velocidad en el centro del invernadero a 1.5 m de altura (b).

Los dos vientos más frecuentes en la provincia de Almería son los canalizados por la costa Mediterránea: el *Levante*, un viento del norte-este seco y templado que sopla hacia el mar y el *Poniente*, un viento del oeste húmedo y fresco proveniente del mediterráneo (Capel-Molina, 1990; Kuciauskas *et al.*, 1998). En el caso del invernadero experimental U11, el viento de *Levante* sopla perpendicular a las ventanas cuando la dirección es de 28°NE (Figura 51). En este caso la ventana norte del sector U110 que queda a barlovento se encuentra libre de obstáculos, mientras que la ventana lateral de barlovento correspondiente al invernadero U11E (de mayor tamaño) se encuentra obstaculizada por la presencia de una nave a 2 m de distancia, donde se aloja el controlador climático, de unos 10.2 m de anchura (Figura 51).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

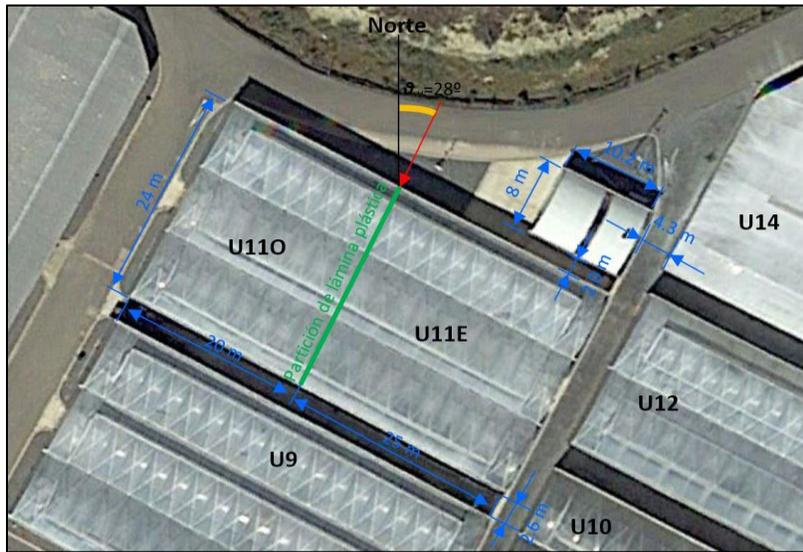


Figura 51. Imagen de satélite del invernadero experimental U11, con sus dimensiones y orientación de las ventanas con respecto al norte. También aparecen los invernaderos vecinos.

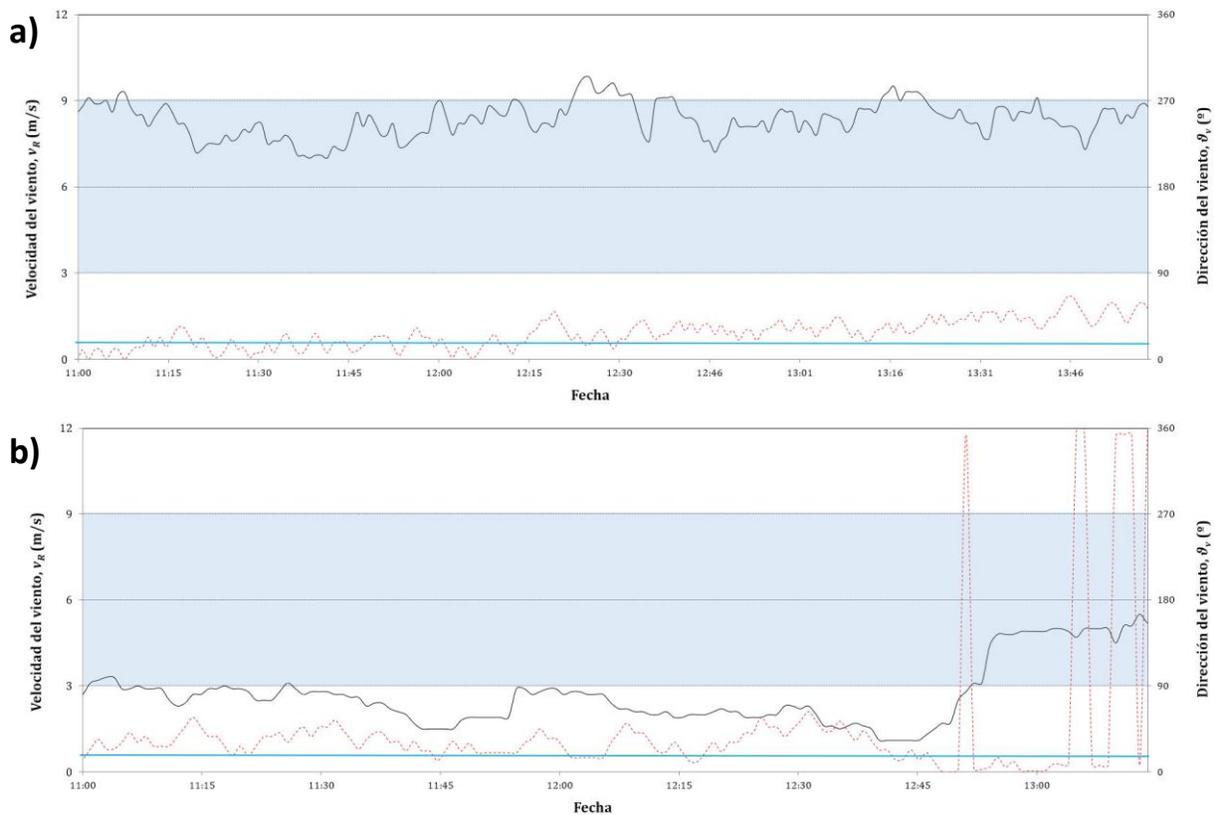


Figura 52. Evolución de la velocidad del viento (—) y la dirección (....) para los dos días de ensayos puntuales: el 8/6/2017 (a) y el 16/6/2017 (b). Se indica la dirección de 28°NE perpendicular a las ventanas para viento de *Levante* (—) y la zona de viento de dirección Sur (□).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERNADERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Cuando el viento sopla de Poniente, procedente del Suroeste, las ventanas laterales ambos sectores se encuentran obstaculizadas por la presencia del invernadero U9, de iguales dimensiones al U11, situado a 2.6 m de distancia. Este invernadero influye de forma decisiva en la ventilación natural del invernadero U11, tanto reduciendo el caudal de ventilación (López et al., 2011) como modificando la forma en la que se mueve el aire (Espinoza et al., 2017).

En la Figura 24 se observa que la dirección media del viento exterior para el primer día de ensayo fue muy próxima a la perpendicular, y muy estable. Esto propició que las velocidades medidas en las ventanas laterales (Figura 50) también fueran estables tanto en intensidad como en dirección. Pese a ello, se pueden observar grandes fluctuaciones en la velocidad del aire, principalmente las registradas en el lado Oeste, tanto en los anemómetros situados junto a las dos ventanas laterales (Figura 50a), como el situado en medio de las plantas (Figura 50b). Incluso se pueden observar cambios de sentido en los que los valores negativos se corresponden con un movimiento de aire de Sur a Norte, en sentido contrario al viento exterior de Levante.

Tabla 11. Valores de velocidad medidos con los anemómetros 2D en continuo v_j y valores normalizados ($v_j^*=v_j \cdot \bar{U}_0 / U_{0j}$) con la velocidad del viento (Molina-Aiz et al., 2009) medidos con los anemómetros 3D en las ventanas del invernadero U11 en el ensayo realizado el 8/6/2017 con un viento de $\bar{U}_0=8.3 \text{ m s}^{-1}$ (v_j^* es positiva para entrada de aire en el invernadero y negativa para salida).

Medidas con 3DSAT en el sector U11E con las ventanas de 3.3 m de altura v_j^* [m s^{-1}]						
<i>Ventana</i>	<i>Lateral Norte</i>			<i>Lateral Sur</i>		
Altura	3.45 m	2.35 m	1.75 m	3.45 m	2.35 m	1.75 m
Posición G	1.01	0.91	0.80	-0.41	-0.28	-0.23
Posición F	0.80	0.69	0.49	-0.47	-0.33	-0.33
Posición E	0.14	0.16	0.25	-0.51	-0.41	-0.30
Posición D	0.08	0.18	0.12	-0.39	-0.37	-0.36
Posición C	0.30	0.37	0.17	-0.50	-0.48	-0.39
Posición B	0.45	0.23	-0.02	-0.63	-0.57	-0.58
Posición A	0.11	-0.02	-0.28	-0.59	-0.49	-0.56
Media A-G	0.41	0.36	0.22	-0.50	-0.42	-0.39
Medidas con 2D en el sector U11E con las ventanas de 3.3 m de altura v_j [m s^{-1}]						
Posición E	0.60	-	0.41	-0.42	-	-0.27
Medidas con 2D en el sector U11O con las ventanas de 0.9 m de altura v_j [m s^{-1}]						
Posición E	-	0.69	-	-	-0.31	-

Las medidas de velocidad muestran una importante variación en la ventana Norte, provocado por la presencia de la nave del controlador climático en los últimos 10.2 m (Figura 51) del extremo Este del sector U11E, afectando por tanto a las posiciones A-C (Figura 52). En las dos últimas posiciones (A-B) se observa incluso un cambio de sentido del flujo de aire en la ventana Norte del sector U11E, lo que indica que el aire forma una especie de remolino al pasar alrededor de la nave, algo muy común cuando el viento supera un obstáculo (Molina-Aiz, 2010).

Como consecuencia la presión en el pasillo que queda entre la nave y el invernadero U11 es inferior a la del interior del invernadero producción la salida del aire por la mitad inferior. En esta ventana, la velocidad del aire es mayor en las posiciones F y G de la zona centro del invernadero (Tabla 11), donde se encuentra la partición de plástico (Figura 51), y más expuesta al viento de Levante.

En la ventana Sur del sector U11E, todo el flujo es de salida, con valores negativos de velocidad en todas las posiciones (Tabla 11). Además, como en este caso la presencia del invernadero vecino U9 afecta por igual a toda la ventana, el flujo es más homogéneo con velocidades pequeñas variaciones entre localizaciones y entre las tres alturas de medida (Tabla 11). Si se analiza la distribución vertical de la velocidad media en la ventana Norte del sector U11E se aprecia un aumento con la altura, lo cual es normal por la distribución logarítmica que tiene la velocidad del viento exterior (Molina-Aiz et al., 2004) que se mantiene al incidir sobre la ventana (Reyes-Rosas, 2018).

Además, de las medidas desplazando los anemómetros 3D de unos puntos a otros, se estuvo midiendo de forma continua con los anemómetros 2D la velocidad del aire en una posición fija (E) en las dos ventanas laterales en ambos sectores. En este caso la velocidad media de 0.51 m s^{-1} medida con los anemómetros 2D en la ventana Norte del sector U11E, resultó ser algo superior a la media de 0.33 m s^{-1} registrada con los 3D (Tabla 11), posiblemente por el efecto comentado de la nave colindante.

En la ventana Sur se observa el efecto contrario, de forma que el promedio de los dos sensores 2D (-0.35 m s^{-1}) fue inferior a la media registrada por los sensores 3D (-0.44 m s^{-1}), lo cual puede deberse al efecto de las fluctuaciones de la velocidad del viento sobre las medidas de los sensores 3D al desplazarse entre puntos, pese a la corrección realizada [Ec. (6)]. Un aspecto coincidente de los anemómetros es que los dos tipos de sensores mostraron mayores valores de velocidad en la parte superior de las dos ventanas (Tabla 11).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Comparando los valores medios (Tabla 11) de las medidas de velocidad realizadas con los anemómetros 2D en las ventanas laterales de los dos sectores (Figura 50a), se observa que en la ventana Norte la velocidad del sector U11O (0.69 m s^{-1}) fue un 35% superior a la media de la ventana U11E (0.51 m s^{-1}). Sin embargo, el valor medio registrado en las dos posiciones de la ventana Norte del sector U11E libres de obstáculos (F y G) fue de 0.78 m s^{-1} (Tabla 11), por lo que quizás las diferencias se deban principalmente a la presencia de la nave del controlador, y no al efecto del tamaño de la ventana. Esto se corroboraría, con las medidas en la ventana Sur, en la que las velocidades de los sensores 2D mostraron valores más cercanos, de -0.35 m s^{-1} en el sector U11E y -0.31 m s^{-1} en el sector U11O (Tabla 11).

Cuando se compara la velocidad del aire medida por los sensores colocados en medio de las líneas de cultivo a 1.5 m de altura, se observa un valor medio de 0.38 m s^{-1} en el sector Este, un 58% superior a la registrada durante el primer ensayo en el lado Oeste de 0.24 m s^{-1} (Figura 50b). Además del valor superior en la intensidad de la velocidad del aire entre las plantas de tomate, en el lado Este (U11E) siempre se mantuvieron valores positivos de velocidad (Figura 50b), lo que indica que el aire se movía desde la ventana Norte por la que entraba el aire a la Sur por la que salía (Tabla 11). Sin embargo, en el sector U11O en algunas ocasiones los valores registrados fueron negativos (Figura 50b) lo que indica un cambio de sentido del aire que se movía al contrario del viento exterior, circulando por tanto de la parte Sur del invernadero hacia la Norte.

El segundo día de ensayo la velocidad del viento, mucho más débil que el primer día, varió tanto en intensidad como en dirección (Figura 52b). Los cambios de dirección producidos a partir de las 12:45 h (Figura 52b) provocaron importantes variaciones de dirección tanto en la velocidad medida en las ventanas (Figura 53a) como en el centro del invernadero entre las líneas de cultivo (Figura 53b), observando valores positivos y negativos. Por este motivo, para el cálculo del caudal de ventilación y el flujo de CO_2 y H_2O solo se han tenido en cuenta los datos del primer ensayo con condiciones de viento estables.

Como resultado de la reducción de la velocidad del viento exterior, los valores de velocidad medidos en las ventanas son muy bajos, por debajo de 0.2 m s^{-1} en el 70% de los puntos de medida (Tabla 12). En estas condiciones de baja velocidad del viento exterior y elevados gradientes de temperatura entre el interior y el exterior del invernadero, el efecto de flotabilidad térmica pasa a ser importante en el movimiento de aire.

La velocidad del viento exterior y la superficie de ventilación determinan en su mayor el caudal de ventilación de los invernaderos (Boulard y Draoui, 1995; Kittas *et al.*, 1996; Boulard *et al.*, 1997a). Sin embargo, el efecto de la flotabilidad térmica del aire caliente aumenta con la raíz cuadrada de ΔT_{ie} , mientras que el efecto del viento crece linealmente con su velocidad U_0 .

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

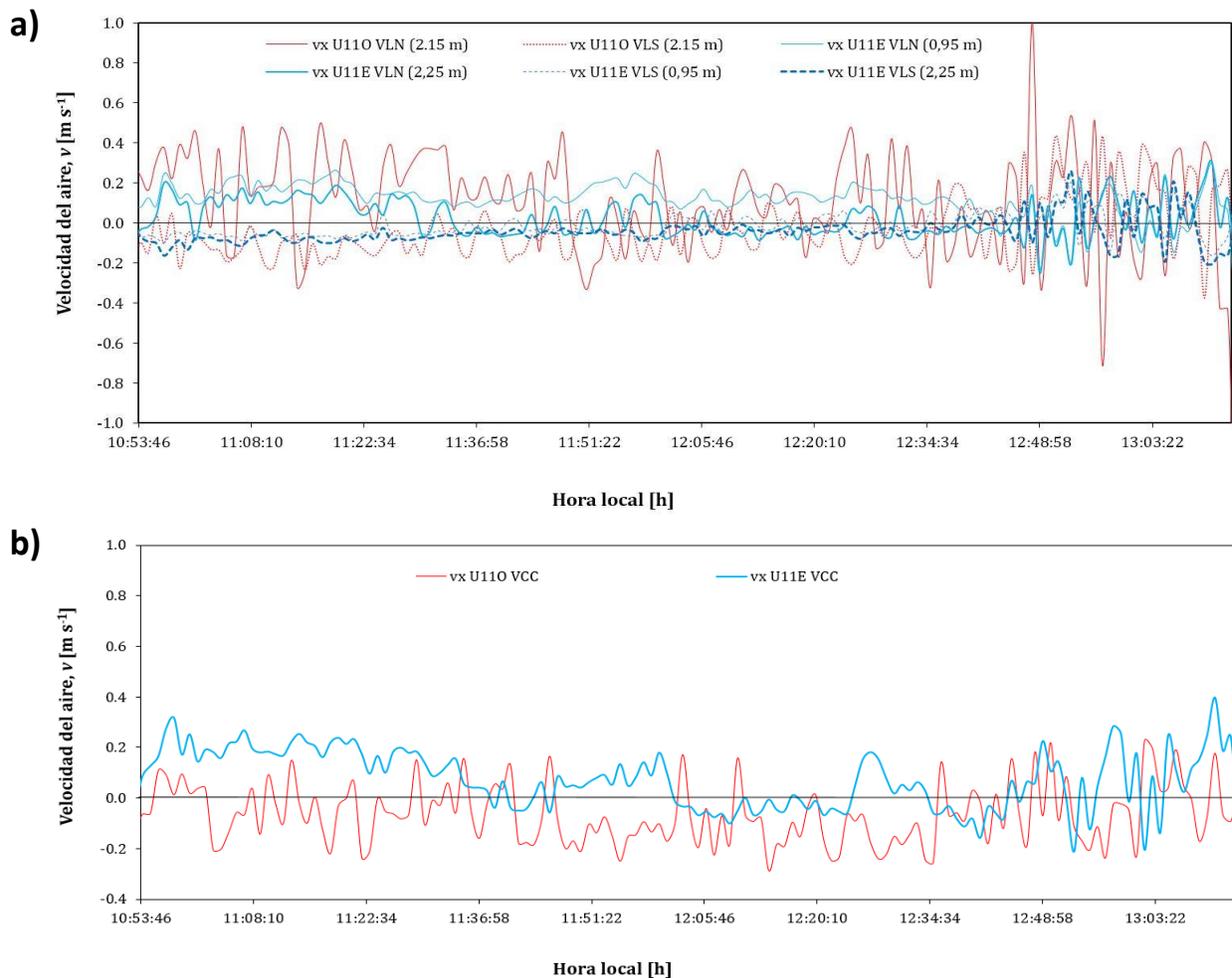


Figura 53. Evolución de las componentes perpendiculares de la velocidad del aire v_x medidas con los anemómetros 2D a través de las ventanas Norte y Sur del lado Oeste U110 (—) y del lado Este U11E (—) a lo largo del segundo ensayo realizado con viento inicialmente de Levante que viró a el 8/6/2017 (a) y velocidad en el centro del invernadero a 1.5 m de altura (b).

Cuando aumenta la velocidad del viento, el invernadero se refrigera mejor, reduciéndose el salto térmico y su influencia en el caudal de ventilación. En el caso de un invernadero multitúnel con ventanas tanto cenitales como laterales, como el invernadero experimental U11, el efecto térmico es más importante que en los invernaderos con un solo tipo de ventanas, siendo similar su influencia a la del viento para valores de $U_o/\Delta T_{ie}^{1/2} < 1$ (Kittas *et al.*, 1997a-b).

En el primer ensayo (realizado el 8/6/2017), ese valor era muy superior $U_o/\Delta T_{ie}^{1/2} = 5.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (Tabla 10), indicando que el valor del efecto térmico era prácticamente despreciable. Sin embargo, en el segundo ensayo (16/6/2017) el valor de la tasa era $U_o/\Delta T_{ie}^{1/2} = 1.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

(Tabla 10), lo que significa que el efecto térmico en este caso era de similar importancia a la del eólico. En general, en invernaderos multitúnel con ventanas cenitales y laterales, el efecto del viento predomina sobre el efecto de flotabilidad cuando la velocidad del aire es superior a $1.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Bot, 1983; Papadakis *et al.*, 1996). En algunos casos se ha observado que el efecto «chimenea» tiene importancia para vientos inferiores a $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ cuando están abiertas simultáneamente las ventanas laterales y cenitales (Boulard *et al.*, 1997a), siendo este sistema de ventilación más eficiente que la ventilación únicamente cenital para esas velocidades del viento con unas condiciones de temperatura normales ($\Delta T_{ie}=5^{\circ}\text{C}$) (Kittas *et al.*, 1997).

Como consecuencia de la interacción entre el efecto eólico y térmico, a un nivel de importancia similar, se observan valores negativos de velocidad del aire en la parte superior de ambas ventanas y valores negativos o casi nulos en la parte media (Tabla 12). Esto indica que el aire entra y sale por una misma ventana. Esto suele ocurrir cuando el efecto térmico tiene importancia y produce la salida por la mitad superior y entrada por la mitad inferior. En estas condiciones la medida de la velocidad en tres alturas no es suficiente para caracterizar con suficiente precisión el perfil de velocidad, y por tanto el caudal de ventilación, de modo que los datos de este ensayo no se utilizarán posteriormente para el cálculo del flujo de aire.

Observando la velocidad del aire medida por los sensores situados entre las plantas de tomate a 1.5 m de altura, se aprecia un valor medio de $0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en el sector U11E (Figura 53b), un 21% de la registrada durante el primer ensayo (Figura 50b). Este valor es superior en valor absoluto a la registrada en el lado Oeste, $-0.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, que además indica un sentido contrario al del viento exterior, moviéndose el aire de Sur a Norte. En el caso del sector Este también se observan valores negativos, indicándose un movimiento inverso al del viento exterior (Figura 53b) que coincide perfectamente con los momentos en los que la velocidad del viento exterior bajaba de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, aproximadamente a las 11:40 h y a las 12:30 h (Figura 52b).

Los valores medidos por los anemómetros 2D instalados en las ventanas de los dos sectores del invernadero U11, indican valores similares y muy bajos, entre $0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y $0.12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La principal ventaja del uso de ventanas de mayor tamaño en este caso proviene de la mayor capacidad de refrigeración al posibilitar mayor movimiento de aire. De igual forma los valores medios de velocidad medidos por los anemómetros 3D en las ventanas del sector U11E son del mismo orden de magnitud a los indicados por los anemómetros 2D, aunque con valores positivos y negativos, lo que se corresponde con la variabilidad observada en la evolución observada a lo largo de todo el periodo de medida (Figura 53a).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Tabla 12. Valores de velocidad medidos con los anemómetros 2D en continuo v_j y valores normalizados ($v_j^*=v_j \cdot \bar{U}_0 / U_{0j}$) con la velocidad del viento (Molina-Aiz et al., 2009) medidos con los anemómetros 3D en las ventanas del invernadero U11 en el ensayo realizado el 16/6/2017 con un viento de $\bar{U}_0=2.7 \text{ m s}^{-1}$ (v_j^* es positiva para entrada de aire en el invernadero y negativa para salida).

Medidas con 3DSAT en el sector U11E con las ventanas de 3.3 m de altura v_j^* [m s^{-1}]						
Ventana	Lateral Norte			Lateral Sur		
Altura	3.45 m	2.35 m	1.75 m	3.45 m	2.35 m	1.75 m
Posición A	0.04	0.27	0.20	-0.19	-0.02	-0.17
Posición B	0.03	0.23	0.17	-0.19	0.01	-0.13
Posición C	-0.09	0.18	0.14	-0.27	0.05	-0.18
Posición D	-0.10	0.22	0.13	-0.16	0.08	-0.10
Posición E	-0.20	0.04	-0.17	-0.22	0.02	-0.18
Posición F	-0.40	0.08	-0.29	-0.16	0.02	-0.13
Posición G	-0.12	-0.05	-0.12	-0.14	0.00	-0.15
Media A-G	-0.12	0.14	0.01	-0.19	0.02	-0.15
Medidas con 2D en el sector U11E con las ventanas de 3.3 m de altura v_j [m s^{-1}]						
Posición D	0.03	-	0.12	0.04	-	0.01
Medidas con 2D en el sector U11O con las ventanas de 0.9 m de altura v_j [m s^{-1}]						
Posición D	-	0.11	-	-	0.03	-

Solamente el anemómetro 2D situado en la parte más baja de la ventana norte mostró siempre valores positivos de velocidad, es decir, entrada de aire en el invernadero (Figura 53a). Los sensores del lado Sur se mantuvieron casi todo el ensayo en torno a -0.1 m s^{-1} , pero con los cambios de dirección y el aumento de la velocidad del viento producidos en los últimos 30 minutos de ensayo (Figura 52b), pasaron a medir valores positivos de hasta 0.4 m s^{-1} , (Figura 53a).

Esto indica la gran sensibilidad de la ventilación a pequeños cambios de velocidad y dirección, cuando el viento no sopla muy fuerte. Estas suelen ser las condiciones en las que mayores temperaturas se alcanzan en los invernaderos y en las que más importante es incrementar la ventilación.

5.2. Cálculo del caudal de aire en las ventanas

A partir de las medidas de velocidad en las ventanas laterales (Tablas 11 y 12) se han calculado los caudales de ventilación en cada uno de los 42 puntos de medida con los anemómetros 3D (Figuras 43 y 44). En el primer ensayo del 8/6/2017 se observa un caudal de entrada por la ventana Norte de barlovento de $21.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, inferior a la Sur situada a sotavento $-26.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, lo que supone un error de media del 23.7% (Tabla 13), dentro de lo que suele ser habitual en este tipo de ensayos con muchos puntos de medida (Molina-Aiz *et al.*, 2009).

Tabla 13. Valores del caudal volumétrico de ventilación G_j ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) a través de cada punto de medida j en las ventanas laterales del invernadero U11 calculados con los valores de velocidad del aire medidos con los anemómetros 3D normalizados v_j^* con la velocidad del viento (G_j es positivo para entrada de aire en el invernadero y negativo para salida).

Ensayo realizado el 8/6/2017 con un viento de $\bar{U}_0=8.3 \text{ m s}^{-1}$						
Ventana	Lateral Norte			Lateral Sur		
Altura	3.45 m	2.35 m	1.75 m	3.45 m	2.35 m	1.75 m
Posición G	3.55	1.71	2.39	-1.43	-0.52	-0.69
Posición F	2.79	1.29	1.47	-1.64	-0.62	-1.00
Posición E	0.65	0.39	0.98	-2.35	-1.02	-1.20
Posición D	0.37	0.46	0.47	-1.82	-0.93	-1.43
Posición C	1.05	0.69	0.51	-1.74	-0.90	-1.18
Posición B	1.58	0.44	-0.06	-2.19	-1.06	-1.73
Posición A	0.23	-0.02	-0.50	-1.23	-0.55	-1.00
Caudal total de entrada, G_E ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	21.1		Caudal de salida, G_S ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)		-26.8	
Caudal medio, G_M ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)= ($ G_E + G_S $)/2						24.0
Error de cálculo, E_G (%)= ($ G_E - G_S $)/ $G_M \cdot 100$						23.7
Ensayo realizado el 16/6/2017 con un viento de $\bar{U}_0=2.7 \text{ m s}^{-1}$						
Ventana	Lateral Norte			Lateral Sur		
Altura	3.45 m	2.35 m	1.75 m	3.45 m	2.35 m	1.75 m
Posición G	0.14	0.51	0.59	-0.68	-0.03	-0.51
Posición F	0.10	0.43	0.50	-0.65	0.02	-0.40
Posición E	-0.41	0.44	0.55	-1.25	0.11	-0.72
Posición D	-0.47	0.54	0.52	-0.74	0.20	-0.41
Posición C	-0.69	0.08	-0.51	-0.75	0.04	-0.55
Posición B	-1.39	0.15	-0.87	-0.57	0.04	-0.39
Posición A	-0.26	-0.05	-0.22	-0.29	0.00	-0.27
Caudal total de entrada, G_E ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	5.0		Caudal de salida, G_S ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)		-13.1	
Caudal medio, G_M ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)= ($ G_E + G_S $)/2						9.0
Error de cálculo, E_G (%)= ($ G_E - G_S $)/ $G_M \cdot 100$						90.0

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERNADERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Teniendo en cuenta que el volumen del sector Este es de 3420 m^3 , el caudal medio de $G_M=24.0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ corresponde a una tasa de ventilación de $R=25.2 \text{ h}^{-1}$. Este valor medido utilizando solo las dos ventanas laterales (y con las tres ventanas cenitales cerradas) es más del doble del obtenido para vientos similares ($\bar{U}_0=8.3 \text{ m s}^{-1}$) en el mismo invernadero experimental U11 con las ventanas cenitales abiertas cuando todas las ventanas laterales eran del tipo estándar mantenido en el sector U110.

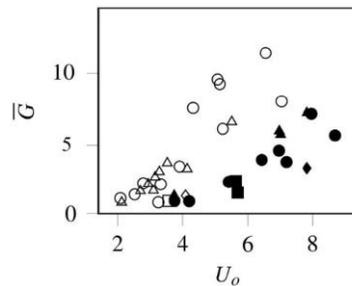


Figura 54. Valores del flujo medio de ventilación G_M ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) en función de la velocidad del viento \bar{U}_0 (m s^{-1}) en el invernadero U11 con todas dos y tres ventanas cenitales abiertas (Espinoza *et al.*, 2017).

También este valor es muy superior al de $R=16.8 \text{ h}^{-1}$ medido en un invernadero tipo Almería con dos ventanas laterales y dos cenitales para un viento de $\bar{U}_0=8.4 \text{ m s}^{-1}$. Estos valores indican la mejora que supone para la capacidad de ventilación el aumento de la superficie de ventilación lateral.

Como consecuencia del aumento de esta capacidad de ventilación, reflejada en el aumento de la velocidad del aire dentro del invernadero (Figuras 50b y 53b), se registraron temperaturas medias dentro del invernadero unos $2\text{-}3^\circ\text{C}$ inferiores en el sector U11E con las ventanas grandes que en el U110 con las ventanas estándar (Figura 56).

El descenso de temperatura registrado en el invernadero experimental concuerda con los valores predichos mediante simulaciones de CFD realizadas por Reyes-Rosas (2018) en los que el aumento de la superficie de ventilación lateral reducía alrededor de 1°C la temperatura interior (Figura 55).

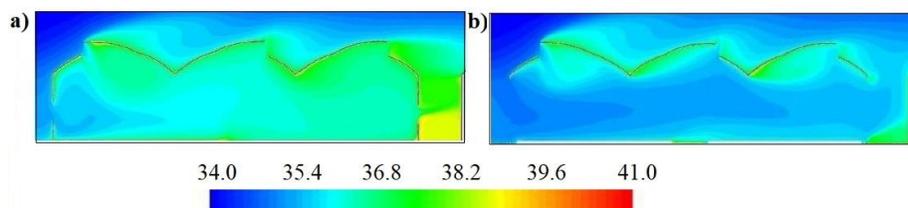


Figura 55. Distribuciones de temperatura simuladas con CFD para el invernadero experimental U11 con viento del norte de 2.6 m s^{-1} con las ventanas instaladas en el sector U110 (a) y un diseño similar a las instaladas en el sector U11E (b) con las ventanas cenitales abiertas (Reyes-Rosas, 2018).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

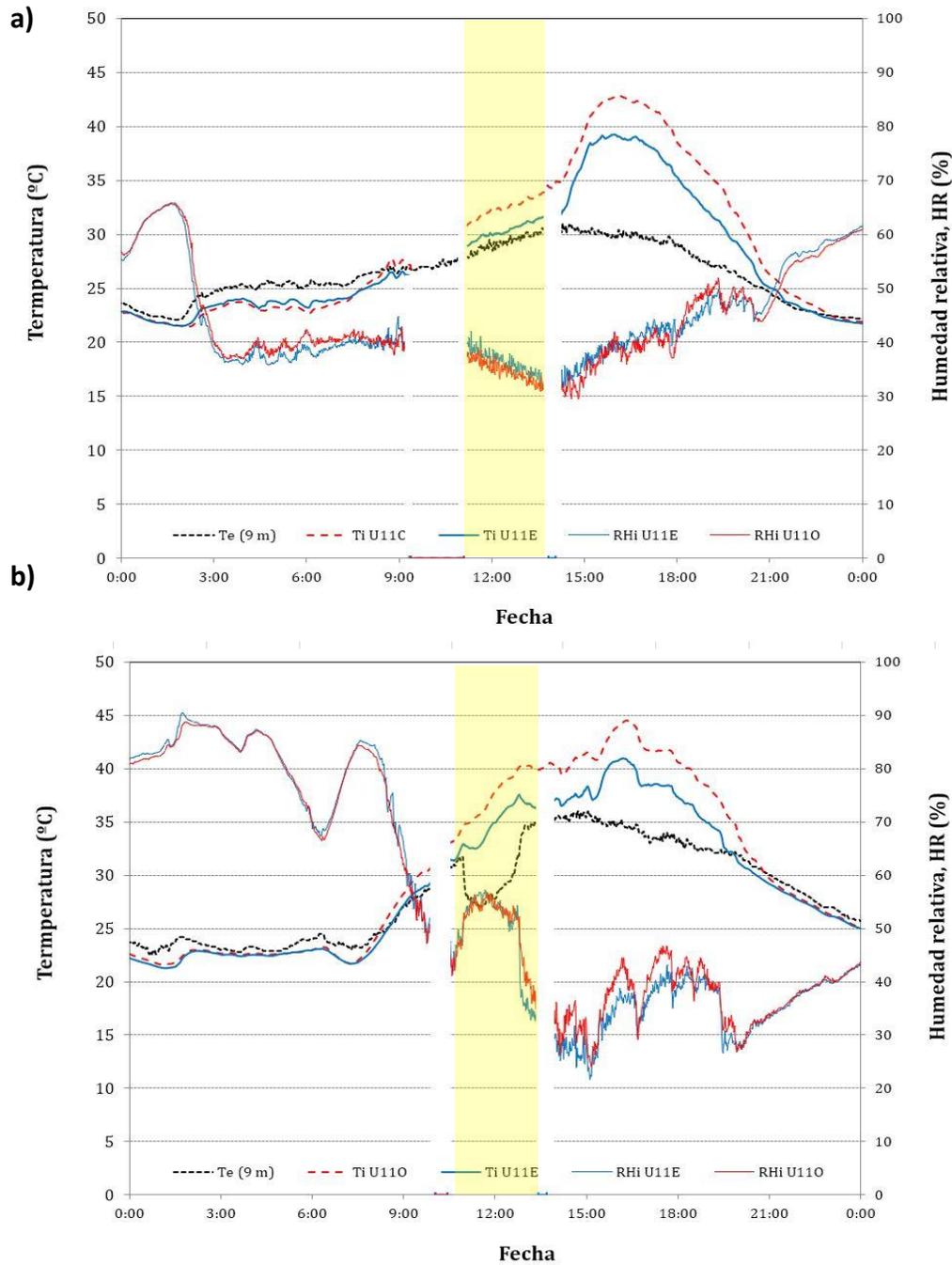


Figura 56. Evolución de la temperatura del aire fuera (···) y dentro del invernadero en el lado este U11E (—) y en el lado oeste U11O (---) y de la humedad relativa del aire interior en el lado este U11E (—) y en el lado oeste U11O (---) para los dos días de ensayos realizados con viento de Levante el 8/6/2017 (a) y el 16/6/2017 (b). Periodo de duración de los ensayos (□).

La reducción de la temperatura dentro del sector U11E (en comparación con el sector U11O) observada en los dos días de ensayos puntuales con las ventanas cenitales cerradas (Figura 56), también se observa en los días de máximas temperaturas interiores (Figura 57a) correspondientes a vientos superiores a 6 m s^{-1} en los que el controlador climático comienza a cerrar parcialmente las ventanas cenitales para evitar su rotura, pero mantiene abiertas las ventanas laterales (Figura 57b).

El cierre por seguridad de las ventanas cenitales en los invernaderos multitúnel supone un importante inconveniente (Reyes-Rosas *et al.*, 2017) que puede ser solventado en parte mediante el incremento de la superficie de ventilación lateral.

La reducción de la temperatura observada en el sector U11E permite incluso contrarrestar el efecto de la mayor radiación solar interior registrada en las horas centrales del día en esta parte del invernadero (Figura 57c), debida posiblemente a un menor encalado de la cubierta. Dado que el blanqueo de la cubierta se realiza de forma manual, es bastante común que se produzca una elevada heterogeneidad en la transmisividad de la cubierta.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

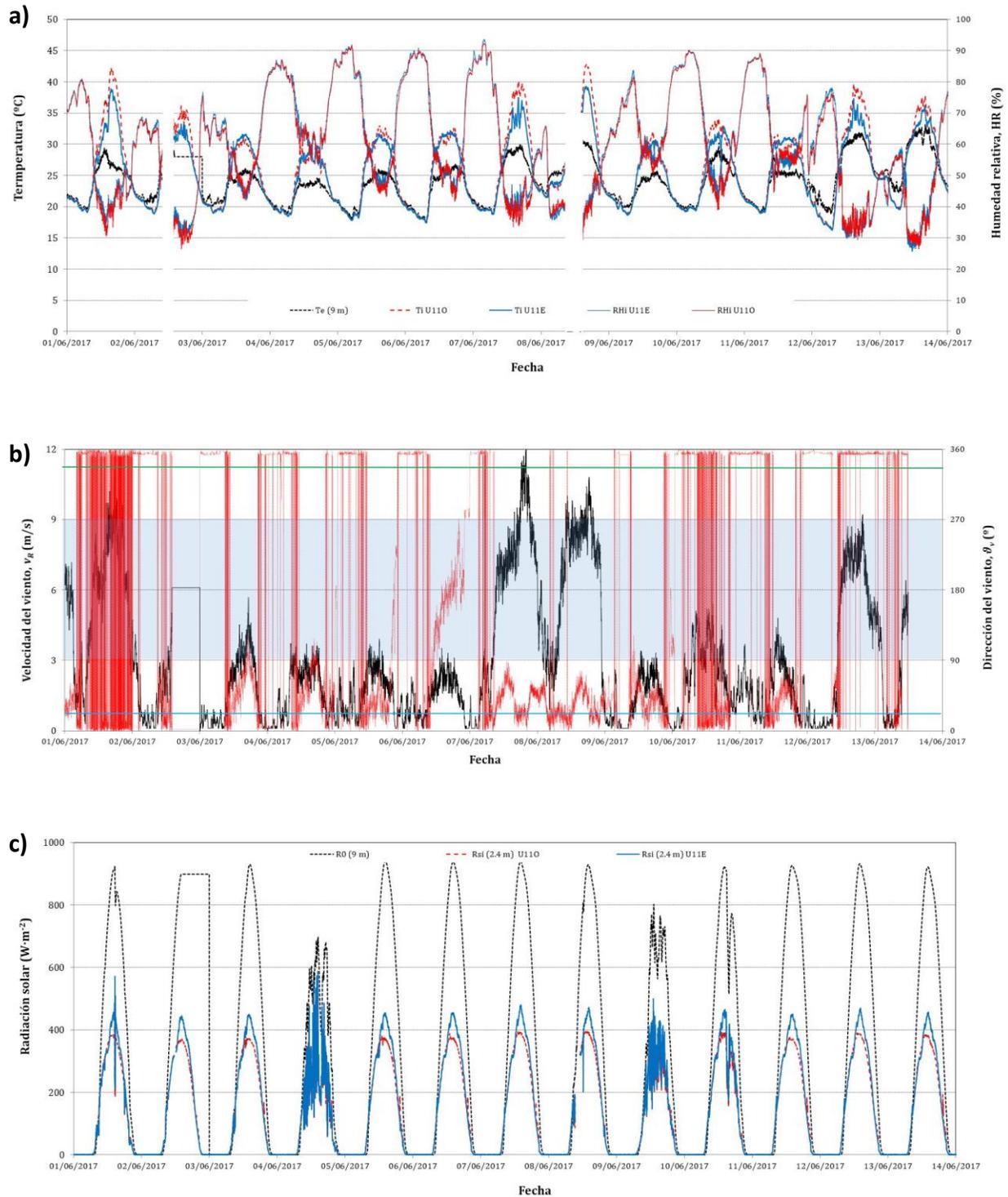


Figura 57. a) Evolución de la temperatura del aire fuera (---) y dentro del invernadero en el lado este U11E (—) y en el lado oeste U110 (---) y de la humedad relativa del aire interior en el lado este U11E (—) y en el lado oeste U110 (---) para la primera quincena de junio. b) Evolución de la velocidad (—) y la dirección del viento (....). Dirección de 28°NE perpendicular a las ventanas para viento de Levante (—) y viento proveniente del Sur (□). c) Evolución de la radiación solar exterior (---) y dentro de los sectores U11E (—) y U110 (---)

5.3. Análisis del microclima del invernadero

5.3.1. Análisis de temperaturas

5.3.1.1. Valores medios de temperatura del aire

Observamos diferencias estadísticamente significativas respecto a las temperaturas medias a diferentes alturas tanto en la parte Norte cómo en la Sur para los sectores U11O y U11E. El sector Este muestra valores más bajos debido a una mayor tasa de renovación fruto de una mayor superficie de ventilación, lo que le permite mantener temperaturas más cercanas a las del aire exterior cuando la ventilación está activa.

Las diferencias térmicas se muestran ligeramente superiores en el lado norte, debido posiblemente a la presencia en el lado sur de un invernadero a poca distancia de las ventanas que limita la ventilación (López et al., 2011).

En el caso de la parte central de ambos invernaderos a 1 m no existe de manera estricta diferencias significativas para todos los periodos medidos. Por el contrario, en la zona centro de los sectores, el sensor situado a 2 m de altura siempre tuvo una temperatura significativamente superior en el sector Oeste que en el Este. Esto puede deberse a tres efectos: La resistencia al flujo de aire que producen las plantas, la refrigeración por evapotranspiración del cultivo y el mayor flujo de aire en el sector con ventanas más grandes.

Así, a 1 m de altura el flujo de aire no se ve afectado por el incremento en el tamaño de las ventanas. En un reciente trabajo realizado por Reyes-Rosas (2018) se hicieron simulaciones por CFD comparando el invernadero experimental en su configuración de ventanas laterales (igual al lado Oeste) con el mismo invernadero pero con ventanas laterales mucho más grandes (similares a las del sector Este). En las simulaciones se podía observar como el mayor flujo de aire generado por el incremento de las ventanas se movía sobre la zona del cultivo, debido al efecto de resistencia aerodinámica que provocan las hojas de las plantas de tomate (Molina-Aiz et al., 2006; Molina-Aiz, 2010).

Además, a 1 m de altura, la evapotranspiración del cultivo produce una refrigeración del aire, de forma que en todos los periodos de medida se puede observar como la temperatura a 1 m es estadísticamente inferior a la registrada a 2 m, tanto para el sector Este (con diferencias de 0.1 a 0.7 °C), como para el sector Oeste donde se aprecian mayores diferencias (-0.3 a 1.5 °C).

Cabe destacar que para todos los periodos analizados, las temperaturas medias más elevadas se registraron en el sensor situado a 2 m en el centro del sector Oeste (Tabla 14). Esto suele ser habitual en invernaderos de poca anchura, en los que cuando el viento es débil, la ventilación se produce principalmente por efecto térmico o “chimenea”, por el cual el aire entra por las ventanas laterales, moviéndose hacia el interior donde se va calentando para elevarse después

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

debido al efecto de flotabilidad del aire menos denso y sale por las ventanas cenitales (Molina-Aiz et al., 2004; Molina-Aiz et al., 2007).

En los dos sectores se aprecia una diferencia significativa (Tabla 14) entre las temperaturas de 1 m y de 2 m (Figura 59), tanto en el sector Oeste (diferencia media de 0.6 °C) como en el sector Este (0.9 °C). Del mismo modo se observa una mayor diferencia a 1 m (1.1 °C) que a 2 m (0.8 °C) entre el lado Oeste más caliente y el lado Este más frío (Figura 58).

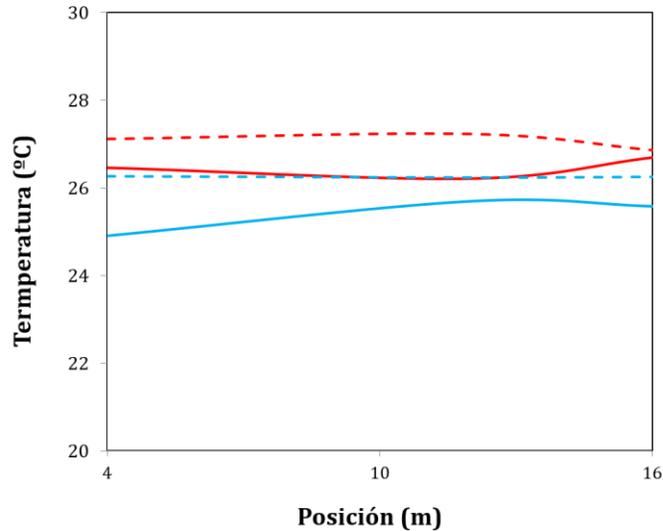


Figura 58. Variación a lo ancho del invernadero (posición con respecto al lateral norte) de las temperaturas medias registradas durante todo el periodo de crecimiento del cultivo en el invernadero U11: sector Este a 1 m de altura (—) y 2 m (- - -) y sector Oeste a 1 m de altura (—) y 2 m (- - -).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Tabla 14. Temperaturas medias del aire medidos por los diferentes sensores instalados en los dos sectores del invernadero experimental (en °C).

PERIODO	SECTOR ESTE						SECTOR OESTE					
	$T_i(1\text{ m})$ U11EN	$T_i(2\text{ m})$ U11EN	$T_i(1\text{ m})$ U11EC	$T_i(2\text{ m})$ U11EC	$T_i(1\text{ m})$ U11ES	$T_i(2\text{ m})$ U11ES	$T_i(1\text{ m})$ U11ON	$T_i(2\text{ m})$ U11ON	$T_i(1\text{ m})$ U11OC	$T_i(2\text{ m})$ U11OC	$T_i(1\text{ m})$ U11OS	$T_i(2\text{ m})$ U11OS
19/05-24/05	20.2 a	23.6 c	23.2 b	23.7 c	23.2 b	23.5 c	25.4 g	26.1 e	24.9 d	26.1 g	25.5 e	25.7 f
26/05-01/06	24.9 a	26.0 d	25.3 b	25.9 d	25.3 b	25.9 d	26.2 e	26.7 gh	25.6 c	26.8 h	26.6 f	26.6 fg
03/06-07/06	24.2 a	25.3 d	24.6 b	25.3 d	24.8 b	25.3 d	25.2 d	25. f	25.9 b	25.6 g	25.6 e	25.7 ef
09/06-15/06	25.0 a	26.3 e	25.5 bc	26.3 de	25.5 b	26.2 de	26.1 d	26.9 g	25.7 c	27.0 h	26.3 e	26.7 f
17/06-29/06	26.9 a	28.2 g	27.5 d	28.2 g	27.1 b	28.1 f	27.8 e	28.8 i	27.6 d	29.1 j	28.0 f	28.5 h
01/07-10/07	25.2 a	26.0 d	25.7 c	26.1 d	25.3 ab	26.1 de	26.1 d	26.7 g	25.7 c	27.0 h	26.1 d	26.3 f
12/07-24/07	27.9 a	28.4 d	28.0 b	28.1 c	27.8 a	28.6 fg	28.4 d	28.9 h	28.1 bc	29.0 i	28.7 g	28.5 de

Letras diferentes entre tratamientos de una misma fila (correspondiente a un mismo periodo de medida) indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias con un nivel del 95.0% de confianza. Las letras están ordenadas de temperatura más frías a más cálidas.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

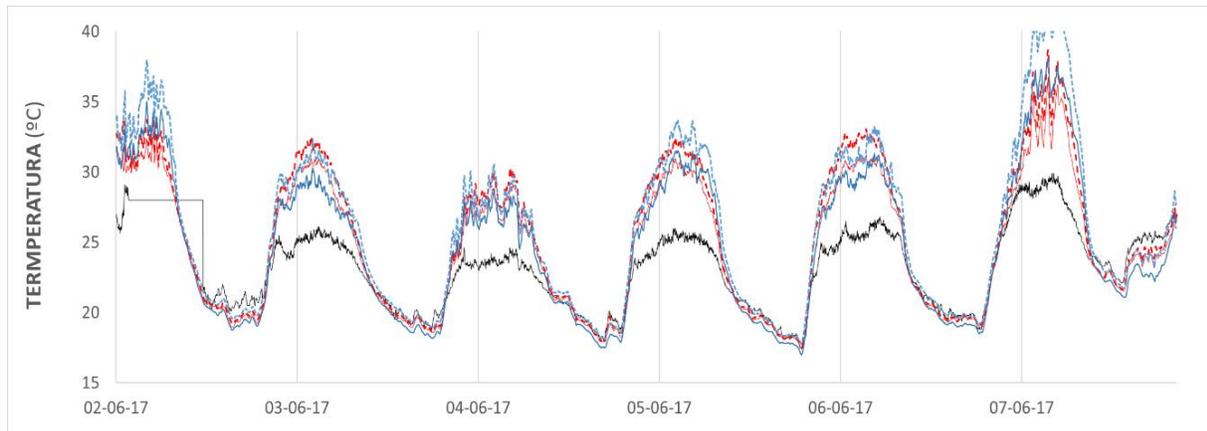


Figura 59. Evolución de la temperatura exterior (—), la temperatura en el centro del sector U11E a 1 m (---) y a 2 m (- - -) y la temperatura en el centro en el sector a 1 m (—) y 2 m (- - -) durante el periodo del 02/06/2017 al 07/06/2017.

Por otro lado, observamos que las diferencias entre invernaderos se muestran mucho mayores durante el primer periodo (19/06/2017-24 /06/2017) a partir del cual estas tienden a suavizarse y a tomar valores más arcidos entre diferentes periodos. Lo que es completamente razonable, teniendo en cuenta que un menor desarrollo del cultivo supone una menor capacidad del mismo para suavizar las temperaturas mediante la transpiración (Hernández, 2013).

Tabla 15. Diferencias en las temperaturas medias entre los sectores U110-U11E (en °C).

PERIODO	Ti (1 m) N	Ti (2 m) N	Ti (1 m) C	Ti (2 m) C	Ti (1 m) S	Ti (2 m) S
19/05-24/05	5.2	2.5	1.7	2.4	2.3	2.2
26/05-01/06	1.3	0.7	0.3	0.9	1.3	0.7
03/06-07/06	1.0	0.4	1.3	0.3	0.8	0.4
09/06-15/06	1.1	0.6	0.2	0.7	0.8	0.5
17/06-29/06	0.9	0.6	0.1	0.9	0.9	0.4
01/07-10/07	0.9	0.7	0	0.9	0.8	0.2
12/07-24/07	0.5	0.5	0.1	0.9	0.9	-0.1

Las diferencias observadas en las temperaturas promedio (Tablas 15 y 19) se acrecientan los días de más calor, como el 7 de junio cuando dentro del invernadero U11 se alcanzan más de 40 °C en la zona centro a 2 m de altura (Figura 59). En este caso las diferencias con el sector Este, en las ventanas laterales 3 veces más grandes, llegaron a ser de hasta 5°C (Figura 59).

5.3.1.2. Valores máximos y mínimos de temperatura

Los valores mínimos tienen poco interés ya que se han dado en momentos en los que la ventilación estaba inactiva, es decir durante las horas nocturnas. La prueba es que no se aprecian diferencias estadísticamente significativas, siendo los valores prácticamente iguales en las diferentes zonas estudiadas.

Por otro lado, se han observado valores máximos significativamente diferentes entre todos los sensores del lado Este (más fresco) y los del lado Oeste (más caliente). Además, los tres valores de temperaturas máximas se registran en los tres sensores del sector Oeste situados a 2 m de altura (Tabla 16) en concordancia a lo observado para las temperaturas medias.

A pesar de verse afectada la capacidad de refrigeración por parte de la ventilación en la cara sur debido a la presencia del invernadero contiguo, es en este lado donde incide el viento de Poniente más fresco. Si tenemos en cuenta que las ventanas de 0,9 m de altura se encuentran a 1.7 m y las de 3 m a 0.85 m, es de esperar que este frente más frío tenga una mayor incidencia a 2 m que a 1 m, lo que ha podido afectar a la distribución de las temperaturas máximas, reduciendo las diferencias entre invernaderos en momentos en los que viento de poniente coincide con las horas de mayor temperatura.

Las diferencias entre las máximas fueron superiores en la cara norte posiblemente debido a la presencia de viento de Levante durante las horas de temperaturas más altas.

5.3.1.3. Temperatura del cultivo

El análisis estadístico de las temperaturas del cultivo, medidas mediante el termistor adosado a las hojas de tomate, muestra unos resultados similares a las del aire. Así, las temperaturas fueron estadísticamente superiores en el lado Oeste a las del Este, tanto para las medias de todos los periodos como para las máximas (Tabla 17).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Tabla 16. Valores promedio de las temperaturas máximas y mínimas diarias en los dos sectores del invernadero U11 (en °C).

	SECTOR ESTE						SECTOR OESTE					
	$T_i(1\text{ m})$ U11EN	$T_i(2\text{ m})$ U11EN	$T_i(1\text{ m})$ U11EC	$T_i(2\text{ m})$ U11EC	$T_i(1\text{ m})$ U11ES	$T_i(2\text{ m})$ U11ES	$T_i(1\text{ m})$ U11ON	$T_i(2\text{ m})$ U11ON	$T_i(1\text{ m})$ U11OC	$T_i(2\text{ m})$ U11OC	$T_i(1\text{ m})$ U11OS	$T_i(2\text{ m})$ U11OS
Máximas	32.1 a	35.2 de	33.9 bc	35.3 de	33.8 bc	36.0 ef	35.4 de	37.3 g	35.2de	37.8 g	36.1 ef	37.2 fg
Mínimas	19.5 ab	19. a	19.7 a	19.7 a	19.5 a	19.4 a	19.8 abc	19.8 ab	19.4 a	20.0 abc	19.9 abc	19.5 a

Letras diferentes entre tratamientos de una misma fila (correspondiente a un mismo periodo de medida) indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias con un nivel del 95.0% de confianza. Las letras están ordenadas de temperatura más frías a más cálidas.

Tabla 17. Valores medios, máximas y mínimas de las temperaturas de las hojas de tomate correspondientes a los dos sectores del invernadero (en °C).

PERIODO	T_{v6} U11E	T_{v6} U11O
03/06-07/06	25.1 b	24.8 a
09/06-15/06	25.1 a	25.6 b
17/06-29/06	26.9 a	27.3 b
01/07-10/07	25.4 a	26.2 b
12/07-24/07	28.5 a	29.2 b
Máximas	32.8 a	34.3 b
Mínimas	20.6 a	20.6 a

Letras diferentes entre tratamientos de una misma fila (correspondiente a un mismo periodo de medida) indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias con un nivel del 95.0% de confianza. Las letras están ordenadas de temperatura más frías a más cálidas.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Tabla 18. Humedades absolutas medias del aire medidos por los diferentes sensores instalados en los dos sectores del invernadero experimental (en kg/kg).

PERIODO	SECTOR ESTE						SECTOR OESTE					
	$x_i(1\text{ m})$ U11EN	$x_i(2\text{ m})$ U11EN	$x_i(1\text{ m})$ U11EC	$x_i(2\text{ m})$ U11EC	$x_i(1\text{ m})$ U11ES	$x_i(2\text{ m})$ U11ES	$x_i(1\text{ m})$ U11ON	$x_i(2\text{ m})$ U11ON	$x_i(1\text{ m})$ U11OC	$x_i(2\text{ m})$ U11OC	$x_i(1\text{ m})$ U11OS	$x_i(2\text{ m})$ U11OS
19/05-24/05	0.00728 a	0.00748 b	0.00759 d	0.00754 c	0.00759 d	0.00752 c	0.00814 g	0.00813 g	0.00803 f	0.00806 f	0.00805 f	0.00793 e
26/05-01/06	0.00931 f	0.00907 a	0.0093 ef	0.00920 c	0.00927 de	0.00914 b	0.00936 g	0.00925 d	0.00929 ef	0.00920 c	0.00935 g	0.00911 b
03/06-07/06	0.00685 b	0.00667 a	0.00682 b	0.00672 a	0.00685 b	0.00671 a	0.01061 e	0.01036 d	0.01039 d	0.01025 d	0.01055 e	0.01016 c
09/06-15/06	0.01105 f	0.01039 a	0.01087 d	0.01054 b	0.01099 e	0.01054 b	0.01106 f	0.01061 c	0.01085 d	0.01052 b	0.01109 f	0.01040 a
17/06-29/06	0.01100 f	0.01027 a	0.01082 e	0.01041 b	0.01117 g	0.01056 d	0.01113 g	0.01057 d	0.01096 f	0.01045 b	0.01141 h	0.01050 c
01/07-10/07	0.01094 f	0.01054 a	0.01076 cd	0.01069 b	0.01111 h	0.01077 cd	0.01117 i	0.01083 e	0.01100 g	0.01073 bc	0.01141 j	0.01080 de
12/07-24/07	0.01187 cd	0.01169 a	0.01178 b	0.01195 ef	0.01190 cde	0.01186 c	0.01210 g	0.01198 f	0.01192 de	0.01186 c	0.01226 h	0.01205 g

Letras diferentes entre tratamientos de una misma fila (correspondiente a un mismo periodo de medida) indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias con un nivel del 95.0% de confianza. Las letras están ordenadas de humedades más altas a más frías

5.3.2. Análisis de la humedad del aire

5.3.2.1. Valores medios de humedad

En general los valores de humedad del aire fueron estadísticamente superiores en el lado Oeste a los del Este (Tabla 18).

Sin embargo en el periodo 26/05/2017-01/06/2017 no se apreciaron diferencias significativas para los valores de las zonas climáticas: central a 1 y 2m; y sur a 2 m. Además, las diferencias respecto a los valores de todas las zonas estudiadas en ambos invernaderos son muy pequeñas en comparación con los otros periodos.

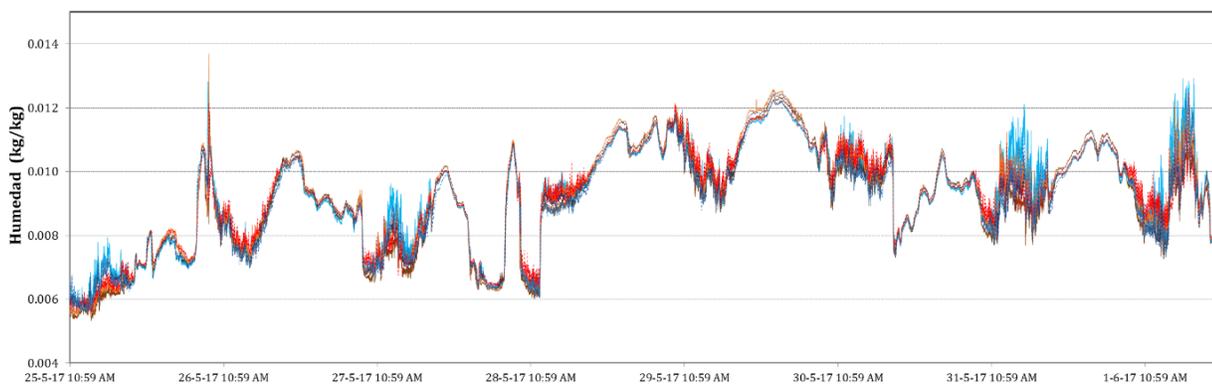


Figura 60. Evolución de la humedad en el sector U11E a en el centro a 1 m (---) y a 2 m (---), en la parte sur a 2 m (---) y en el sector U11O en el centro a 1 m (---) y a 2 m (---) y en la parte sur a 2 m (---) para el periodo del 25/05/2017 al 01/06/2017.

Durante estos días se registraron vientos intensos de Poniente y Levante, por lo que los dos sectores del invernadero ventilaron bien, haciendo que la humedad interior fuera próxima a la exterior dado que en esa fecha el cultivo aún no estaba totalmente desarrollado (Figura 60).

En el caso del día 26 de mayo a partir de las 10 a.m. aproximadamente el viento adquiere una dirección Levante, lo que explica una menor humedad en el sector U11E (Kuciauskas et al., 1998) por ser este un viento seco (Figura 61).

Durante el día 27 de mayo se registró un viento fuerte (alcanzando 10 m/s) (Figura 61) que produjo un cierre parcial de las ventanas del invernadero (Figura 4b) para evitar daños estructurales, lo que supuso que una mayor superficie de ventilación no afectara a los valores de humedad (Figura 60).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE



Figura 61. a) Evolución de la velocidad del viento (---) y su dirección (---) y b) del porcentaje de apertura de las ventanas para el periodo 25/05/2017 al 24/05/2017.

De forma similar, el día 28 de mayo, el viento de Levante va adquiriendo fuerza paulatinamente desde las 9 a.m. hasta las 1 p.m., cuando cambia a dirección a Poniente (6.5 m/s de máxima). A partir de las 5: 30 p.m. aproximadamente cambia a Levante otra vez (Figura 62a). La humedad sufre una bajada hasta la 1 p.m., cuando remonta debido al cese de la dirección de levante a esa hora y más tarde con la entrada de otro frente seco vuelve a remontar (Figura 62b).

Estos cambios bruscos de dirección del viento, produjeron fuertes variaciones en la humedad exterior registrada en la estación meteorológica, que se tradujeron por igual en el interior de los sectores del invernadero (Figura 62). Esto indica, que para vientos intensos se reduce el efecto de aumentar la superficie de ventilación lateral.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

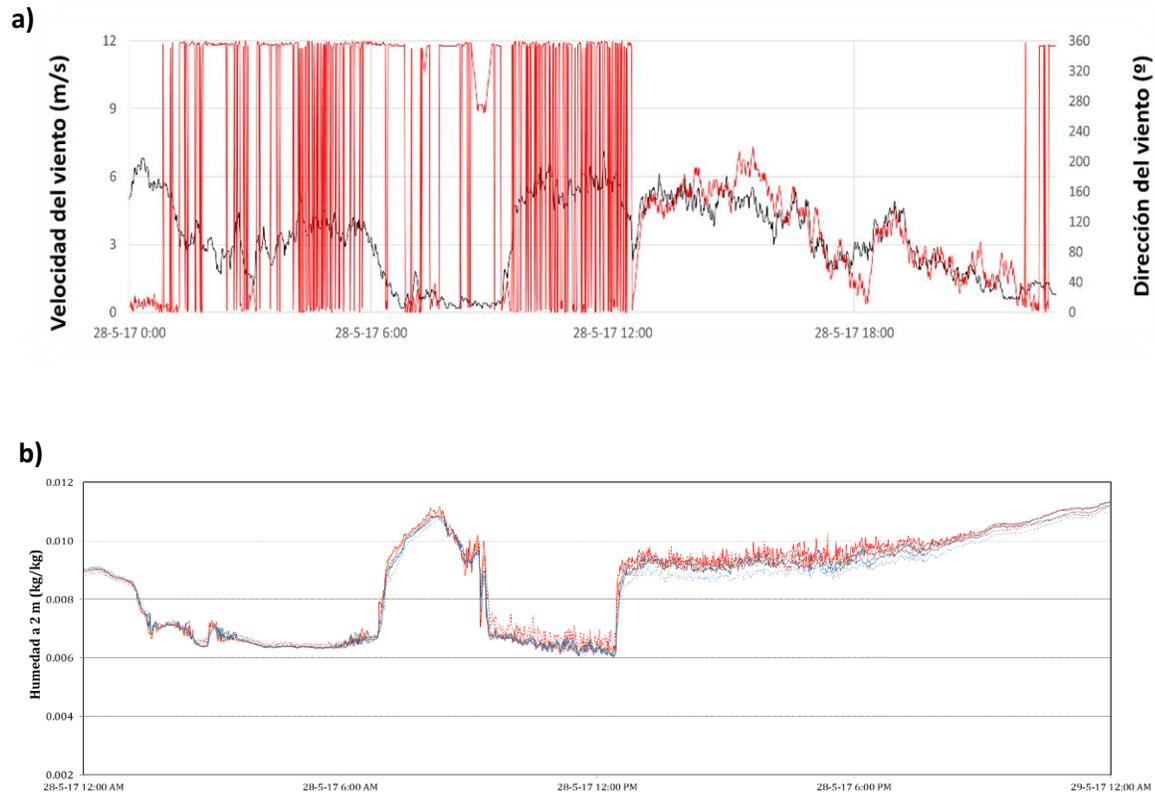


Figura 62. a) Evolución de la velocidad del viento (---) y su dirección (---), b) evolución de las humedad exterior y a 2 m en el sector Este en la parte norte (---), en el centro(---), en el sur (- - -) y en el sector Oeste en la parte norte (---), en el centro(---) y en el sur (- - -) para el periodo del 28/05/2017 al 29/05/2017.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

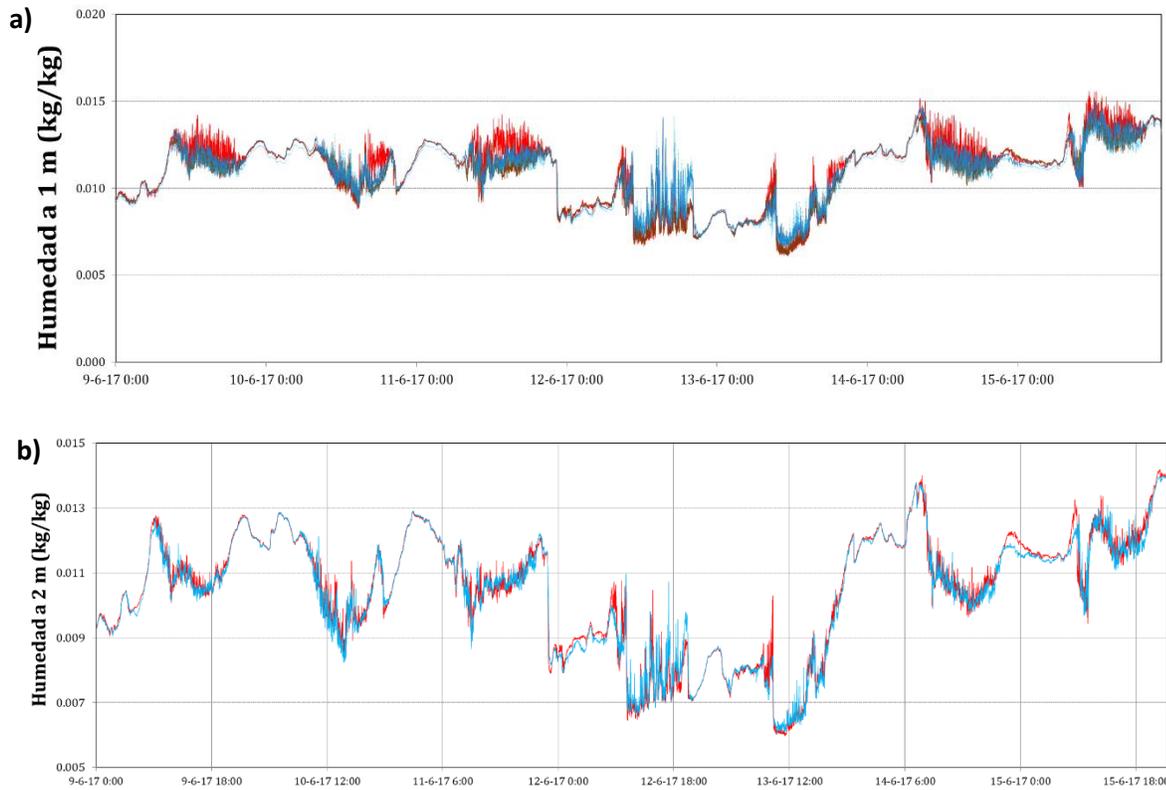


Figura 63. a) Evolución de las humedad y a 1 m en el sector Este en la parte norte (---), en el centro (---) y en el sector Oeste en la parte norte (---) y en el centro(---) , b) evolución de la humedad en el centro del sector Este (---) y Oeste (---) a 2 m para el periodo del 09/06/2017 al 15/06/2017.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

En los días 12 y 13 de junio se produjo un cierre parcial de las ventanas (Figura 64b), debido a viento intenso (Figura 64a), limitando el efecto de la ventilación sobre la humedad interior, lo que hizo que fueran próximos los valores registrados en los diferentes puntos (Figura 63).

El día 14, por otro lado, estuvo presente un viento de levante y la apertura de ventanas fue del 100%, afectando a los valores de humedad (Figura 63).



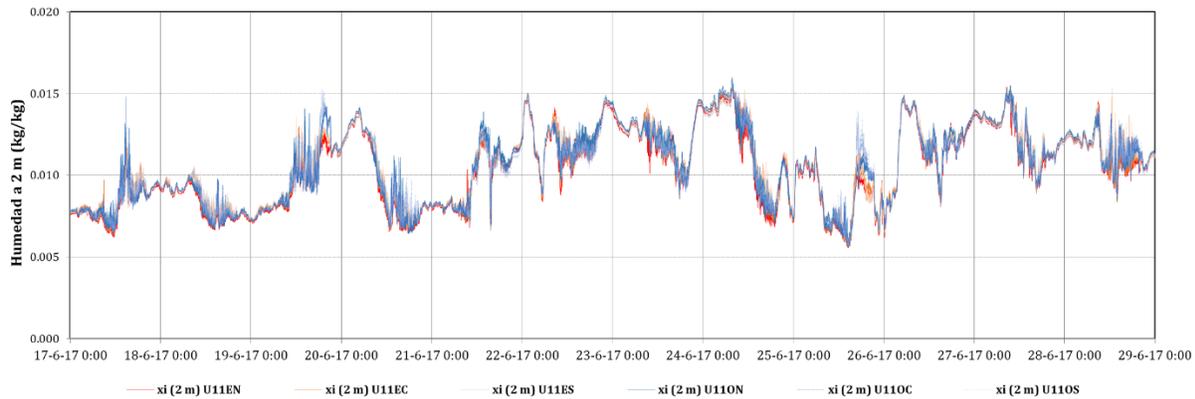
8. a) Evolución de la velocidad del viento (---) y su dirección (---) y b) del porcentaje de apertura de las ventanas para el periodo del 12/06/2017 al 15/06/2017.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERNADERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Durante el periodo del 17/06/2017 al 26/06/2017 no se han registrado diferencias significativas en la parte central de ambos invernaderos a 2 m.

Desde el día 17 al 28 de junio en general la humedad media del sector U110 (Figura 65) fue inferior a la del sector U11E (con mayores ventanas laterales).

a)



b)

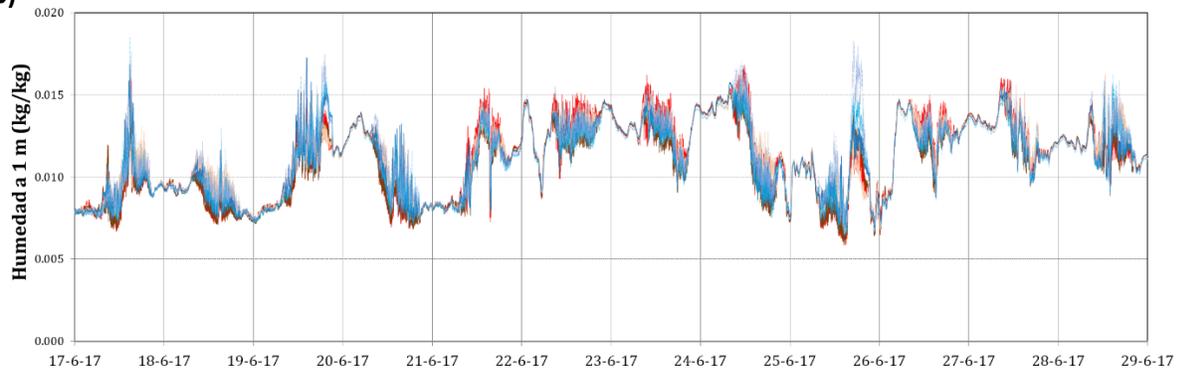


Figura 65. Evolución de las humedad a 2 m (a) y 1 m (b) en el sector Este en la parte norte (---), en el centro(---), en el sur (---) y en el sector Oeste en la parte norte (---), en el centro (---) y en el sur (---) para el periodo del 17/06/2017 al 29/06/2017.

La menor humedad en el lado Este (Figura 65) pudo deberse posiblemente a que durante estos días sopló viento de Levante durante la mayoría de las horas de luz.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

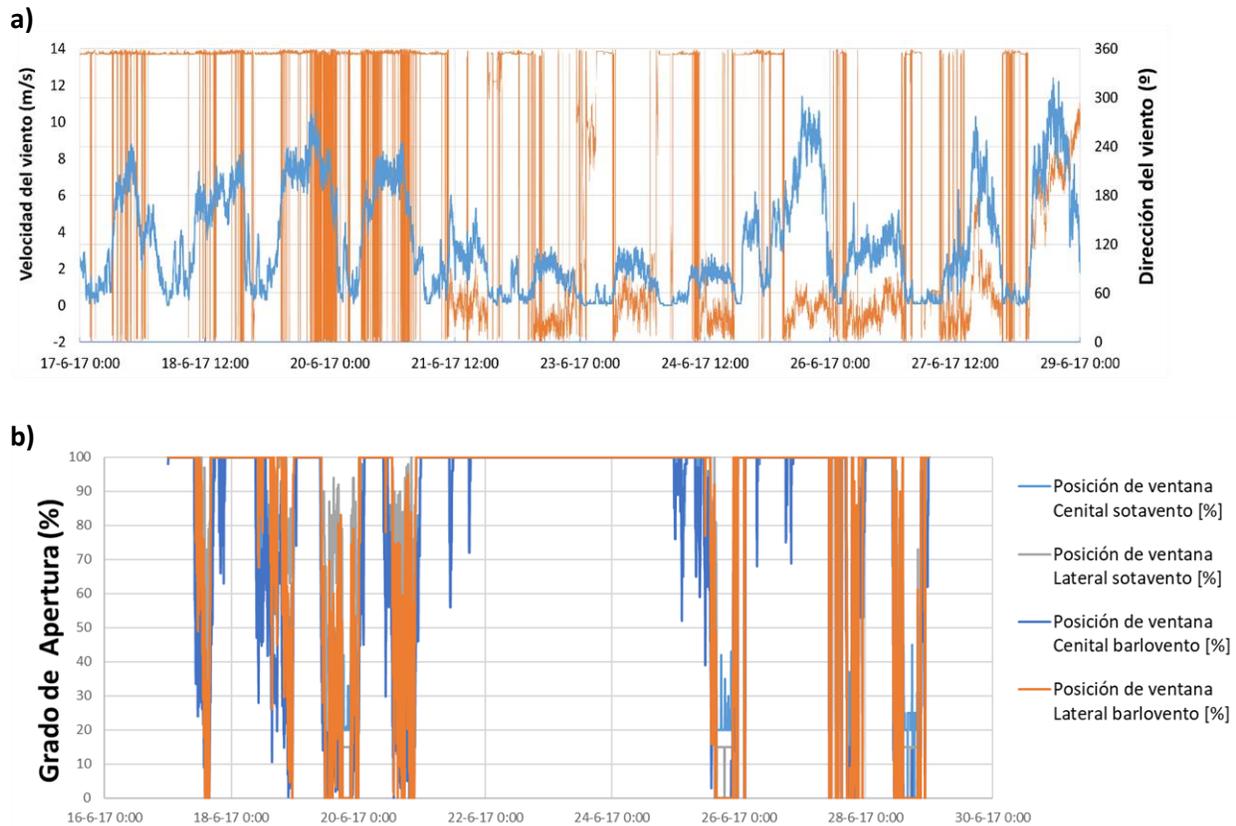


Figura 66. a) Evolución de la velocidad del viento (---) y su dirección (---) y b) del porcentaje de apertura de las ventanas para el periodo 16/05/2017 al 29/05/2017.

Conforme subía la intensidad del viento de Levante en las horas centrales del día (Figura 66a) con las ventanas abiertas (Figura 66b) se produce una bajada de la humedad interior (Figura 65), como el día 21 de junio. Sin embargo, cuando la velocidad subía de 8 m/s (Figura 66a), las ventanas se cerraban por seguridad (Figura 66b) y la humedad subía por efecto de la transpiración del cultivo (Figura 65) como el día 26/06/2017.

Cabe considerar en un primer momento, que este frente cálido ha afectado en mayor medida al invernadero U11E con una superficie de ventana mayor. Sin embargo los días 17, 19, 25, 27 y 28 debido al viento intenso la ventilación a estado limitada sobretodo a barlovento, por lo que no puede acharcarse esta diferencia de humedades al viento.

Aunque el mero echo de reducir en gran medida la ventilación de ambos sectores del invernadero supone una razón de peso para que la diferencia de tamaño de ventana no afecte a los valores medios de este parámetro lo que justifica la que en este periodo no se distinguan diferencias significativas (Tabla 18).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERNADERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Además, se han recogido valores más altos de humedad para la parte Sur a 2 m en el invernadero U11E. Sobre el invernadero U11E, situado más al sur que el U11O, incide una cantidad ligeramente mayor de radiación (Figura 67) lo que ha podido desencadenar una mayor transpiración por parte del cultivo y por consiguiente una mayor humedad en este invernadero dado que la ventilación se encontraba limitada. Estas diferencias de radiación pueden deberse a la heterogeneidad en el acolchado (Hernández, 2013).

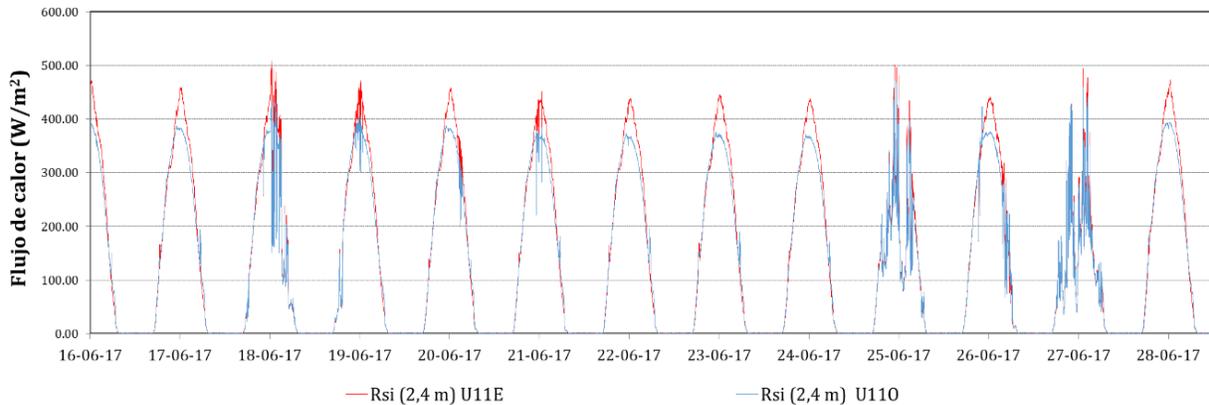


Figura 67. Evolución de la radiación a 2.4 m en el sector U11E (---) y U11O (---) para el periodo del 16/06/2017 al 28/06/2017.

En el caso del día 26 la intensidad del viento se redujo mucho, alcanzándose como valores máximos unos 4 m/s. A partir de las 10 a.m. aproximadamente este adquiere una dirección Levante, (Figura 68), lo que explica una menor humedad en U11E.

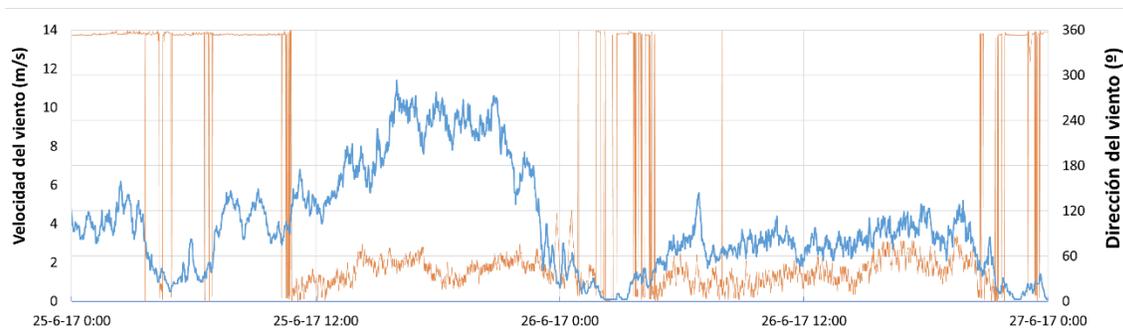


Figura 68. Evolución de la velocidad del viento (---) y su dirección (---) para el periodo del 25/06/2017 hasta el 27/06/2017.

A pesar de la limitación de la ventilación estos días, los valores medios absolutos de este periodo se muestran mas bajos, en menor o mayor medida dependiendo de la zona , en el invernadero Este, lo que deja patente el efecto que una mayor superficie de ventana para reducir la humedad.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

No se apreciaron diferencias para los valores de humedad a 2 m de la parte central para el periodo del 17/06 al 29/06.

El día 02/07/2017 viento muy intenso (11.4 m/s de máxima) de Levante estuvo presente hasta el día 8 que cambia a poniente y se mantuvo durante los siguientes días bajo un régimen de velocidades bajas (Figura 69a).

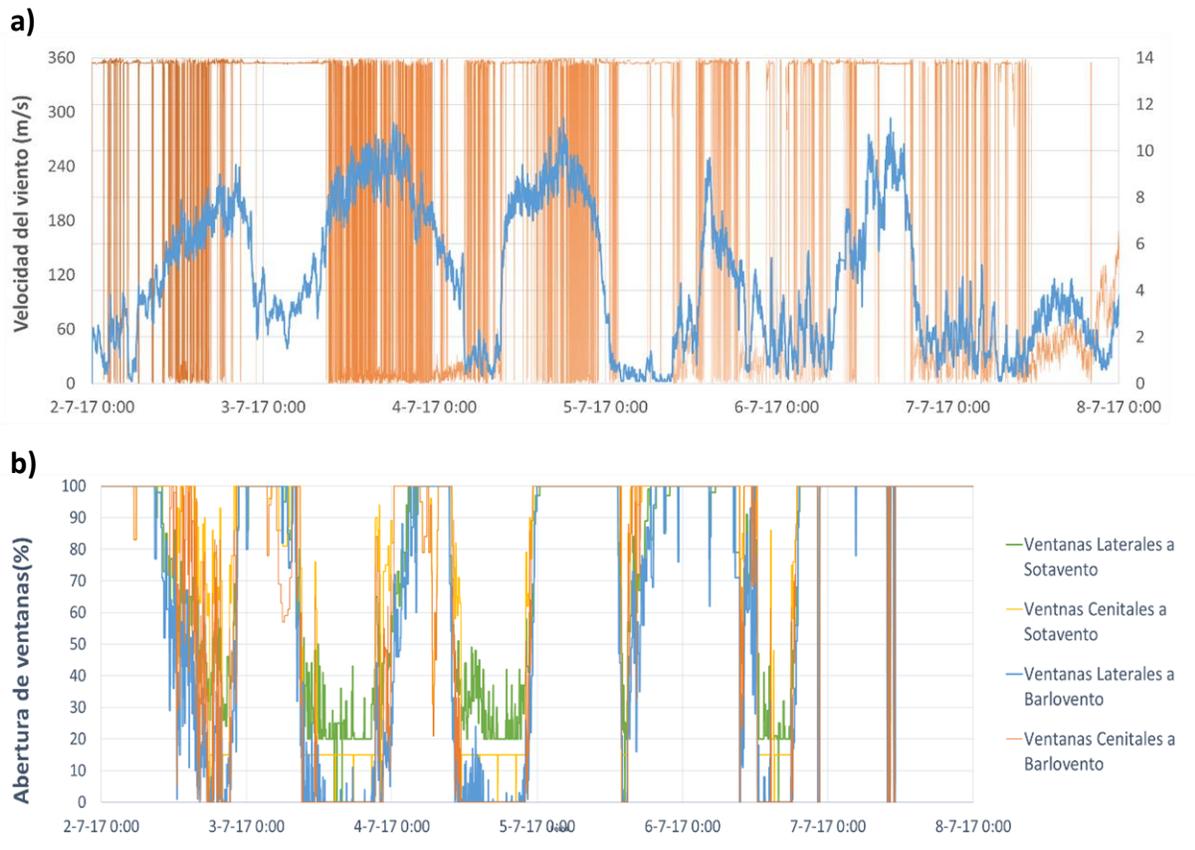


Figura 69. a) Evolución de la velocidad del viento (---) y su dirección (---) y b) del porcentaje de apertura de las ventanas para el 02/07/2017 al 08/07/2017.

El efecto de este viento de Levante en la humedad queda ejemplificado en el día 07/07/2017 (4.3 m/s de máxima) el cual se sopló a partir de las 10 a.m. hasta últimas horas de la tarde (Figura 69a). Este día se aprecia un brusco descenso de la humedad a las 10 a.m. que se corresponde con la aparición de este frente (Figura 70).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

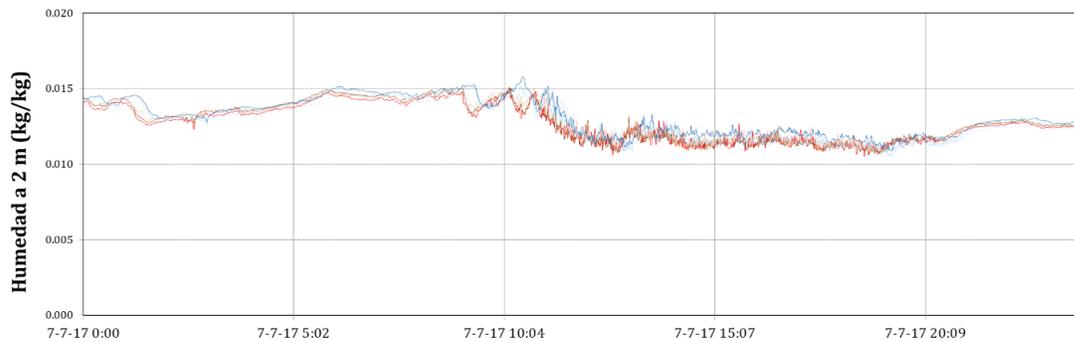


Figura 70. Evolución de las humedad a 2 m en el sector Este en la parte norte (---), en el centro(---), en el sur (---) y en el sector Oeste en la parte norte (-.-), en el centro (-.-) y en el sur (-.-) para el día 07/07/2017 .

5.3.2.2. Valores máximos y mínimos de humedad

Del análisis estadístico de los valores máximos y mínimos de humedad del aire, solo se puede concluir que los valores más bajos de ambos parámetros se registraron en el sensor colocado a 2 m de altura en la parte norte del sector U11E (Tabla 19), que sería el más expuesto al efecto del viento por estar en el sector con la ventana de mayor tamaño y en la zona libre de obstáculos. De igual forma los valores máximos de humedad, se registraron en el sensor a 1 m de altura del sector Oeste y lado Sur. A esa altura afecta más la evapotranspiración del cultivo, sin embargo el lado menos expuesto al efecto del viento y en el sector con las ventanas laterales de menor tamaño.

Sin embargo, si analizamos los datos en su conjunto no se aprecian diferencias significativas entre todo un sector y otro. Además, las máximas humedades se suelen producir normalmente en periodos en los que el invernadero permanece cerrado, por ejemplo durante gran parte de las horas nocturnas (Hernández, 2013), por lo que parece lógico que no se observen diferencias en función del tamaño de las ventanas laterales.

En el caso de las mínimas tampoco se han recogido valores que arrojen diferencias significativas.

5.3.3. Análisis de la radiación interior

Observamos que existen diferencias estadísticamente significativas entre ambos para los valores de radiación solar durante todos los periodos estudiados (Tabla 20), mostrándose superior en U11E, debido en parte a una orientación más al sur de este sector (Castilla N., 2007) y principalmente a una diferencia en el grado de encalado de la cubierta de este. Por lo que, en principio, esta mayor exposición a la radiación solar no ha comprometido los resultados obtenidos a favor de la mayor capacidad de refrigeración de este sector con una superficie mayor de ventilación.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Tabla 19. Valores promedio de las humedades absolutas máximas y mínimas diarias medidas por los diferentes sensores instalados en los dos sectores del invernadero experimental (en kg/kg).

	SECTOR ESTE						SECTOR OESTE					
	x_i (1 m) U11EN	x_i (2 m) U11EN	x_i (1 m) U11EC	x_i (2 m) U11EC	x_i (1 m) U11ES	x_i (2 m) U11ES	x_i (1 m) U11ON	x_i (2 m) U11ON	x_i (1 m) U11OC	x_i (2 m) U11OC	x_i (1 m) U11OS	x_i (2 m) U11OS
Máximos	0.01365abc	0.01298 a	0.01340 ab	0.01317 ab	0.01359 abc	0.01313 ab	0.01378 bc	0.01347 ab	0.01383 bc	0.01331 ab	0.01432 c	0.01344 ab
Mínimos	0.00797 ab	0.00772 a	0.00802 ab	0.00783ab	0.00829 b	0.00795ab	0.00826ab	0.00793 ab	0.00814ab	0.00787 ab	0.00830 b	0.00794 ab

Letras diferentes entre tratamientos de una misma fila (correspondiente a un mismo periodo de medida) indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias con un nivel del 95.0% de confianza. Las letras están ordenadas de radiaciones más altas a más bajas.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Tabla 20. Valores promedio de radiación solar (en $W \cdot m^{-2}$) y radiación PAR diarias medias (en $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) en el interior de los dos sectores del invernadero U11.

FECHA	SECTOR ESTE		SECTOR OESTE	
	R_{si} (2,4 m) U11E	R_{PARi} (2,4 m) U11E	R_{si} (2,4 m) U11O	R_{PARi} (2,4 m) U11O
25/05-02/06	143,4 f	270,9 m	135,8 bcde	263,2 kl
02/06-08/06	141,4ef	269,6 m	132,0 abcd	255,3 ij
08/06-16/06	139,4 ef	266,2 lm	131,0 abc	252,5 i
16/06-29/06	136,4 de	258,3 jk	129,1 a	246,2 h
30/06-11/07	139,6 ef	262,1 kl	133,3 abcd	252,5 i
11/07-24/07	136,0 cde	206,0 g	130,7 ab	246,6 h

Letras diferentes entre tratamientos de una misma fila (correspondiente a un mismo periodo de medida) indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias con un nivel del 95.0% de confianza. Las letras están ordenadas de radiaciones más altas a más bajas.

5.4. Estimación de la fotosíntesis y la transpiración del cultivo

La fotosíntesis y la transpiración del conjunto de plantas del sector U11E se ha estimado utilizando el flujo de aire a través de las ventanas laterales y las concentraciones de gases medidas en las ventanas con el IRGASON, comparando dichos valores a los estimados a partir de las medidas en hoja de fotosíntesis y transpiración.

5.4.1. Cálculo del flujo de CO₂ en las ventanas del invernadero

A partir de los valores de flujo de aire calculados en las dos ventanas laterales (Tabla 13), una vez corregidos con el valor promedio de entrada y salida, y de las concentraciones de CO₂ medidas en dichos puntos con el IRGASON se ha estimado el flujo de CO₂ (Tabla 21), utilizando la Ec. (6).

Tabla 21. Valores del flujo de CO₂ FC_j calculado a través de las ventanas del sector este del invernadero U11 el 8 de junio de 2017, obtenidas a partir del caudal volumétrico de ventilación G_j (m³ s⁻¹) a través de cada punto de medida j y de la concentración C_j de CO₂.

Ventana	Lateral Norte			Lateral Sur		
	G _j [m ³ s ⁻¹]	C _j [mg m ⁻³]	FC _j [mg s ⁻¹]	G _j [m ³ s ⁻¹]	C _j [mg m ⁻³]	FC _j [mg s ⁻¹]
Parámetro						
Posición G	8.74	734.1	6416	-2.35	726.0	-1704
Posición F	6.34	733.7	4651	-2.89	722.1	-2090
Posición E	2.31	732.0	1688	-4.07	722.2	-2941
Posición D	1.48	726.1	1077	-3.72	729.2	-2711
Posición C	2.57	725.4	1866	-3.39	735.6	-2495
Posición B	2.24	730.3	1638	-4.44	725.6	-3219
Posición A	-0.35	722.0	-250	-2.48	731.2	-1812
Total o Promedio	23.34	729.1	17086	-23.34	727.4	-16972
Flujo neto de CO₂, FC_T [mg s⁻¹]=FC_E+FC_S						114

Para intentar eliminar el efecto del error del caudal se puede también estimar el flujo de CO₂ multiplicando el caudal medio por la diferencia entre la concentración media en los puntos por los que entra el aire y la media en los puntos de salida:

$$F_N = 24.0 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \cdot (729.09 - 727.42) \text{ [mg m}^{-3}] = 40.08 \text{ [mgCO}_2 \text{ s}^{-1}]$$

5.4.2. Cálculo de la fotosíntesis del cultivo

A partir de los datos de fotosíntesis medidos en las plantas de tomate se obtuvo una curva de ajuste (Figura 71a) para determinar la relación entre la fotosíntesis y la altura y asignarle a cada altura la superficie de hojas correspondiente (Tabla 22), obtenida a partir de la distribución de superficie foliar (Figura 71b).

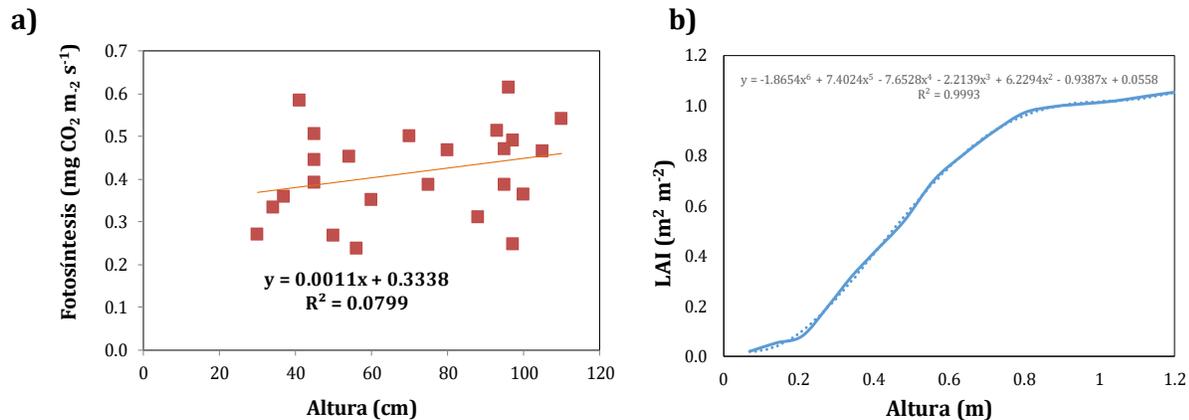


Figura 71. Valores de la fotosíntesis de las plantas de tomate el 8 de junio de 2017 a diferentes alturas desde el suelo (a) y de la distribución de la superficie de hojas a lo largo del tallo (b).

La fotosíntesis total se obtuvo sumando la fotosíntesis de cada uno de los seis niveles en los que se dividió el cultivo y multiplicando ese valor por el número de plantas que había en el invernadero (Tabla 22).

Tabla 22. Valores del flujo de CO₂ consumido por las plantas de tomate P_j el 8 de junio de 2017, obtenidas a partir de la fotosíntesis medida p_j en función de la altura h_{vj} y la superficie foliar que le corresponde S_{pj} .

Altura del cultivo h_{vj} [m]	Fotosíntesis p_j [$\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Superficie de hojas S_{pj} [$\text{m}^2 \text{ planta}^{-1}$]	Fotosíntesis P_j [$\text{mgCO}_2 \text{ s}^{-1}$]
0-0.2	0.301	0.090	0.027
0.2-0.4	0.323	0.318	0.103
0.4-0.6	0.345	0.346	0.119
0.6-0.8	0.367	0.206	0.076
0.8-1.0	0.389	0.057	0.022
1.0-1.2	0.411	0.038	0.016
Total por planta		1.055	0.362
Número de plantas en el sector U11E, n_p [plantas/invernadero]			246
Fotosíntesis del conjunto del cultivo, P_c [$\text{mgCO}_2 \text{ s}^{-1}$/invernadero]			89.1

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

La fotosíntesis del conjunto de plantas de tomate del sector U11E se calculó multiplicando la fotosíntesis de cada planta por el número de plantas cultivadas:

$$P_c = 0.362 \text{ [mgCO}_2 \text{ s}^{-1}] \cdot 246 \text{ [plantas/invernadero]} = 89.1 \text{ [mgCO}_2 \text{ s}^{-1}]$$

Este valor obtenido a partir de las medidas de fotosíntesis en las hojas de cultivo con el sensor manual LCI (Tabla 22) es algo inferior al valor calculado mediante las medidas de flujo de aire y concentración de CO₂ en las ventanas laterales con el IRGASON (Tabla 21).

5.4.3. Cálculo del flujo de H₂O en las ventanas del invernadero

Del mismo modo a como se ha estimado el flujo de CO₂ se ha realizado con el de vapor de agua, obteniendo a partir de las medidas realizadas con el IRGASON un primer valor de flujo de H₂O (Tabla 23).

Tabla 23. Valores del flujo de H₂O X_j calculado a través de las ventanas del sector este del invernadero U11 el 8 de junio de 2017, obtenidas a partir del caudal volumétrico de ventilación G_j (m³ s⁻¹) a través de cada punto de medida j y de la concentración x_j de H₂O.

Ventana	Lateral Norte			Lateral Sur		
	G_j [m ³ s ⁻¹]	x_j [g m ⁻³]	X_j [g s ⁻¹]	G_j [m ³ s ⁻¹]	x_j [g m ⁻³]	X_j [g s ⁻¹]
Posición G	8.74	8.90	77.8	-2.35	9.73	-22.8
Posición F	6.34	8.87	56.2	-2.89	10.01	-29.0
Posición E	2.31	8.98	20.7	-4.07	10.42	-42.4
Posición D	1.48	8.92	13.2	-3.72	10.34	-38.4
Posición C	2.57	8.89	22.9	-3.39	10.03	-34.0
Posición B	2.24	8.65	19.4	-4.44	9.72	-43.1
Posición A	-0.35	8.80	-3.0	-2.48	10.18	-25.2
Total o Promedio	23.34	8.86	207.2	-23.34	10.06	-235.1
Flujo neto de CO₂, X_T [g s⁻¹]=X_E+X_S						-27.9

Como alternativa a este cálculo considerando los diferentes valores de velocidad del aire y concentración de vapor de agua en cada zona de la ventana, donde se observó un error en el caudal de aire del 23.7% (Tabla 13), se puede estimar el flujo de H₂O, multiplicando el caudal medio de aire por las concentraciones medias de salida y de entrada:

$$X_N \text{ [gH}_2\text{O s}^{-1}] = G_M \text{ [m}^3 \text{ s}^{-1}] \cdot (X_{Mentrada} - X_{Msalida}) \text{ [g m}^{-3}]$$

$$X_N = 24.0 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \cdot (8.86 - 10.06) \text{ [g m}^{-3}] = -28.8 \text{ [gH}_2\text{O s}^{-1}]$$

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERNADERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

En este caso la diferencia de este valor con el calculado teniendo en cuenta la distribución de velocidades y valores de humedad del aire en las ventanas laterales (Tabla 23) es inferior al 4%.

5.4.4. Cálculo de la transpiración del cultivo

El sensor de fotosíntesis (Figura 45b), además de medir el flujo de CO₂ por unidad de superficie de hoja también mide el agua transpirada por el cultivo de tomate. Al igual que en el caso anterior, se ha tratado de determinar la variación de la transpiración con la altura de la planta, aunque la correlación estadística es muy pobre (Figura 72). Con ella y con la variación de la superficie foliar (Figura 71b) se ha determinado la transpiración en cada parte de la planta (Tabla 24) para después obtener la correspondiente al conjunto de la planta como suma de estas y la de todo el cultivo multiplicando por el número de plantas.

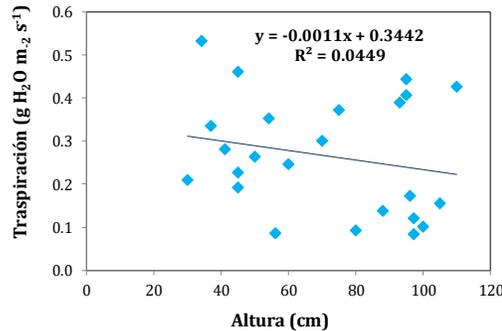


Figura 72. Valores de la transpiración de las plantas de tomate el 8 de junio de 2017.

Tabla 24. Valores del flujo de H₂O consumido por las plantas de tomate el 8 de junio de 2017.

Altura del cultivo h_{vj} [m]	Transpiración x_j [gH ₂ O m ⁻² s ⁻¹]	Superficie de hojas S_{pj} [m ² planta ⁻¹]	Transpiración X_j [gH ₂ O s ⁻¹]
0-0.2	0.377	0.090	0.034
0.2-0.4	0.355	0.318	0.113
0.4-0.6	0.333	0.346	0.115
0.6-0.8	0.311	0.206	0.064
0.8-1.0	0.289	0.057	0.016
1.0-1.2	0.267	0.038	0.010
Total por planta		1.055	0.353
Número de plantas en el invernadero, n_p [plantas/invernadero]			246
Transpiración del conjunto del cultivo, X_c [gH₂O s⁻¹/invernadero]			86.84

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERNADERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

En este caso la diferencia entre los valores de transpiración calculados por ambos métodos (Tablas 16 y 17) son importantes, debido a la dificultad de calcular el flujo de aire con precisión (error del 23.7% en la estimación del caudal) y a la enorme variabilidad de la transpiración de las hojas de las plantas de tomate (baja correlación con la altura).

5.4. Análisis de la producción

El aumento de la superficie de ventilación lateral en el invernadero U11E ha permitido reducir las temperaturas máximas interiores 2°C en promedio (Tabla 19), llegando en ocasiones a descensos de 3-4°C (Figuras 56 y 57a), con respecto al invernadero U11O con las ventanas de tamaño estándar.

Como consecuencia de la mejora de las condiciones térmicas, la producción de tomate durante el cultivo de tomate de la campaña de primavera-verano de 2017 fue significativamente mayor (Figura 73). La producción comercializable en el sector U11E fue de 5.2 kg m⁻², un 8% superior a la del sector U11O de 4.8 kg m⁻² (Figura 71a). Esta diferencia fue aún mayor para la producción total (Figura 73b), de 7.7 kg m⁻² en el sector U11E, frente a los 6.4 kg m⁻² obtenidos en el sector U11O (un 20% superior). La reducción en el incremento para la producción comercializable se debió a que un problema con es sistema de riego afectó a la producción de las últimas cosechas generando muchos frutos no comercializables.

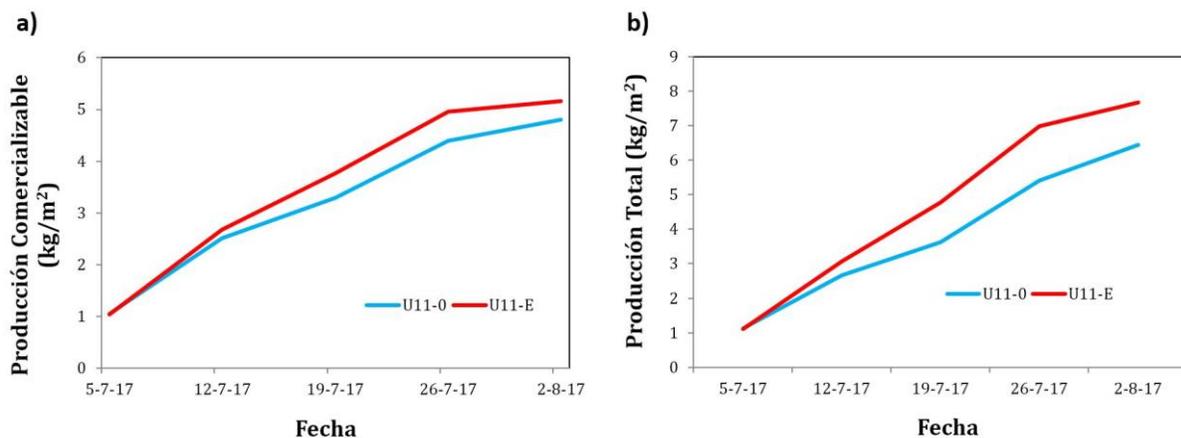


Figura 73. Evolución de la producción comercializable (a) y total (b) en el sector este (U11E) con las ventanas laterales de 3.3 m de altura (—) y el sector oeste (U11O) con las ventanas laterales de 0.9 m (—).

6. CONCLUSIONES

Con el objetivo de evaluar el efecto del incremento de la superficie de ventilación lateral sobre la capacidad de ventilación y el microclima de un invernadero se desarrolló durante el ciclo de primavera-verano de 2017 un cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) en el invernadero U11 del Campo de Prácticas de la Universidad de Almería (Centro de Innovación y Tecnología "Fundación UAL-ANECOOP"). Dicho invernadero está dividido en dos sectores mediante una lámina de polietileno. El sector Oeste (U11O), con unas dimensiones de 24 × 20 m, estaba dotado de ventanas laterales de 0.9 m de alto y en el sector Este (U11E), de 24 × 25 m, se instalaron unas nuevas ventanas de 3.3 m de altura.

Para el análisis del microclima del invernadero se registraron de forma continua la temperatura, humedad y velocidad del aire y la temperatura del cultivo, con las ventanas abriendo de forma automatizada. Adicionalmente, se realizaron ensayos puntuales con las ventanas cenitales cerradas y las laterales abiertas a su máxima capacidad. En estos ensayos se midió el caudal de aire y el flujo de CO₂ y H₂O en las ventanas del invernadero y la fotosíntesis y la transpiración de las hojas de tomate.

A partir de los resultados obtenidos tanto del análisis estadístico de los datos registrados de forma continua, como de los ensayos puntuales de flujo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El incremento de la superficie de ventilación lateral en un invernadero multitúnel de tres módulos ha permitido descender de forma significativa las temperaturas medias y máximas del aire, así como la temperatura de las hojas del cultivo de tomate.
- El aumento de la altura máxima de apertura de las ventanas laterales produce una pequeña reducción en la velocidad de paso del aire por las ventanas, muy inferior al aumento de superficie, resultando en un incremento del caudal de ventilación.
- La tasa de ventilación alcanzada con viento fuerte de 8 m s⁻¹ utilizando solo las nuevas ventanas laterales, y cerrando las cenitales, es más del doble de la medida en trabajos precedentes en el mismo invernadero experimental con todas las ventanas abiertas.
- Existen diferencias importantes al estimar la fotosíntesis y la transpiración del conjunto del cultivo mediante el balance de los flujos de entrada y salida por las ventanas o midiendo a nivel de la hoja con un sensor portátil. Las diferencias se deben a la inexactitud en la medida del flujo de aire en las ventanas y a la suposición errónea de que todas las plantas del invernadero tienen una misma superficie foliar y que realizan la fotosíntesis y la transpiración de forma homogénea.

7. BIBLIOGRAFÍA

Abad A. A., Monteiro M., 1989. The use of Auxins for the production of greenhouse tomatoes in mild-winter conditions. *Scientia Horticulturae*, (38): 167-192.

Acebedo M., 2004. Bemisisa tabaci, una de las principales plagas en cultivos bajo abrigo. *Vida rural*, 189: 31-34.

ADC BioScientific Limited, Hertfordshire, Reino Unido, All Products, Plants, catalogue: LCi-sD Portable Photosynthesis System.

Arellano M. A., Valera D. L. y Molina-Aiz, F. D. y Urrestarazu M., 2003. Efecto del microclima originado en un invernadero Almería en el rendimiento y calidad de un cultivo de pepino. *ISHS Actas del 2º Congreso Nacional de Agroingeniería*. Córdoba (España).

ASAE, 2003. *Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses*. St. Joseph, Míchigan (EEUU): American Society of Agricultural Engineers.

Azcón Bieto J. y Talón M. 2013. *Fundamentos de la Fisiología Vegetal*. Edición Valrealty.

Baeza E. J., Pérez-Parra J. J., Montero J. I., Bailey B. J., López J. C., Gázquez J. C., 2009. Analysis of the role of sidewall vents on buoyancy-driven natural ventilation on parral-type greenhouses with and without insect screen using computation fluid dynamics. *Biosystems Engineering*.

Baeza E., Pérez-Parra J. J., López, J. C. y Gázquez, J. C., 2010. Ventilación natural. Manejo del clima en invernadero mediterráneo. *IFAPA*, 13-35.

Bailey B. J., 1995. Greenhouse climate control – New challenges. *ISHS Acta Horticulturae*, (399): 13-24.

Bailey, B.J. (2002). Optimal control of carbon dioxide enrichment in tomato greenhouses. *ISHS Acta Horticulturae*. 578, 63-69.

Baker J. y Jones R., 1989. Screening as part of insect and disease management in the greenhouse. *N.C. Flower Growers' Bull*, 34: 1-9.

Baptista F., Bailey B., Randall J. y Meneses J., 1999. Greenhouse ventilation rate: Theory and Measurement with Tracer Gas Techniques. *Journal of Agricultural Engineering Research*, (72): 363-374.

Baptista P. E., Abreu J. F., Meneses B. J. y Bailey F. J., 2001. Comparison of the climatic conditions and tomato crop productivity in Mediterranean greenhouses under two different natural ventilation management systems. *Agrobuiding*, 3-6 September, 113.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Barceló Coll J., Nicolás Rodrigo G., Sabater García B., Sánchez Tamés R., 2001. Fisiología Vegetal. Ediciones Piramide.

Bell M. y Baker J., 2000. Comparison of greenhouse screening materials for excluding Whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) and Thrips (Thysanoptera: Thripidae). *Econ. Entomol*, 93: 800-804.

Bonachela C. S., 2013. Apuntes. Fundamentos de Horticultura y Fruticultura. Grado en Ingeniería Agrícola. Universidad de Almería.

Bot G.P.A., 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Tesis Doctoral. Agricultural University of Wageningen (Holanda), 240 p.

Both A. J., Benjamin L., Franklin J., Holroyd G., Incoll L. D., Lefsrud M. G. y Pitkin G., 2015. Guidelines for measuring and reporting environmental parameters for experiments in greenhouses. *Plants Methods*.

Boulard T. D. B., 1995. Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research*, (61): 27-36.

Boulard T. y Baille A., 1993. Simple greenhouse climate control incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. *Agricultural and Forest Meteorology*, (65): 3-4.

Boulard T. y Draoui B., 1995. Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis. *J. Agric. Engng Res.*, 61: 27-36.

Boulard T., Feuilloley P. y Kittas C., 1997a. Natural ventilation performance of six greenhouse and tunnel types. *J. Agric. Engng Res.*, 67: 249-266.

Boulard T., Feuilloley, P. y Kittas, C., 1997b. Natural ventilation performance of six greenhouse and tunnel types. *Journal of Agricultural Engineering Research*, (67): 249-266.

Boulard T., Kittas C., Papadakis G. y Mermier M., 1996. Pressure field and airflow at the opening of a naturally ventilated greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, (71): 93-102.

Boulard T., Kittas C., Papadakis G. y Mermier M., 1998. Pressure field and airflow at the opening of a naturally ventilated greenhouse. *J. Agric. Engng Res.*, 71 (1): 93-102.

Boulard T., Papadakis G., Kittas C. y Mermier, M., 1997b. Air flow and associated sensible heat exchanges in a naturally ventilated greenhouse. *Agric. For. Meteorol.*, 88: 111-119.

Boulard, T., Papadakis, G. y Kittas, C., 1997a. Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: sensitivity to temperature and wind effects. *ASAE*, 40(2): 415-425.

Brugger M. F., Short T. H. y Bauerle W. L., 1987. An evaluation of horizontal air flow in six commercial greenhouse. *ASAE*, (37): 10.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Buffington D. E., Bucklin R. A., Henley R. W. y McConnell D. B., 1987. Greenhouse ventilation. Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Fact Sheet AE-10, Gainesville (EEUU), 5.

Businger, J. A. (1963). The glasshouse (greenhouse) climate. en van Wijk, ed.: Physics of Plant Environment. North-Holland Publishing Co., Amsterdam (Holanda): 277-318.

Campbell Scientific S.L., España. CR3000 Micrologger OPERATOR'S MANUAL: 98.

Campbell Scientific Spain S.L, España. Productos, sensores, folleto: CS616 Water Content Reflectometer.

Campbell Scientific Spain S.L, España. Productos, sensores, folleto: HC2S3 Temperature and RH Sensor.

Campbell Scientific Spain S.L, España. Productos, sensores, folleto: HFP01 Soil Heat Flux Plate.

Campbell Scientific Spain S.L, España. Productos, sensores, folleto: PIRANÓMETROS SP1110

Campbell Scientific Spain S.L, España. Productos, sensores, folleto: TEMPERATURES PROBES 107, 108, 109 & 105E.

Campbell Scientific Spain S.L, España. Productos, sensores, folleto: WindSonic1 and WindSonic4 2D Ultrasonic Anemometers.

Campbell Scientific Spain S.L, Europe. Productos, sensores, folleto: IRGASON Integrated Open-Path CO₂/H₂O Gas Analyzer and 3D Sonic Anemometer.

Campbell Scientific Spain S.L, Europe. Products, probes, catalogue: CS215 Temperature and Relative Humidity Probe.

Campen, J. B. y Bot, G. P. A. (2003). Determination of greenhouse-specific aspect of ventilation using three-dimensional computational fluid dynamics. Biosystems Engineering, 84(1): 69-77.

Campen, J. B., (2003). Greenhouse characteristics and climatic conditions using 3D computational fluid dynamics calculations. ISHS Acta Horticulturae (614): 347-351.

Capel-Molina J.J., 1990. Climatología de Almería. Cuadernos monográficos 7. Instituto de Estudios Almerienses de la Diputación de Almería. Almería, 160 p.

CAPMA, 2013a. Cartografía de invernaderos en el litoral de Andalucía Oriental. Campaña 2012. Consejería de Agricultura Pesca y Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

CAPMA, 2013b. Boletín Final. Avance valoración de campaña 2012/13 hortalizas protegidas. Almería. Observatorio de precios y mercados. Junta de Andalucía, Andalucía (España).

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERNADERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Carmona M. M. y Valera D. L., 2011.- Estudio de la ventilación forzada en un invernadero multitúnel. Revisión bibliográfica. Trabajo fin de grado. Universidad de Almería.

Castilla N., 2007. Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo. Ediciones Mundi-Prensa. 2ª edición.

Céspedes A. J., García M. C., Pérez-Parra J. J. y Cuadrado I. M., 2009. Caracterización de la explotación protegida de Almería. IFAPA y Fundación Cajamar, 177.

Edwards D. R., 2008. Towards a plant-based method of guiding CO₂ enrichment in greenhouse tomato. University of British Columbia.

Espinoza K., Lopez A., Valera D. L., Molina-Aiz F. D., Torres J. A., Peña A., 2017. Effects of ventilator configuration on the flow pattern of a naturally-ventilated three-span Mediterranean greenhouse. *Biosystems engineering* 164: 13-30. Research Centre on Mediterranean Intensive Agrosystems and Agrifood Biotechnology (CIAIMBITAL), University of Almería, Spain.

Espinoza K., López A., Valera D.L., Molina-Aiz F.D., Torres J.A., Peña A., 2017. Effects of ventilator configuration on the flow pattern of a naturally-ventilated three-span Mediterranean greenhouse. *Biosyst. Eng.* 164, 13-30.

Espinoza K., Valera D.L., Torres J.A., López A., Molina-Aiz F.D., 2015. An auto-tuning PI control system for an open-circuit low-speed wind tunnel designed for greenhouse technology. *Sensors*. 15, 19723–19749.

FAO, 2002. El cultivo protegido en clima mediterráneo Estudio FAO Producción y Protección Vegetal (90). Roma (Italia): Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 32.

Felten B., Duru M., Martín G. y Sautier M., 2011. Changement climatique en Midi-Pyrénées et conséquences sur la croissance de l'herbe. *Projet Climfourrel, Midi-Pyrénées. Séries Les Focus PSDR3*. 8 p.

Fernández J. y Bailey B., 1992. Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agricultural and Forest Meteorology*, (58): 229-245.

Fernández, J. E. y Baile B. J., 1993. Predicting greenhouse ventilation rates. *ISHS Acta Horticulturae*, (328): 107-114.7

Fundación Cajamar, 2012. Análisis de la campaña hortofrutícola de Almería Campaña 2011/2012. Fundación Cajamar, Almería (España), 90.

Geoola F. y Peiper U., 1994. Outdoor testing of the condensation characteristics of plastic film covering materials using a model greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57: 167-172.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Goeijenbier P., 1984. Using fans to limit temperature difference. Naaldwijd Consultancy Service, 52-54.

Hand D., 1984. Crop responses to winter and summer CO₂ enrichment. ISHS Acta Horticulturae, (162): 45-64.

Hassan D., 2013. Présentation du Climat & Etudes Climatiques. Maroc Meteo. Proyrcto CLIMATIQUE. Programas de Cooperación Transfronteriza España-Marruecos(POCTEFEC). Seminario sobre los efectos del cambio climático en los Recursos Naturales del área de Cooperación Territorial del Atlántico. 6 y 7 de marzo de 2013. Tenerife (España), 18 p.

Hellickson M. A. y Walker J. N., 1983.- Ventilation of Agricultural Structures. ASAE, St Joseph (EEUU), 374 p.

Hernández, J., 2013. Apuntes. Fitotecnia Genral Bloque II. Grado en Ingeniería Agrícola. Universidad de Almería.

Hortimax S.L., Almería, España. Productos, catálogo: ESTACIÓN METEOROLÓGICA II.

Hortimax S.L., Almería, España. Productos, catálogo: Pt1000-BUTRON II.

INFOAGRO, 2011. Control climatico n invernaderos 1º parte. [En línea] /Disponible en: http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.htm / [Último acceso: 22 11 2017].

Junta de Andalucía, 2010. Anuario de estadísticas agrarias y pesqueras de Andalucía. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural.

Kittas C., Boulard T. y Papadakis G., 1997. Greenhouse ventilation rates through combined roof and side openings: An experimental study. ISHS Acta Horticulturae, (443): 31-38.

Kittas C., Boulard T. y Papadakis G., 1997. Greenhouse ventilation rates through combined roof and side openings: an experimental study. Acta Horticulturae, 443: 31-38.

Kittas C., Boulard T., Mermier M. y Papadakis G., 1996. Wind induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings. J. Agric. Engng Res., 65: 37-49.

Klein Tank A. M. G. y Lenderink G. (Eds), 2009. Climate Change in the Netherlands. Supplements to the KNMI'06 scenarios, KNMI. Royal Netherlands Meteorological Institute. Ministry of Transport, Public Works and Water Management. De Bilt (Holanda), 36 p.

Koths J. S. y Bartok J., 1985. Connecticut Greenhouse Newsletter, (125): 1-8.

Koths J. S., 1979. Horizontal air flow characteristics. Connecticut Greenhouse Newsletter, (91): 1-8.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Kuciauskas A. P., Brody L. R., Hadjimichael M., Bankert R. L., Tag P. M. y Peak J. E., (1998). A fuzzy expert system to assist in the prediction of hazardous wind conditions within the Mediterranean basin.

López A., Molina-Aiz F.D., Valera D.L. y Peña A., 2016. Wind tunnel analysis of the airflow through insect-proof screens and comparison of their effect when installed in a mediterranean greenhouse. *Sensors*. 16, 690.

López A., Valera D. L., Molina-Aiz F. D., Peña A., 2011. Effects of surrounding buildings on air patterns and turbulence in two naturally ventilated mediterranean greenhouses using tri-sonic anemometry. *ASABE*, 54 (5): 1941-1950.

López A., Valera D.L., Molina-Aiz F.D., Peña A., 2011. Effects of surrounding buildings on air patterns and turbulence in two naturally ventilated mediterranean greenhouses using tri-sonic anemometry. *Trans. ASABE* 54, 1941–1950.

Lorenzo P., 1994.- Intercepción de luz, bioproductividad e intercambio gaseoso durante la ontogenia de un cultivo invernadero de *Cucumis sativus* en Almería. Tesis Doctoral. Departamento de Biología Vegetal. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona.

Lorenzo P., Maroto C. y Castilla N., 1990. CO₂ in plastic greenhouse in Almería (Spain). *ISHS Acta Horticulturae*, (268): 165-169.

Marlow D., 2011. Hortalizas. Aporte de CO₂ en el invernadero. [En línea]/ Disponible en: <http://www.hortalizas.com/horticultura-protegida/invernadero/aporte-de-co2-en-un-invernadero/> [Último acceso: 11 21 2017].

Maroto Borrego J. V., 2008.- Elementos de horticultura general: especialmente aplicada al cultivo de plantas de consistencia herbácea. Mundi Prensa.

Martínez P. F., Roca D., Suay R., Martínez M.; Blasco X., Ramos J. M. Herrero y Ramos C. Avance en el control de los factores del clima para el cultivo en invernadero. Departamento de horticultura. Instituto Valenciano de Investigación Agrarias. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad Politécnica de Valencia.

Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medioambiente, s.f. Agencia estatal de meteorología (A.E.Met.). [En línea] /Disponible en: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/result_graficos?opc4=0&w=0&opc1=04&opc2=Tx&opc3=Primavera&opc6=0&img=1 [Último acceso: 15 12 2017].

Mistriotis A., Bot G., Picuno P. y Scarascia Mugnozza G., 1997. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, (858): 217-228.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Molina-Aiz F. D., 2010.- Simulación y modelación de la ventilación en invernaderos de Almería mediante la utilización de dinámica de fluidos computacional. Tesis Doctoral. Universidad de Almería, 928 p.

Molina-Aiz F. D., López A. y Valera D.L., 2017. Tema 7: La ventilación natural de invernaderos en climas cálido. s.l.:Grupo de investigación Ingeniería Rural AGR-198 Centro de Investigación en Agrosistemas Intensivos Mediterráneos y Biotecnología Agroalimentaria–CIAIMBITAL. Universidad de Almería.

Molina-Aiz, F.D., Valera, D.L., Álvarez A.J., 2004.Measurement and simulation of climate inside Almería-type greenhouses using Computational Fluid Dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 125: 33-51.

Molina-Aiz F. D., Valera D. L., Álvarez A. J. y Arellano M. A., 2003. Análisis y optimización de la ventilación de invernaderos mediante dinámica de fluidos computacional. I Congreso Andaluz de Ingenieros Agrónomos. 16, 17 y 18 de octubre, Sevilla (España). *Comunicación*, 4(1): 23.

Molina-Aiz F. D., Valera, D. L., Álvarez A. J. y Madueño. A., 2006. A wind tunnel study of airflow through horticultural crops: Determination of the drag coefficient. *Biosystems Engineering* (2006) **93** (4) 447-457 doi: 10.1016/j.biosystemseng.2006.014.016

Molina-Aiz F.D., Valera D.L., Peña A., Gil J.A. y López, A., 2009. A study of natural ventilation in an Almeria-type greenhouse with insect screens by means of tri-sonic anemometry. *Biosyst. Eng.* 104, 224–242.

Montero J., Muñoz P. y Antón A., 1996. Discharge coefficients of greenhouse windows with insect proof screens. *ISHS Acta Horticulturae*, (443): 71-77.

Muñoz P., 1998.- Ventilacion natural de invernaderos multitunel. Universitat de Lleida. Escola Técnica Superior d'Enginyeria Agrària, 145 p.

Pagani M., Freeman K. y Arthur M., 1999. Late Miocene atmospheric CO₂ concentrations and the expansion of C₄ grasses. *Science*, 285: 876-879.

Papadakis G., Mermier M., Meneses J. y Boulard T., 1996. Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, (63): 219-228.

Papadakis G., Mermier M., Meneses J.F. y Boulard T., 1996. Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *J. Agric. Engng Res.*, 63: 219-228.

Pearson P. y Palmer M., 2000. Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years. *Nature*, 40: 695-669.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Pérez-Parra J. J., Baeza E. E., Montero J. I., Bailey B. J., 2004. Natural ventilation of parral-greenhouses. *Biosystems Engineering*, 87(3): 89-100.

Prentice I., Farquhar G., Fasham M., Houghton J., Ding Y., Griggs D., Noguer M., Linden Van der P., Xiaosu D., 2001. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide, *Climate change 2001: the scientific basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 183-239.

Reyes-Rosas A., Valera D. L., Molina-Aiz F. D., 2018. Modelización del microclima de un invernadero con ventilación natural y cultivo de tomate mediante balance de energía y dinámica de fluidos computacional. Tesis Doctoral. Universidad de Almería (España), 178 p.

Rüther M., 1985. Natural ventilation rates of closed greenhouses. *ISHS Acta Horticulturae*, (170): 185-191.

Sail and Trip S.L. Sail and Trip. Meteorología. Artículos. Vientos del Mediterraneo. [En línea] Disponible en: <http://sailandtrip.com/vientos-del-mediterraneo/> [Último acceso: 20 12 2017].

Sánchez-Guerrero Cantó M., Lorenzo Minguez P., Medrano Cortés E.; Alonso Ramírez F. J., Pérez Parra J., Baeza E., Gázquez J. C.; Montero J. I., 2010. Manejo del clima en invernadero mediterráneo. IFAPA.

Scurlock J. y Hall D., 1991. The carbon cycle. *New Scientist*, 132: 1-4.

Sease S., 1989. The effect of plant arrangement on airflow characteristics in a naturally ventilated glasshouse. *ISHS Acta Horticulture*, (245): 429-435.

Seginer I., 1997.- Alternative design formulae for the ventilation rate of greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 68, 355-365.

Siren K., Rosén G., Vad J. y Nielsen P.V., 2001. Capítulo 12. Experimental techniques. En: *Industrial ventilation design guidebook*. Ed.: Goodfellow H. y Tähti E., Academic Press, San Diego (EE.UU.), 1555 p.

Stanghellini C., Incrocci L., Gázquez J. C. y Diamuro B., 2007. Carbon dioxide concentration in Mediterranean greenhouses: how much lost production?. *ISHS Acta Horticulturae*.

Tesi R., 1972. *Moderne tecniche di protezione in horticultura floricultura e frutticoltura*. Edagricole, Italia.

Valera D.L., Alvarez A.J. y Molina-Aiz F.D., 2006. Aerodynamic analysis of several insect-proof screens used in greenhouses. *Spanish J. Agric. Res.* 4, 273–279.

Valera Martínez D., Belmonte Ureña L., Molina Aiz F. y López Martíne A., 2014. Los invernaderos de Almería. Análisis de su tecnología y rentabilidad. Cajamar.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Vanthoor B.H.E., Stanghellini C., van Henten E.J. y Gázquez Garrido J.C., 2008. The combined effects of cover design parameters on tomato production of a passive greenhouse. *ISHS Acta Horticulturae*, (801): 383-391.

Villalobos F., Luciano Mateos J., Orgaz F., Fereres E., 2002. *Fitotécnia. Bases y tecnologías de la producción agrícola*. ETS Ingenieros Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba e Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC). Ediciones Mundi-Prensa.

Von Elsner B., Briassoulis D., Waaijenberg D., Mistriotis A., von Zabeltitz Chr., Gratraud J., Russo G. y Suay-Cortes R., 2000. Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries: Part I, Design Requirements. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75(1): 1-16.

Walter J. y Duncan G., 1973.- *Air circulation in greenhouses*. Kentucky University, College of Agriculture, 9 p.

Zwart H. F., 1996.- *Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model*. Tesis Doctoral. Wageningen University (Holanda), p. 236.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la superficie, producción y rendimientos. Índice 1975=100. Estimación realizada por Fundación Cajamar a partir de datos de la Junta de Andalucía, SOIVRE y empresas del sector (Cabrera Sanchez et al., 2016). Página 7

Figura 2. Evolución a lo largo del día de la humedad relativa (%), la presión de vapor kPa 10^{-1} y la temperatura (°C) de un cultivo de soja regado (Hernández, 2013). Página 16.

Figura 3. Perfil de altura de la evolución de la humedad relativa (%) y la presión de vapor kPa (Hernández, 2013). Página 16.

Figura 4. Evolución del % de máxima humedad diurna durante las horas de un día (Hernández, 2013). Página 18.

Figura 5. Temperatura (°C) frente a actividad respiratoria (%) de células vegetales (Hernández, 2013). Página 19.

Figura 6. Temperatura (°C) frente a cantidad de CO_2 consumido por actividad fotosintética y producido por actividad respiratoria (mg/cm^2 día). Cada línea de actividad fotosintética ($I_1 - I_4$) ha estado sometida a diferentes dosis de radiación, de mayor a menor respectivamente (Hernández, 2013). Página 19.

Figura 7. Temperatura (°C) frente a cantidad de CO_2 consumido por actividad fotosintética y producido por actividad respiratoria (mg/cm^2 día). Cada línea de actividad fotosintética ($I_1 - I_4$) ha estado sometida a diferentes dosis de radiación, de mayor a menor respectivamente (Hernández, 2013). Página 20.

Figura 8. Desarrollo radicular para diferentes temperaturas de suelo (Hernández, 2013). Página 21.

Figuras 9 y 10. 9, (izquierda) Evolución horaria de temperatura (°C) y radiación (W/m^2) en un día soleado en la provincia de Granada. 10, (derecha) Progresión anual de temperatura (°C) y radiación media (W/m^2) en Córdoba. Valores normalizados respecto a los valores extremos (Hernández, 2013) Página 22.

Figura 11. Evolución diaria de radiación solar, de la temperatura del aire y del suelo (Hernández, 2013). Página 23.

Figura 12. Evolución diaria de la temperatura del suelo a diferentes profundidades (Hernández, 2012). Página 23.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Figura 13. Asimilación neta ($\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$) de cultivo de tomate frente a la radiación incidente (W m^{-2}) y concentración de CO_2 (vpm) (Nederhoff, 1994). Página 25.

Figura 14. Asimilación neta ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) de una planta C3 y C4 frente a la concentración de CO_2 (ppm). Página 25.

Figura 15. Asimilación neta en hoja ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$) de una planta de tomate frente a la concentración CO_2 (ppm) para diferentes valores de radiación global externa (W m^{-2}) (Edwards, 2008). Página 26.

Figura 16. Evolución de la concentración de CO_2 en un invernadero ventilado de Almería y de Sicilia frente la radiación (W/M^2) el 19 noviembre de 2006 (Stanghellini et al., 2007). Página 28.

Figura 17. Evolución de las temperaturas medias en este siglo en la provincia de Almería según modelos A2 y B1 (juntadeandalucia.es/medioambiente) Página 29.

Figura 18. Evolución de las temperaturas medias en este siglo en la provincia de Almería según modelos A2 y B1 (juntadeandalucia.es/medioambiente) Página 29.

Figura 19. Previsión del incremento de las temperaturas máximas ($^{\circ}\text{C}$) de otoño y primavera durante el siglo para modelos RCP8.5 (---), RCP6.0(---), RCP4.5(---). Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medioambiente. Agencia estatal de meteorología (A. E. Met.) Página 30.

Figura 20. Estructura celular de una hoja y flujo de CO_2 y vapor de agua en la misma (Edwards, 2008). Página 32.

Figura 21. Abertura estomática (μm) frente a flujo transpirativo ($\text{g vapor de agua} \cdot \text{m}^{-2}\text{superficie de hoja} \cdot \text{s}^{-1}$) (Hernández, 2013). Página 32.

Figura 22. Frecuencias anuales de las direcciones del viento en Almería en el mes de junio y anualmente, respectivamente (Molina, 1990). Página 33.

Imagen 23. Viento de Poniente a la izquierda y viento de Levante a la derecha (Sail and Trip S.L.). Página 33.

Figura 24. Arriba: Fotografía de invernadero tipo multitúnel de la finca experimental ANECOP. Abajo: Esquema estructural y partes de invernadero tipo multitúnel (Valera et al., 2014) Página 34.

Figura 25. Imagen aérea del invernadero donde se desarrolla en experimento localización: $36^{\circ}51'53.2''\text{N } 2^{\circ}16'58.8''\text{W}$. Fuente: googlemaps. Página 35.

Figura 26. Trayectoria aparente del sol con respecto al plano del horizonte en latitudes medias del hemisferio norte, en el solsticio de invierno, en los equinoccios de primavera y otoño y el solsticio de verano (Castilla N., 2007). Página 36.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Figura 27. Insolación media diaria con respecto a la temperatura media diaria correspondiente a las ciudades de: Almería en España (▲) durante el periodo 1934-2003 (Molina-Aiz, 2010); Agadir en Marruecos (◆) durante el periodo 1971-2000 (Hassan, 2013); Toulouse en Francia (■) durante el periodo 1980-2009 (Felten et al., 2011); De Bilt en Holanda (●) durante el periodo 1976-2005 (Klein Tank y Lenderink, 2009). Página 37.

Figura 28. Efecto de la relación entre la superficie máxima de ventilación S_v y la superficie de suelo cubierta S_c (multiplicado por el coeficiente de descarga de las ventanas C_d con diferentes mallas anti-insecto) sobre la producción de 6 cultivos de tomate: Cherry primavera-verano 2008 (×); Ramo otoño-invierno 2008/09 (●); Cherry primavera-verano 2009 (■); Ramo ciclo largo 2011/12 (■); Ramo otoño-invierno 2012/13 (◆); Ramo otoño-invierno 2013/14 (▲) (Molina-Aiz et al., 2017). Página 38.

Figura 29. Diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior de un invernadero en función de la tasa de ventilación ($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^2$) para cuatro niveles de evapotranspiración del cultivo (LETP). En porcentaje de la radiación neta dentro del invernadero (R_n): 20 % (●), 50 % (×), 70 % (■) y 80 % (▲) (Sánchez-Guerrero et al., 2010). Página 40.

Figura 30. Fotografía de ventiladores en un invernadero multitúnel (Carmona, 2011) Página 42.

Figura 31. a) Flujos de aire debido al viento exterior y b) debido a la diferencia de temperatura (Molina-Aiz et al., 2017). Página 43.

Figura 32. Tasa de ventilación para diferentes velocidades de viento con diferentes tipos de ventilación: cenital, lateral y combinada en un invernadero parral de 5 capillas (Sánchez-Guerrero et al., 2010). Página 45.

Figura 33. Progresión del caudal teórico de ventilación que aporta la ventilación lateral y cenital conforme aumenta la anchura del invernadero (Sánchez-Guerrero et al., 2010). Página 46.

Figura 34. a) Ventana lateral. b) Ventana cenital de un invernadero parral. Fuente: (Carmona, 2011). Página 46.

Figura 35. Tasa de ventilación para diferentes velocidades de viento para un invernadero tipo parral de 5 capillas con todas sus ventanas orientadas igual: a) enrollables con viento de barlovento (--) o sotavento (--). (Sánchez-Guerrero et al., 2010). Página 47.

Figura 36. Tasa de ventilación para diferentes velocidades de viento obtenidas mediante gas trazador, para un invernadero multitúnel de 3 capillas con ventanas abatibles orientadas a barlovento o sotavento (Sánchez-Guerrero et al., 2010). Página 47.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Figura 37. Caída de presión provocada por una malla anti-insectos (10.1×20 hilos $\cdot \text{cm}^{-2}$ según la velocidad del aire cuando está nueva (×), vieja y lavada (o) y vieja y sucia reemplazada tras 3 años (□) (Molina-Aiz, 2017). Página 49.

Figura 38. Invernadero experimental (a) con ventanas laterales tamaño estándar (lado derecho) y de gran formato (lado izquierdo) e imagen de satélite (b). Página 54.

Figura 39. Disposición de los diferentes sensores utilizados para análisis del microclima en los dos sectores del invernadero multitúnel mediante un registro continuo con cultivo de tomate en sustrato (Ver Tabla 9). Página 55.

Figura 40. Sensores de temperatura y humedad con caja de protección de la radiación solar situados a 1 y 2 m de altura y anemómetro 2D para la medida de la velocidad del aire interior, en el centro del sector U11E delimitado por la partición con lámina plástica de la parte izquierda de la imagen. Página 58.

Figura 41. Sensores de temperatura para la medida de la temperatura de las hojas de cultivo (a), de la superficie del acolchado de polipropileno sobre el suelo (b) y del suelo (c) y de flujo de calor del suelo situado a 10 cm de profundidad (c). Página 58.

Figura 42. Anemómetros tridimensionales e IRGASON (a) para las medidas puntuales de velocidad del aire y anemómetros 2D para medidas continuas (b) Página 62.

Figura 43. Dimensiones de la ventana lateral norte del sector U11E y posiciones de los puntos de medida con los anemómetros tridimensionales (●) y con el IRGASON (◆). Página 62.

Figura 44. Distribución de los 18 puntos de medida de la velocidad v_{xj} y sus correspondientes superficies elementales S_{vj} en la ventana Norte del sector U11E. Página 63.

Figura 45. Sistema de medida del flujo de aire en las ventanas IRGASON (a) y sensor portátil para la medida de la fotosíntesis en las hojas del cultivo (b). Página 65.

Figura 46. Fotografía de una hoja de tomate sobre un folio DIN A3 (b) e imagen en blanco y negro (b) utilizada para el cálculo de la superficie foliar. Página 66.

Figuras 47 y 48. 47 (izquierda), tabla de grupos homogéneos de la prueba de Rangos Múltiples. 48 (derecha), Gráfica de Caja y Bigotes. Página 68.

Figura 49. Imagen del sistema de apertura de la ventana lateral del sector U11O (a), del motorreductor instalado en la ventana lateral del sector U11E con el cable enrollado (b) y diseño modificado para evitar el enrollamiento del cable (c). Página 70.

Figura 50. Evolución de las componentes perpendiculares de la velocidad del aire v_x medidas con los anemómetros 2D a través de las ventanas Norte y Sur del lado Oeste U11O (—) y del lado Este U11E (—) a lo largo del primer ensayo realizado con viento de *Levante* el 8/6/2017 (a) y velocidad en el centro del invernadero a 1.5 m de altura (b). Página 71.

Figura 51. Imagen de satélite del invernadero experimental U11, con sus dimensiones y orientación de las ventanas con respecto al norte. También aparecen los invernaderos vecinos. Página 72.

Figura 52. Evolución de la velocidad del viento (—) y la dirección (····) para los dos días de ensayos puntuales: el 8/6/2017 (a) y el 16/6/2017 (b). Se indica la dirección de 28°NE perpendicular a las ventanas para viento de *Levante* (—) y la zona de viento de dirección Sur (□). Página 72.

Figura 53. Evolución de las componentes perpendiculares de la velocidad del aire v_x medidas con los anemómetros 2D a través de las ventanas Norte y Sur del lado Oeste U11O (—) y del lado Este U11E (—) a lo largo del segundo ensayo realizado con viento inicialmente de *Levante* que viró a el 8/6/2017 (a) y velocidad en el centro del invernadero a 1.5 m de altura (b). Página 76.

Figura 54. Valores del flujo medio de ventilación G_M ($m^3 s^{-1}$) en función de la velocidad del viento \bar{U}_0 ($m s^{-1}$) en el invernadero U11 con todas dos y tres ventanas cenitales abiertas (Espinoza *et al.*, 2017). Página 80.

Figura 55. Distribuciones de temperatura simuladas con CFD para el invernadero experimental U11 con viento del norte de $2.6 m s^{-1}$ con las ventanas instaladas en el sector U11O (a) y un diseño similar a las instaladas en el sector U11E (b) con las ventanas cenitales abiertas (Reyes-Rosas, 2018). Página 80.

Figura 56. Evolución de la temperatura del aire fuera (···) y dentro del invernadero en el lado este U11E (—) y en el lado oeste U11O (—) y de la humedad relativa del aire interior en el lado este U11E (—) y en el lado oeste U11O (—) para los dos días de ensayos realizados con viento de *Levante* el 8/6/2017 (a) y el 16/6/2017 (b). Periodo de duración de los ensayos (□). Página 81

Figura 57. a) Evolución de la temperatura del aire fuera (···) y dentro del invernadero en el lado este U11E (—) y en el lado oeste U11O (—) y de la humedad relativa del aire interior en el lado este U11E (—) y en el lado oeste U11O (—) para la primera quincena de junio. b) Evolución de la velocidad (—) y la dirección del viento (····). Dirección de 28°NE perpendicular a las ventanas para viento de *Levante* (—) y viento proveniente del Sur (□). c) Evolución de la radiación solar exterior (···) y dentro de los sectores U11E (—) y U11O (—). Página 83.

Figura 58. Variación a lo ancho del invernadero (posición con respecto al lateral norte) de las temperaturas medias registradas durante todo el periodo de crecimiento del cultivo en el invernadero U11: sector Este a 1 m de altura (—) y 2 m (- - -) y sector Oeste a 1 m de altura (—) y 2 m (- - -). Página 86.

Figura 59. Evolución de la temperatura exterior (---), la temperatura en el centro del sector U11E a 1 m (---) y a 2 m (- - -) y la temperatura en el centro en el sector a 1 m (---) y 2 m (- - -) durante el periodo del 02/06/2017 al 07/06/2017. Página 88.

Figura 60. Evolución de la humedad en el sector U11E a en el centro a 1 m (---) y a 2 m (---), en la parte sur a 2 m (- - -) y en el sector U11O en el centro a 1 m (---) y a 2 m (---) y en la parte sur a 2 m (- - -) para el periodo del 25/05/2017 al 01/06/2017. Página 92.

Figura 61. a) Evolución de la velocidad del viento (---) y su dirección (---) y b) del porcentaje de apertura de las ventanas para el periodo 25/05/2017 al 24/05/2017. Página 93.

Figura 62. a) Evolución de la velocidad del viento (---) y su dirección (---), b) evolución de la humedad exterior y a 2 m en el sector Este en la parte norte (---), en el centro (---), en el sur (- - -) y en el sector Oeste en la parte norte (---), en el centro (---) y en el sur (- - -) para el periodo del 28/05/2017 al 29/05/2017. Página 94.

Figura 63. a) Evolución de la humedad y a 1 m en el sector Este en la parte norte (---), en el centro (---) y en el sector Oeste en la parte norte (---) y en el centro(---), b) evolución de la humedad en el centro del sector Este (---) y Oeste (---) a 2 m para el periodo del 09/06/2017 al 15/06/2017. Página 95.

Figura 64. a) Evolución de la velocidad del viento (---) y su dirección (---) y b) del porcentaje de apertura de las ventanas para el periodo del 12/06/2017 al 15/06/2017. Página 96.

Figura 65. Evolución de la humedad a 2 m (a) y 1 m (b) en el sector Este en la parte norte (---), en el centro(---), en el sur (---) y en el sector Oeste en la parte norte (---), en el centro(---) y en el sur (- - -) para el periodo del 17/06/2017 al 29/06/2017. Página 97.

Figura 66. a) Evolución de la velocidad del viento (---) y su dirección (---) y b) del porcentaje de apertura de las ventanas para el periodo 16/05/2017 al 29/05/2017. Página 98.

Figura 67. Evolución de la radiación a 2.4 m en el sector U11E (---) y U11O (---) para el periodo del 16/06/2017 al 28/06/2017. Página 99.

Figura 68. Evolución de la velocidad del viento (---) y su dirección (---) para el periodo del 25/06/2017 hasta el 27/06/2017. Página 99.

Figura 69. a) Evolución de la velocidad del viento (---) y su dirección (---) y b) del porcentaje de apertura de las ventanas para el 02/07/2017 al 08/07/2017. Página 100.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Figura 70. Evolución de las humedad a 2 m en el sector Este en la parte norte (---), en el centro (---), en el sur (---) y en el sector Oeste en la parte norte (---), en el centro (---) y en el sur (---) para el día 07/07/2017 . Página 101.

Figura 71. Valores de la fotosíntesis de las plantas de tomate el 8 de junio de 2017 a diferentes alturas desde el suelo (a) y de la distribución de la superficie de hojas a lo largo del tallo (b). Página 105.

Figura 72. Valores de la transpiración de las plantas de tomate el 8 de junio de 2017.107

Figura 73. Evolución de la producción comercializable (a) y total (b) en el sector este (U11E) con las ventanas laterales de 3.3 m de altura (---) y el sector oeste (U11O) con las ventanas laterales de 0.9 m (---). Página 108.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cronograma de la elaboración del trabajo fin de grado. Página 11.

Tabla 2. Niveles térmicos importantes para cultivo de tomate en invernadero (Tesi, 1972).
Página 17.

Tabla 3. Previsión del incremento de las temperaturas máximas (°C) de otoño y primavera para final de siglo y 2060 según modelos RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5. Página 30.

Tablas 4 y 5. Distribución sistemas de ventilación lateral y cenital y su accionamiento en la provincia de Almería 2005/2006 (Sánchez-Guerrero et al., 2010). Página 45.

Tabla 6. Niveles climáticos importantes para cultivo de tomate en invernadero (Tesi, 1972). Página 51.

Tabla 7. Características de los dos sectores seleccionados para la realización del trabajo.
Página 53.

Tabla 8. Características geométricas y aerodinámicas de la malla anti-insectos.
Página 54.

Tabla 9. Diferentes variables registradas y los equipos utilizados para ello. Página 57.

Tabla 10. Condiciones climáticas registradas dentro y fuera del invernadero (media±desviación estándar) durante los dos periodos de medición. Velocidad del viento v_R , dirección del viento ϑ_v , temperatura exterior t_e , diferencia de temperatura interior-exterior Δt_{ie} , humedad exterior HR_e , humedad interior HR_i y radiación solar exterior R_{se} . Página 61.

Tabla 11. Valores de velocidad medidos con los anemómetros 2D en continuo v_j y valores normalizados ($v_j^*=v_j \cdot \bar{U}_0/U_{0j}$) con la velocidad del viento (Molina-Aiz et al., 2009) medidos con los anemómetros 3D en las ventanas del invernadero U11 en el ensayo realizado el 8/6/2017 con un viento de $\bar{U}_0=8.3 \text{ m s}^{-1}$ (v_j^* es positiva para entrada de aire en el invernadero y negativa para salida). Página 73.

Tabla 12. Valores de velocidad medidos con los anemómetros 2D en continuo v_j y valores normalizados ($v_j^*=v_j \cdot \bar{U}_0/U_{0j}$) con la velocidad del viento (Molina-Aiz et al., 2009) medidos con los anemómetros 3D en las ventanas del invernadero U11 en el ensayo realizado el 16/6/2017 con un viento de $\bar{U}_0=2.7 \text{ m s}^{-1}$ (v_j^* es positiva para entrada de aire en el invernadero y negativa para salida). Página 78.

Tabla 13. Valores del caudal volumétrico de ventilación G_j ($m^3 s^{-1}$) a través de cada punto de medida j en las ventanas laterales del invernadero U11 calculados con los valores de velocidad del aire medidos con los anemómetros 3D normalizados v_j^* con la velocidad del viento (G_j es positivo para entrada de aire en el invernadero y negativo para salida). Página 79.

Tabla 14. Temperaturas medias del aire. Letras diferentes entre tratamientos de una misma fila (correspondiente a un mismo periodo de medida) indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias con un nivel del 95.0% de confianza. Las letras están ordenadas de temperatura más frías a más cálidas. Página 87.

Tabla 15. Diferencias en las temperaturas medias entre los sectores U11O-U11E. Página 88

Tabla 16. Valores promedio de las temperaturas máximas y mínimas diarias en los dos sectores del invernadero U11. Letras diferentes entre tratamientos de una misma fila (correspondiente a un mismo periodo de medida) indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias con un nivel del 95.0% de confianza. Las letras están ordenadas de temperatura más frías a más cálidas. Página 90.

Tabla 17. Humedades absolutas medias en los dos sectores del invernadero U11. Letras diferentes entre tratamientos de una misma fila (correspondiente a un mismo periodo de medida) indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias con un nivel del 95.0% de confianza. Las letras están ordenadas de humedades más altas a más frías. Página 90.

Tabla 18. Valores promedio de las humedades absolutas máximas y mínimas diarias en los dos sectores del invernadero U11. Letras diferentes entre tratamientos de una misma fila (correspondiente a un mismo periodo de medida) indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias con un nivel del 95.0% de confianza. Las letras están ordenadas de humedades más altas a más bajas. Página 91.

Tabla 19. Valores promedio de radiación solar y radiación PAR diarias en los dos sectores del invernadero U11. Letras diferentes entre tratamientos de una misma fila (correspondiente a un mismo periodo de medida) indican que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias con un nivel del 95.0% de confianza. Las letras están ordenadas de valores más bajos a más altos. Página 102.

Tabla 20. Valores promedio de radiación solar (en $W \cdot m^{-2}$) y radiación PAR diarias medias (en $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) en el interior de los dos sectores del invernadero U11. Página 103.

Tabla 21. Valores del flujo de CO_2 FC_j calculado a través de las ventanas del sector este del invernadero U11 el 8 de junio de 2017, obtenidas a partir del caudal volumétrico de ventilación G_j ($m^3 s^{-1}$) a través de cada punto de medida j y de la concentración C_j de CO_2 . Página 104.

ANÁLISIS DE LA VARIACION DEL MICROCLIMA GENERADA MEDIANTE EL AUMENTO DE LA SUPERFICIE DE VENTILACIÓN LATERAL EN UN INVERANDERO MULTITUNEL CON CULTIVO DE TOMATE

Tabla 22. Valores del flujo de CO₂ consumido por las plantas de tomate P_j el 8 de junio de 2017, obtenidas a partir de la fotosíntesis medida p_j en función de la altura h_{vj} y la superficie foliar que le corresponde S_{pj} Página 105.

Tabla 23. Valores del flujo de H₂O X_j calculado a través de las ventanas del sector este del invernadero U11 el 8 de junio de 2017, obtenidas a partir del caudal volumétrico de ventilación G_j (m³ s⁻¹) a través de cada punto de medida j y de la concentración x_j de H₂O. Página 106.

Tabla 24. Valores del flujo de H₂O consumido por las plantas de tomate el 8 de junio de 2017. Página 107.

El principal objetivo del presente trabajo ha sido evaluar el efecto del incremento de la superficie de ventilación lateral sobre la capacidad de ventilación y el microclima de un invernadero. El experimento desarrolló en el invernadero U11 del Campo de Prácticas de la Universidad de Almería (Centro de Innovación y Tecnología "Fundación UAL-ANECOOP") en dos sectores separados por una lámina de polietileno. El sector Oeste (U11O), con unas dimensiones de 24×20 m, estaba dotado de ventanas laterales de 0.9 m de alto y en el sector Este (U11E), de 24×25 m, se instalaron unas nuevas ventanas de 3.3 m de altura.

Comparando los valores medios de velocidad medidos en los ensayos puntuales con anemómetros 2D situados en las ventanas laterales de los dos sectores, se observó que en la ventana Norte la velocidad del sector U11O fue un 35% superior a la media de la ventana U11E. Sin embargo, el valor medio registrado en las dos posiciones de la ventana Norte del sector U11E libres de obstáculos fue superior, lo que hace suponer que estas diferencias se debieron principalmente a la presencia de la nave del controlador, y no al efecto del tamaño de la ventana. El caudal medio de ventilación medido en el sector U11E fue de $24.0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, correspondiente a una tasa de ventilación de 25.2 h^{-1} . Mediante el análisis estadístico de los datos registrados de forma continua a lo largo de todo el periodo de crecimiento del cultivo, se observaron diferencias estadísticamente significativas en las temperaturas medias del aire, siendo de media $1.1 \text{ }^\circ\text{C}$ inferiores a 1 m y $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ a 2 m en el sector Este con las ventanas de mayor tamaño. También se han observado valores de temperaturas máximas significativamente inferiores para todos los sensores del lado Este, así como para las temperaturas de las hojas de cultivo en ese sector.

The main objective of the present work has been to evaluate the effect on the ventilation capacity and the microclimate of a greenhouse of the increase in the side vent surface. The experiment was developed in the greenhouse U11 of the Experimental Farm of the University of Almería (Center for Innovation and Technology "Fundación UAL-ANECOOP") in two sectors separated by a polyethylene sheet. The West sector (U11W), with dimensions of 24×20 m, was endowed with side vents of 0.9 m high and in the East sector (U11E), 24×25 m, new vents 3.3 m high were installed.

Comparing average velocities measured in the isolated testes with 2D anemometers located in the side vents of the two sectors, we can observe that velocity at the north vent of the U11O sector was 35% higher than the average of the U11E vent. However, the average values recorded in the two positions free of obstacles of the north vent of the U11E sector was higher, which makes it suppose that these differences are produced mainly by the presence of the controller building, and not to the effect of the size of the side vents. The average ventilation airflow measured in the U11E sector was $24.0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, corresponding to a ventilation rate of 25.2 h^{-1} . Statistical analysis of the data recorded continuously throughout the crop growing period showed statistically significant differences in average temperatures of air, being $1.1 \text{ }^\circ\text{C}$ lower at 1 m and $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ lower to 2 m in the East sector with larger vents. Also, values of maximum temperatures significantly lower for all sensors on the East sector have been observed, as well as for the temperatures of tomato leaves in that sector.

