



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN
INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA**

**CONTROL DEL DÉFICIT DE PRESIÓN DE VAPOR (DPV_c) EN CULTIVOS DE
INVERNADERO CON SISTEMAS DE NEBULIZACIÓN**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

PRESENTA

JOSÉ ORBELIN GUTIÉRREZ HERNÁNDEZ

DIRECTOR

PhD. EFRÉN FITZ RODRÍGUEZ



APROBADA



Chapingo, Estado de México, México, Diciembre de 2020



CONTROL DEL DÉFICIT DE PRESIÓN DE VAPOR (DPV_c) EN CULTIVOS DE INVERNADERO CON SISTEMAS DE NEBULIZACIÓN

Tesis realizada por José Orbelin Gutiérrez Hernández bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR:



PhD. Efrén Fitz Rodríguez

ASESOR:



PhD. Irineo L. López Cruz

ASESOR:



Dr. Agustín Ruíz García

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
DEDICATORIA	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS	x
RESUMEN GENERAL	xi
ABSTRACT	xii
1.- INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	3
1.3 Antecedentes (Justificación)	3
2.- REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Antecedentes de agricultura en ambientes controlados	5
2.2 Métodos de enfriamiento de invernaderos	6
2.3 Ventilación forzada	8
2.4 Sombreo	9
2.5 Enfriamiento evaporativo	10
2.6 Déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c)	12
2.7 Importancia del control de DPV en los cultivos	15

2.8	Referencias.....	17
3.-	Control simple (ON/OFF) del déficit de presión de vapor (DPV_c) para cultivos en invernaderos con sistema de nebulización	33
	Resumen	33
3.1	INTRODUCCIÓN.....	34
3.2	Materiales y Métodos.....	36
3.2.1	Área de estudio.....	36
3.2.2	Caracterización del sistema de nebulización.....	39
	Figura 5. a) Caracterización de las líneas del sistema de nebulización a diferentes presiones de operación. b) Uniformidad del caudal en las boquillas nebulizadoras en las líneas laterales, (Pared este y oeste del invernadero). 40	
3.2.3	Configuración de la ventilación	40
3.2.4	Temperatura y Humedad relativa del aire óptimo del cultivo de tomate en invernadero.....	44
3.2.5	Rangos idóneos de DPV_c para el desarrollo del tomate en invernadero.	44
3.2.6	Calculo del déficit de presión de vapor de cultivo DPV_c	45
3.2.7	Sistema de adquisición de datos	47
3.2.8	Efecto del DPV_c en el cultivo de jitomate.....	48

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIONES	48
3.3.1 Evaluación del sistema de control de DPV_c en un cultivo de jitomate ..	48
3.3.2 Evaluación del algoritmo de control de DPV_c a diferentes valores objetivos, en cultivo de jitomate	52
3.3.3 Efecto del control DPV_c en la transpiración del cultivo de jitomate	55
3.4 CONCLUSIONES	57
3.5 Referencias	58
4.- Comportamiento de la conductancia estomática en cultivo jitomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) a diferentes rangos de déficit de presión de vapor (DPV_c).....	68
Resumen	68
4.1 Introducción	69
4.2 Materiales y Métodos.....	72
4.2.1 Tratamientos de déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c).....	73
4.2.2 Análisis estadístico	74
4.3 Resultados y Discusiones	74
4.3.1 Comportamiento del clima en el interior del invernadero con los diferentes rangos de déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c)	74
4.3.2 Efecto de la variación déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c) en la conductancia estomática en cultivo de jitomate.....	76

4.3.3 Relación de la conductancia estomática con la temperatura de la hoja de cultivo (T_h).....	80
4.3.4 Relación de la conductancia estomática con la humedad relativa del aire (HR).	82
4.3.5 Efecto de la radiación solar (R_s) en la conductancia estomática (g_s).....	84
4.4 Conclusiones	87
4.5 Referencias.....	87

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Rango óptimo de DPV_c para cultivos en invernadero, descritos por diversos autores.....	15
Cuadro 2. Caracterización del ambiente del invernadero a diferentes combinaciones de apertura de ventilas.....	43
Cuadro 3. Medias de variables climáticas interna del invernadero y condiciones externas de los días de evaluación.	49
Cuadro 4. Comparación de medias de variables ambientales del interior y exterior del invernadero, con y sin control del DPV_c	52
Cuadro 5. Condiciones en el interior del invernadero, a diferentes DPV_c (setpoint) y condiciones externas.....	54
Cuadro 6. Efecto de la variación del déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c), variables que están relacionadas como la temperatura y humedad relativa del aire, la temperatura de la hoja del cultivo, conductancia estomática (g_s) del cultivo	

de jitomate, así como variables del exterior que influyen en las condiciones del invernadero.	75
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento del déficit de presión de vapor de un cultivo de jitomate en un día soleado en la Universidad Autónoma Chapingo (Rosales-Vicelis, 2016).	4
Figura 2. Representación esquemática de los sistemas de enfriamiento en invernadero.	6
Figura 3. Temperatura del aire promedio mensual (Figura 1a), promedio mensual de la Humedad relativa del ambiente (Figura 3b).	37
Figura 4. Vista frontal del invernadero experimental, con 30 boquillas para el tratamiento del control de DPV_c	39
Figura 5. a) Caracterización de las líneas del sistema de nebulización a diferentes presiones de operación. b) Uniformidad del caudal en las boquillas nebulizadoras en las líneas laterales, (Pared este y oeste del invernadero).	40
Figura 6. Consumo de agua (barras) y número de pulsos (-o-) diarios del sistema de nebulización a diferentes porcentajes de apertura de ventilas laterales (barras). La ventila cenital se mantuvo constante a 50 % de apertura.	43
Figura 7 Diagrama de flujo para el algoritmo de control ON/OFF del DPV_c para cultivos de invernadero.	47
Figura 8. Comportamiento de las variables climáticas que están directamente relacionadas con el DPV_c en el interior del invernadero. (a) Temperatura del aire interior con control(-o-), sin control (-+-), Temperatura del aire exterior día sin	

control (-*-) y con control (-^). (b) Temperatura de la hoja control(-o-), sin control (-*-). (c) Humedad relativa interior sin control (-^), con control (-+-), Humedad exterior día con control (-o-), sin control (-*-). (d) Velocidad del viento día sin control (-*-), con control (-o-), Radiación solar día con control (-+-), sin control (-^). (e) DPVc con control (-+-), sin control (-*-), objetivo DPVc (-^). fecha de datos (4-5/02/2020).	51
Figura 9. Tratamientos de <i>DPV_c</i> con diferentes rangos de activación del sistema de control ON/OFF.....	53
Figura 10 Comparación de la humedad relativa interna con el <i>DPV_c</i> controlado y humedad relativa externa para cada tratamiento.....	54
Figura 11. Efecto del control de <i>DPV_c</i> en la transpiración (<i>E</i>) y conductancia estomática (<i>g_s</i>) en el cultivo de jitomate en 150 días después del trasplante. Análisis de varianza (ANOVA), MSE(n=480), la diferencia significativa entre tratamientos del control <i>DPV_c</i> y sin control se comparó mediante prueba de Tukey. Significativo P<0.05 (*), significativamente p<0.01 (**).	56
Figura 12. Muestreo de la conductancia estomática en cultivo de jitomate y distribución de los nebulizadores.	73
Figura 13. Relación de la conductancia estomática y el déficit de presión de vapor de cultivo (<i>DPV_c</i>) en cultivo de jitomate.	77
Figura 14. Respuesta de la conductancia estomática de acuerdo a los diferentes tratamientos de <i>DPV_c</i> con sistema de nebulización de alta presión, implementado en un cultivo de jitomate con ventilación natural. Las comparaciones de medias se realizaron mediante la prueba de Tukey (P<0.05).	79
Figura 15. Efecto de la temperatura de la hoja en la conductancia estomática en cultivo de jitomate. Esta variable tiene un efecto negativo en la apertura estomática al aumentar la temperatura de la hoja.	81

Figura 16. Efecto de la humedad relativa en la conductancia estomáticas en cultivo de jitomate. Esta variable climática tiene una relación positiva al incremento de la humedad.	83
Figura 17. Respuesta de la conductancia estomática con respecto a la hora del día, conductancia estomática con control de <i>DPVc</i> (Línea azul), respuesta estomática sin control de <i>DPVc</i> (Línea negra), radiación solar PAR (Línea roja). Las horas representadas son el tiempo en las que se realizaron las mediciones.	86

DEDICATORIA

Con gran amor y respeto

Al señor Esteban Gutiérrez Méndez y la señora Marilú Hernández Cruz (†),
quien con mucho amor lo llevare en mi corazón, por su incansable apoyo y
motivación hacia mi persona, en la búsqueda de mis sueños. Y sobre todo por
haberme enseñado el camino para salir adelante. Gracias papá y mamá.

A mi familia, mis pequeños Henry Jhonatan y Ariadna Shirley, mi esposa Dany
Cindy que son la gran motivación de superación y motor de mi vida.

A la familia Ruiz López por toda la motivación brindada, Rosendo, Marlithe,
Gudeyba Estrella y Yadira.

AGRADECIMIENTOS

A agradezco al CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) por el apoyo económico brindado durante mis estudios de doctorado.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por brindarme la oportunidad de continuar con mis estudios profesionales.

Al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) por la formación y apoyo durante el desarrollo de mis estudios y trabajos de investigación.

Infinito agradecimiento al Dr. Efrén Fitz Rodríguez por sus aportes en mi formación académica y por su experiencia y tiempo dedicado al presente trabajo.

Al Dr. Irineo L. López Cruz por sus aportes, experiencia y apoyo brindado en mis estudios de doctorado y en este trabajo.

Al Dr. Agustín García Ruiz por compartir sus conocimientos al presente trabajo de investigación.

Al Dr. Armando Arias por su valioso apoyo y enseñanza en el proceso de investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS

El autor del presente trabajo de tesis es originario de la región centro del Estado de Chiapas, Nacionalidad Mexicana, nació el 16 de noviembre de 1985.

En julio de 2008 ingresó al Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola (DIMA) de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), obteniendo el título de Ingeniero mecánico agrícola en abril de 2013 mediante la tesis, “Instalación de Sistemas de Auto Guiado “Auto-Pilot” en Tractores John Deere en Modelos Diferentes”.

En agosto de 2013 ingresó al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) en la UACH. Obteniendo el grado de Maestro en Ingeniería en febrero de 2016.

En agosto de 2016 ingresó al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) en la UACH, para realizar los estudios de doctorado.

En agosto de 2016 ingresó al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) en la UACH, para realizar los estudios de doctorado.

RESUMEN GENERAL

CONTROL DEL DÉFICIT DE PRESIÓN DE VAPOR (DPV_c) EN CULTIVOS DE INVERNADERO CON SISTEMAS DE NEBULIZACIÓN

Los beneficios de controlar el déficit de presión de vapor de un cultivo (DPV_c) son diversos, como un mejor rendimiento y calidad de los frutos, reducción del estrés hídrico, hasta la prevención de enfermedades. Para controlar el DPV_c fue necesario caracterizar el sistema de nebulización y el sistema de ventilación ajustando los porcentajes de apertura de las ventilas laterales del invernadero con la finalidad de minimizar gasto de agua y el tiempo de operación del sistema de nebulización. Se implementó un simple control ON-OFF para la activación del sistema de nebulización, aplicando una tasa de nebulización constante de $0.15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, mientras se mantenía un porcentaje de apertura del 10 o 15 y 50 % para las ventilas laterales y cenitales, respectivamente. Bajo esta configuración de operación se logró mantener un DPV_c promedio de 0.99 kPa, un 59 % de humedad relativa, una temperatura del aire de 25.3°C y una temperatura del cultivo de 23.6°C . La transpiración del cultivo se redujo en un 31.8 % por los efectos del control DPV_c implementado. Se analizaron los efectos que tienen las variables ambientales (temperatura del aire, humedad relativa, DPV_c y radiación solar) en la conductancia estomática (g_s) en las hojas del cultivo. Los resultados muestran que mantener el DPV_c en un rango de 0.7 a 1.3 kPa, mejora la g_s , en un 54.6 %. Por otro lado, al aumentar la temperatura de la hoja del cultivo y DPV_c , la conductancia estomática tiene un efecto negativo. En contraste, si se aumenta la humedad relativa en un rango de 45 a 80 %, se tiene un efecto positivo. Se observó también que el DPV_c y la radiación solar afectan directamente la g_s , siempre y cuando se mantenga el DPV_c en rango ideal (0.7 a 1.3 kPa).

Palabras clave: Déficit de Humedad, Conductancia Estomática, Temperatura de la Hoja, Transpiración, Estrés Hídrico, Invernadero.

Tesis de Doctorado en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: José Orbelin Gutiérrez Hernández

Director de Tesis: Dr. Efrén Fitz Rodríguez

ABSTRACT

VAPOR PRESSURE DEFICIT (VPD_c) CONTROL IN GREENHOUSE CROPS WITH FOGGING SYSTEMS

The benefits of controlling the crop vapor pressure deficit (VPD_c) are diverse such as improved yield and fruit quality, water stress reduction and disease prevention. To control VPD_c , it was necessary to characterize the fogging and ventilation systems by adjusting the opening percentage of the lateral greenhouse vents in order to minimize water consumption and the operation time of the fogging system. A simple ON-OFF control was implemented to activate the fogging system, by applying a constant nebulization rate of $0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, while keeping a percentage of window opening of 10 or 15 and 50 % for the lateral and zenith vents, respectively. Under these working configurations it was possible to maintain an average VPD_c of 0.99 kPa, a relative humidity of 59 %, an air temperature of 25.3°C , and crop temperature of 23.6°C . Crop transpiration was reduced in a 31.8 % by the effects of the implemented DPV_c control. The effects of ambient variables (air temperature, relative humidity, VPD_c and solar radiation) on the stomatal conductance (g_s) of the crop leaves were analyzed. Results show that maintaining the VPD_c in a range of 0.7 to 1.3 kPa improves the g_s , by 54.6 %. On the other hand, by increasing the temperature of the crop leaves and VPD_c , the stomatal conductance has a negative effect. In contrast, if humidity is increased in a range of 45 to 80 %, there is a positive effect. It was also observed that the DPV_c and solar radiation directly affect the g_s , as long as the VPD_c is kept in the ideal range (0.7 to 1.3 kPa).

Keywords: Humidity Deficit, Stomatal Conductance, Leaf Temperature, Transpiration, Water Stress, Greenhouse.

Tesis de Doctorado en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: José Orbelin Gutiérrez Hernández

Director de Tesis: Dr. Efrén Fitz Rodríguez

1.-INTRODUCCIÓN GENERAL

La producción hortícola en invernaderos se ha incrementado considerablemente en México durante las últimas décadas (Nieves García et al., 2011). Sin embargo, en México estos tipos de sistemas requieren de investigaciones más a profundo y emplear diferentes técnicas de climatización (calefacción, enfriamiento y ahorro energético) para hacer viable la producción a lo largo de todo el año.

El objetivo principal de los invernaderos es proporcionar un ambiente agradable a los cultivos, proporcionando un microclima óptimo para optimizar el crecimiento de las plantas. Así mismo para proveer de cultivos en áreas donde el clima no es factible para el desarrollo de alguna variedad en particular, de la misma manera para el progreso de cultivos en estaciones del año que no son adecuados al aire libre. Para cumplir con este objetivo es necesario de tecnologías que permitan el crecimiento de los cultivos.

Unas de las tecnologías que ha venido ganando terreno por más de 30 años para enfriar invernaderos y para prevenir el estrés hídrico, así como también para cuantificar el rendimiento de enfriamiento del medio son los sistemas de nebulización de alta presión (Toida et al., 2006). El sistema de nebulización tiene como características la homogeneidad de la temperatura y la humedad relativa del ambiente, los tamaños de gotas (2-50 μm) proporcionando una mejor refrigeración del insitu en poco tiempo, y también un mejor control del sistema. Sin embargo, la falta de caracterización y de estrategias de control en combinación con los sistemas de ventilación, especialmente la ventilación pasiva, ha limitado las capacidades del sistema de nebulización.

Por medio de los sistemas de nebulización de alta presión se puede realizar un mejor control del clima en el interior del invernadero y minimizar los riesgos de hongos y enfermedades. Una de las variables que describe mejor el microclima del invernadero es el Déficit de Presión de Vapor de cultivo (**DPV_c**), la cual se mide de manera indirecta por medio de dos entradas; la temperatura de la planta

y la humedad relativa del aire interior del invernadero, esta variable DPV_c puede ser definida como, la diferencia entre la presión de vapor de saturación en la hoja del cultivo (PV_{sat}) y la presión de vapor del aire actual (PV_s), (Prenger & Ling, 2001). Otros autores definen la PV_s como la presión parcial que ejerce el vapor de agua, contenido en el ambiente a una determinada temperatura sobre su correspondiente fase líquida, y PV_{sat} lo definen como el vapor de agua que se incrementa en el ambiente, ejerciendo una mayor presión de vapor de agua, hasta llegar un punto máximo de saturación (contenido máximo de vapor de agua en el aire) (Radmon Ramin. Shamschiri et al., 2018; Singh et al., 2018).

En esta investigación se realizó un control simple ON/OFF que permite controlar el déficit de presión de vapor de cultivos desarrollados en invernaderos, este control permite cambiar los rangos de DPV_c dependiendo de las necesidades del cultivo, este sistema trabaja con 30 boquillas distribuidas en un invernadero de 300 m², el cual puede ser modificado dependiendo de las necesidades del productor. El sistema de nebulización fue activado a presión de 1200 psi, obteniéndose una tasa de nebulización de 0.15 g·m⁻²·s⁻¹ g por boquillas. Con el sistema de control implementado se mejoró considerablemente el ambiente climático en el interior del invernadero, reduciendo 4 °C en la temperatura del aire, 2.5 °C en la temperatura de la hoja y un aumento de la humedad relativa de un 39.2%, mientras que el DPV_a se redujo en 1.98 kPa y el DPV_c se mantuvo en 1.0 kPa.

Otros de los resultados en esta tesis de investigación; variar el rango de déficit de presión de vapor del cultivo en los rangos de 0.7 a 1.3 kPa se mejora considerablemente la conductancia estomática del cultivo de jitomate en un 54.5%, mientras que cuando $DPV_c \geq 1.3$ kPa la conductancia empieza a disminuir significativamente.

1.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de control simple ON/OFF para el déficit de presión de vapor de cultivos (DPV_c) en invernaderos mediante un sistema de

nebulización de alta presión en un invernadero de con cultivo de jitomate (*Licopersicon Sculentum L.*).

1.2 Objetivos específicos

- ❖ Diseñar un sistema de control del déficit de presión de vapor de cultivo mediante un sistema de nebulización de alta presión.
- ❖ Caracterizar la respuesta fisiológica; la conductancia estomática del cultivo de jitomate a diferentes rangos de DPV_c .
- ❖ Analizar el consumo energético y agua de un sistema de control ON/OFF del DPV_c en cultivos en invernaderos.

1.3 Antecedentes (Justificación)

La producción de productos hortícolas en invernaderos en la región se ve afectado por las altas temperatura y por la baja humedad del ambiente interno durante en los soleados. Debido a estas fluctuaciones en el ambiente interno del invernadero el déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c) y el déficit de presión de vapor del aire (DPV_a) son altas, ocasionan estrés hídrico en el cultivo durante el día, provocando el cierre de los poros estomáticos del cultivo, este problema se traduce en una reducción en la producción y calidad de frutos, para resolver dicho problema es necesario desarrollar un sistema de control simple ON/OFF basado en el DPV_c , que pueda mantenerlo en los rangos de 0.8 a 1.2 kPa, el control puede ser instalado en un sistema de nebulización de alta presión que pulveriza el agua en pequeñas gotas (10-60 μm) por encima del dosel del cultivo, con ayuda de la ventilación natural.

Por otro lado, cuando el DPV_c está por debajo del umbral de 0.2 kPa se necesita aplicar sistema de calefacción por medio de gas, combinado con la ventilación natural para quitar el exceso de humedad en el interior del invernadero y aumentar la temperatura del aire y de la planta. Mantener el $DPV_c \geq 0.2$ kPa por la noche, ayuda a controlarlas enfermedades fungosas, y el potencial de condensación (Prenger & Ling, 2001).

En la Figura 1, se describe los procesos necesarios para mantener un DPV_c ideal para cultivos en invernaderos.

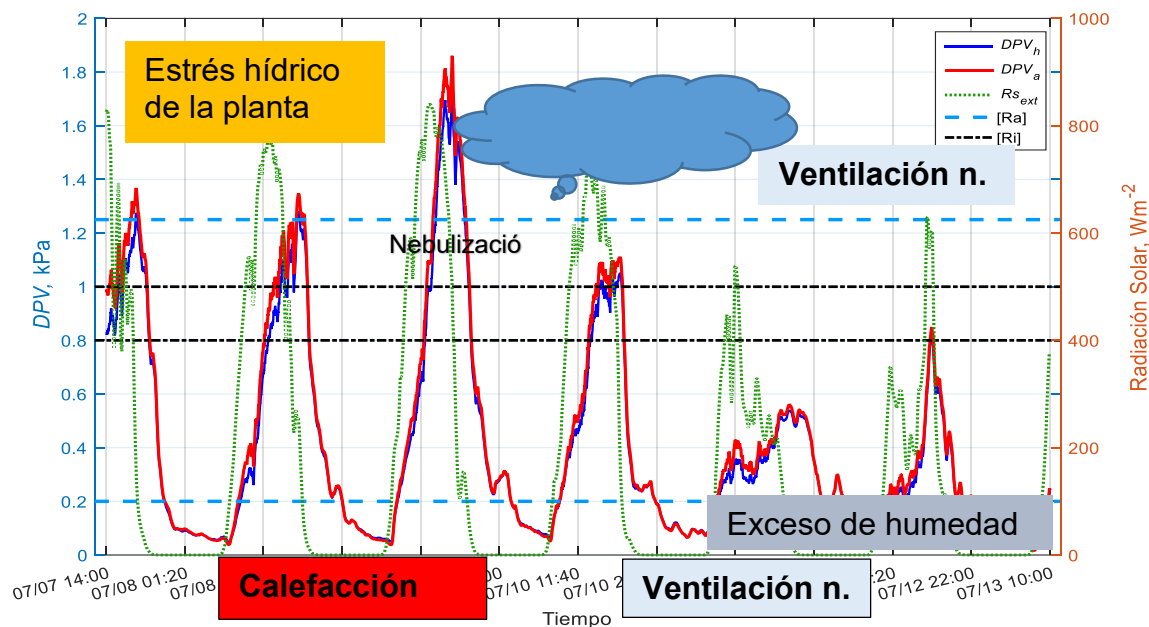


Figura 1. Comportamiento del déficit de presión de vapor de un cultivo de jitomate en un día soleado en la Universidad Autónoma Chapingo (Rosales-Vicelis, 2016).

Es por eso la importancia de este proyecto de investigación para controlar el déficit de presión de vapor de cultivos en invernaderos para el sector agrícola, ya que por medio de esta variable permite controlar las fluctuaciones de la temperatura y la humedad relativa del ambiente, Además el DPV_c es una forma práctica de medir el clima del invernadero y una manera útil de medir los diversos factores relacionados con el proceso fisiológico del cultivo. Por otro lado, mantener el DPV_c de 0.8 a 1.2 kPa por el día, se mejora la conductancia estomática significativamente, traduciéndolo en un aumento de absorción de CO_2 y por lo tanto la tasa de fotosíntesis es mayor (Jiao et al., 2019; Lu et al., 2015). De igual manera es ideal para la absorción de los nutrientes en los cultivos en invernaderos (Omafra, 2005),

2.-REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes de agricultura en ambientes controlados

Los ambientes controlados, no son más que espacios semicerrado en el cual el objetivo primordial es proteger a las plantas de los factores abióticos y bióticos, para tener una mejor producción y mayor rendimiento por cada metro cuadrado cultivado (Katsoulas et al., 2001; Shamshiri et al., 2018). Sin embargo, surge la necesidad de implementar controles automáticos a las diversas variables climáticas que afectan el desarrollo y producción del cultivo, como es la; la temperatura y humedad relativa del aire, temperatura de la planta, radiación solar, concentración de CO₂, déficit de vapor del aire (DPV_a) y del cultivo (DPV_c), así como también el riego, las cuales impiden mantener en un estado de confort al cultivo (Lu et al., 2015; Shamshiri et al., 2018) .

Además, los sistemas de control automático permiten obtener un desempeño óptimo en los sistemas dinámicos, mejorando la producción, aligerando las cargas de ordenamientos donde el hombre tiene que estar continuamente realizando operaciones rutinarias y repetitivas. Así como, de otras actividades donde el hombre no le es capaz de realizarla debido a diversos factores, como las altas temperatura y las bajas humedades en el interior de los invernaderos en verano e invierno, han llevado a desarrollar estrategias de control para mitigar estas necesidades en la agricultura protegida. A raíz de las de las necesidades de aumentar la producción en invernaderos, se han adoptados ampliamente la ventilación pasiva, ventilación mecánica, las mallas sombra, los enfriamientos evaporativos indirectos (pared húmeda) y directos (nebulización y micro-aspersores). Por otro lado, mejorar las estrategias de estos sistemas ayudaran a extender el periodo de producción de cultivos en zonas donde no son aptas para producir todo el año (Katsoulas et al., 2009).

2.2 Métodos de enfriamiento de invernaderos

Enfriar el aire del invernadero es un tema importante, para los meses más cálido, ya que las condiciones climáticas potencialmente limitan el rendimiento, calidad del cultivo y los costos beneficios (Amer et al., 2015). Los sistemas de enfriamiento por evaporación, se basan en la conversión de calor sensible en calor latente de agua evaporada, donde el agua se suministra mecánicamente. La temperatura del aire se reduce debido a la evaporación del agua en el aire. Por lo tanto, la temperatura disminuye a expensas del aumento de la humedad, mientras que la entalpía del aire permanece constante en el proceso. En la actualidad, los métodos de enfriamiento por evaporación incluyen plataformas de ventilación, basado en sus características de funcionamiento para enfriar el interior de los invernaderos, se clasifican de acuerdo a la Figura 2, (Ghani et al., 2019; Ghoulem et al., 2019; Heidarinejad et al., 2009; Misra & Ghosh, 2018).

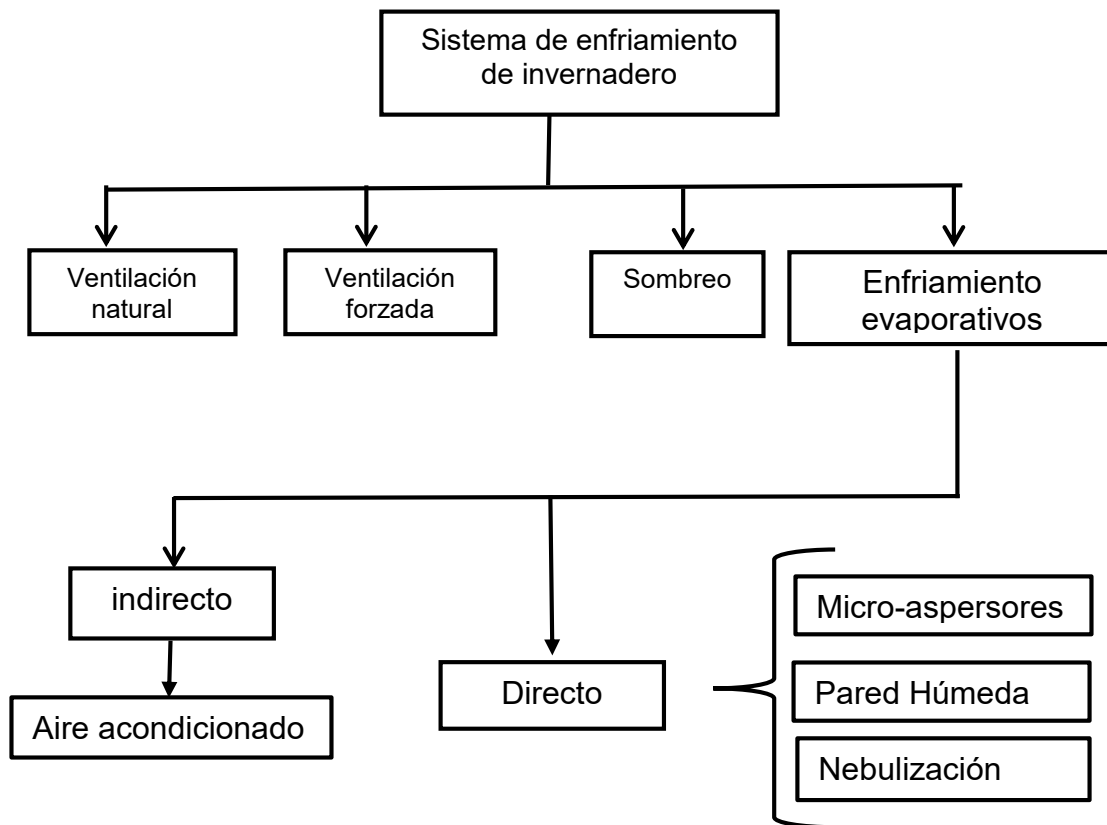


Figura 2. Representación esquemática de los sistemas de enfriamiento en invernadero.

En la actualidad existen diversos métodos para enfriar el interior de un invernadero, los cuales son implementados en diversas partes del mundo para eliminar el exceso de temperatura o al menos buscar medios para prevenir los incrementos y los decrementos de la humedad relativa, técnicas como las que se muestran en la Figura 2, son algunos de los métodos utilizados para enfriar el interior del invernadero Ventilación natural

La técnica de refrigeración en invernadero conocida como ventilación natural, hace referencia a la circulación del aire sin incluir los medios artificiales (ventiladores), si no como efecto de la presión al área de superficie de la estructura provocado por el viento, este métodos en la actualidad es uno de los más utilizados en la producción hortícola en México y el mundo (Ghoulem et al., 2019; Nieves García et al., 2011), debido que es muy económico en comparación con los otros métodos, la eficiencia de esta técnica, depende las condiciones ambientales como lo es la velocidad del viento para poder realizar el intercambio de aire entre el interior y el exterior del invernadero la cual lo hace a través de las aperturas de las ventilas al tener una diferencia de temperatura (Katsoulas et al., 2009; Kittas et al., 1997).

Sin embargo, la ventilación natural no es autosuficiente cuando el invernadero se encuentra con cultivo ya que la tasa de ventilación es baja, provocando un aumento de la temperatura del aire interno del invernadero, debido a la obstrucción del follaje de la planta (López-Cruz et al., 2014) adicionalmente el flujo de aire en el interior del invernadero es inestable e irregular.

El flujo de aire a través de una grieta puede ser causado por la combinación de diferencia de presión inducida por fuerzas las fluctuaciones del viento (Kittas & Bartzanas, 2007), por otro lado, Katsoulas et al., (2009), describe que para velocidades de viento entre 1 a 1.5 m s⁻¹ el efecto de enfriamiento por fluctuación se puede ignorar y la tasa de ventilación se alcanza considerarse como una función de la velocidad del viento exterior. Con esta descripción la tasa de ventilación puede ser descrita con un modelo matemático, quedando en función

de la velocidad del viento exterior y el área de ventila, ecuación 1, Kittas et al., (1997), Valera et al (2002).

$$q_r = \left(\frac{A_v}{2}\right) C_{dT} C_w^{0.5} W_e \quad (1)$$

q_r ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) tasa de ventilación, A_v (m^2) área total de abertura de ventilación, C_{dT} (adimencional) coeficiente de descarga de la abertura, C_w (adimencional) coeficiente de presión de viento y W_e (m s^{-1}) velocidad del viento exterior.

2.3 Ventilación forzada

Utilizar ventiladores mecánicos permite un control preciso de la temperatura y humedad relativa en ambientes controlados que lo que se puede lograr con la ventilación pasiva, la ventilación forzada puede caracterizarse de dos maneras: sistemas de pedestal con la admisión del aire y otros basados en la extracción de aire del mismo. Arellano et al., (2011), describe a la ventilación mecánica como un flujo de aire creado a través de un invernadero, situados en los lado opuesto del mismo.

De acuerdo a los resultados obtenidos por (Arellano García et al., 2006) se tiene mejor *VPD* del cultivo con un sistema de ventilación forzada que con un sistema natural, sin embargo se necesita de 48 a 60 renovaciones de aire por hora para poder tener un *VPD* casi adecuado para el cultivo.

Las técnicas más usadas para determinar la tasa de ventilación de un invernadero están el método de gas trazador y el método de balance de energía. El método del gas trazador consiste en inyectar un gas en el invernadero y medir la disminución de su concentración en función del tiempo, debido a los procesos de infiltración y de ventilación. Los gases utilizados para desarrollar esta técnica son el óxido nitroso (N_2O), el cual presenta una ventaja de que no interfiere con el cultivo y de ser su concentración fácilmente medible y el anhídrido carbónico (CO_2) utilizado preferiblemente cuando el invernadero está en vacío. Donde la

tasa de ventilación está en función de la velocidad del viento exterior, como lo describe la ecuación 2, v [m s^{-1}] (Valera et al., 2002);

$$R = k(h) \cdot (r + f) \cdot v \quad [h^{-1}] \quad (2)$$

Donde, $k(h)$ constante que depende de la altura del invernadero, r abertura relativa de las ventanas [%de la altura máxima], f abertura de relativa de las grietas por donde se fuga el aire [% de abertura máxima].

Por otro lado, cuando la tasa de ventilación natural y forzada no es suficiente para mitigar la temperatura y aumentar la humedad relativa en los invernaderos, generalmente se aplica enfriamiento evaporativo ya sea mediante almohadilla o nebulización de alta presión, son dos tecnologías comúnmente utilizadas en la agricultura protegida en invernadero.

2.4 Sombreo

El sombreado de invernadero es un método utilizado para lograr un entorno adecuado para el crecimiento de los cultivos y para mejorar la productividad y la calidad de los cultivos por ende se evita que excesos de radiación dañen al cultivo en regiones cálidas y soleada (Federico Hahn, 2011). Esta técnica es empleada para disminuir la intensidad de la radiación (Sethi & Sharma, 2007) y evitar incremento de temperatura durante periodos cálidos, estas dependerán de su transmisión o sombreado y de la absorción de energía que produzca el material en el que este fabricada la malla (Valera et al., 2002), las mallas sombras de color negras son más utilizadas en la actualidad, sin embargo la calidad de la luz es inadecuada, debido que sombrea por igual en toda la banda del espectro electromagnético causando una disminución en la tasa fotosintéticamente activa (PAR) del cultivo (Ahemd et al., 2016). La elección de las mallas ha sido principalmente empírica, porque los datos técnicos como las propiedades radiométricas que se utilizan para caracterizar los diferentes tipos de mallas no están disponibles (Al-Helal et al., 2010) .

En la actualidad se ha realizado investigaciones con diferentes colores de mallas de sombreo para modificar los espectros de la luz filtrada por la radiación ultravioleta, visible y rojo lejano (Márquez et al., 2014; Sethi & Sharma, 2007).

Valera et al., (2002), en su libro climatización de invernaderos describe que la velocidad del viento escaso y la radiación solar elevada influye directamente en la temperatura del interior del invernadero, al haberse afectado la temperatura de manera positiva tiende a aumentar la evapotranspiración en las plantas. Este aumento de evapotranspiración afecta el suministro de agua que percibe a través de las raíces, llegando a un punto donde no puede seguir manteniéndola, esta deshidratación de la planta puede llegar a provocar quemaduras o marchites en las hojas, otras especies con parecidas circunstancias, dejan abatir parte de las hojas, para mitigar este problema se pueden colocar mallas de sombreo en el exterior o interior del invernadero.

Investigación realizada por Ahemd et al., (2016), resume la importancia de implementar maya sombra en agricultura protegida, como método de enfriamiento en regiones soleadas, puede mantener la temperatura del aire del invernadero a 5-10°C por debajo de la temperatura exterior, y manteniendo la humedad relativa aproximadamente en un 30-50% comparado con un invernadero sin sombra. En regiones frías, los materiales de sombreo actúan como aislantes, reduce la pérdida de calor de los invernaderos por la noche, manteniéndolo en 5 °C más alta que el exterior con un ahorro de aproximadamente en el 15-20% de la energía utilizada para calefacción.

2.5 Enfriamiento evaporativo

Los sistemas de enfriamientos evaporativos son los métodos más eficientes para controlar la temperatura y humedad del aire en el interior de un invernadero (Sethi & Sharma, 2007), se clasifican en dos tipos, los indirectos y los directos como se menciona en la Figura 2, los sistemas indirectos para su funcionamiento utilizan un intercambiador de calor masa de superficie húmeda con pasajes alternos secos y húmedos. La corriente de aire del producto se enfría sensiblemente a

través de los conductos secos sin aumento de humedad. Simultáneamente, la corriente de aire de trabajo se humidifica en los pasos húmedos adyacentes donde se absorbe el calor del aire producto debido a la evaporación del agua (Fakhrabadi & Kowsary, 2016). Los sistemas de enfriamiento evaporativos directo, el aire está en contacto directo con el agua líquida, que convierte el calor sensible en calor latente a través de la evaporación del agua suministrada, favoreciendo la transferencia de calor y masa entre el aire y el agua reduce la temperatura del bulbo seco del aire ambiente y aumenta la humedad a niveles esenciales, unos de los sistemas más conocidos, utilizados en la industria y en el campo agrícola, son los; micro-aspersores, los sistemas de almohadilla o pared húmeda y los sistemas de nebulización de alta presión, siendo los más eficientes para proporcionar condiciones climáticas de invernadero adecuadas en las regiones cálidas y secas (Kittas et al., 2013).

Los sistemas de enfriamiento por medio de los micro-aspersores, es rociar agua sobre una superficie del techo para formar una capa delgada de la superficie de agua libre que causa un aumento de la evaporación, este sistema trabajan a baja presión entre 70 a 100 kPa (Markley & Allen, 2004), dando como resultado gotas excesivamente grandes que no alcanzan a evaporarse antes de tocar la superficie de la hoja del cultivo, así mismo causa una mala distribución de las gotas de agua (S. Li & Willits, 2008), estos sistemas son utilizados comúnmente para aplicación de foliares y pesticidas, al mismo tiempo favoreciendo el clima del invernadero, bajando la temperatura y aumentando la humedad relativa del aire, dicho sistema presenta el inconveniente en el follaje del cultivo permanece húmedo, lo que aumenta la incidencia de plagas y enfermedades y el follaje se quema debido a la fertirrigación por los micro-aspersores (Li et al., 2019).

Los sistemas de almohadilla con ventilador en invernaderos han estado disponibles desde 1954, y actualmente son los más utilizados en verano para sistemas de refrigeración en México (Romantchik et al., 2017). Este sistema generalmente consiste en ventiladores en una de las paredes laterales del invernadero y almohadillas en la pared lateral opuesta. Los enfriamientos

evaporativos se logra haciendo pasar agua sobre las almohadillas y el flujo de aire saliente a través de los ventiladores (Al-Helal, 2007). El aire saliente de la almohadilla entra al interior del invernadero favoreciendo el aumento de humedad y disminución de la temperatura ambiente, la desventaja de estos sistemas, las variables climáticas como la humedad relativa y la temperatura no es homogénea en el interior del invernadero debido a la heterogeneidad del aire entrante.

Los sistemas que viene ganando terreno en el control climático en la agricultura protegida, son los sistemas de nebulización, que permite homogenizar la humedad y la temperatura del aire en el interior del invernadero. Este sistema de enfriamiento evaporativo mediante nebulización fue en particular interés para la realización de este trabajo de investigación, tal sistema utiliza una bomba de pistón que desarrolla una presión de 800 a 1500 psi, tuberías de distribución y boquillas de acero inoxidable donde la corriente de agua son rotas en gotas muy finas, alcanzando tamaños de 2-60 μm .

2.6 Déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c)

El déficit de presión de vapor del cultivo (DPV_c), basado en principios físicos, no es más que la diferencia de presiones entre la PV_{sat} (Presión de saturación del cultivo) y PV_s (Presión de saturación actual del aire y del cultivo) (Prenger & Ling, 2001). Para lograr el control de DPV_c es necesario instrumentar con sensores infrarrojos que son los encargados de medir la temperatura de la hoja del cultivo, así como también sensores de temperatura y humedad relativa del aire. Controlar el DPV_c en invierno es necesario humidificar por el día, debido al intercambio de aire seco del exterior con el interior del invernadero (Lu et al., 2015), siendo una estrategia efectiva para regular el ambiente del invernadero y mejorar la producción de jitomate en invierno.

Gates et al., (1998) propuso estrategias de DPV_a para propagación de plantas, basado en la temperatura del punto de rocío y del aire, de igual manera propuso como segunda estrategia el control del DPV_a , utilizando como variables de entradas la temperatura del aire y la humedad relativa, en su investigación

describe que al aumentar la temperatura del punto de rocío y disminuyendo la energía sensible suministrado en la cámara de crecimiento se alcanza a minimizar el error de control.

Arbel et al., (1999), utilizaron una estrategia basado en la radiación solar para determinar la tasa de evaporación y la ventilación, para enfriar invernaderos todo el año con sistemas de nebulización, reportando una disminución de la temperatura del aire de 5°C y un incremento de la humedad de 20% y también obtuvieron mejor uniformidad en el interior del clima, este sistema se comparado con un sistema de pared húmeda.

Handarto et al., (2006), desarrollaron una lógica de control basado en balance de masa y térmicos del aire de un invernadero utilizando datos meteorológicos y la humedad relativa, encontraron como resultado la reducción del déficit de presión de vapor del aire, y un aumento de la humedad relativa en el interior del invernadero.

Gázquez et al., (2008), realizó diversos estudios con diferentes estrategias de enfriamiento (blanqueo, nebulización con ventilación pasiva, y mecanizada) y los efectos que obtuvo al evaluar las estrategias, con el sistema de nebulización fue más eficiente para controlar la temperatura del aire y el *DPV*, también reporta que ni el sistema de nebulización y el blanqueo mejoraron el rendimiento total, por otro lado, considera que es más eficiente la combinación blanqueamiento de la cubierta y ventilación natural en términos económicos por el ahorro de agua y energía.

Por otro lado, Fuchs & Stanghellini, (2018), propusieron una estrategia de control de enfriamiento de invernadero con sistema de nebulización, basado en el algoritmo de la tasa de transpiración del cultivo y direccionando dicho sistema de nebulización estableciendo un límite de humedad específica. Para ajustar el punto requerido de la humedad y temperatura del aire de los factores climáticos del interior del invernadero, el comparativo de la estrategia de control se realizó con un invernadero similar controlado de manera tradicional.

(Linker et al., 2011), desarrollaron un control robusto para enfriar un invernadero, el invernadero estaba equipado con sistemas de ventiladores de velocidad variable y de nebulización de presión variable, basado en el método de la teoría de retroalimentación cuantitativa, describiendo el clima del invernadero en términos de entalpía del aire y relación de la humedad. El control implementado mostro un error de entalpía de 100 Jkg^{-1} de aire seco y una humedad específica de $0.1 \text{ g}_{\text{agua}}\text{kg}^{-1}$ de aire seco respectivamente, el control implementado mantuvo la temperatura del aire en 32.5°C y la humedad relativa de 80%.

Villarreal-Guerrero et al., (2012), presentaron estrategias para el control de enfriamiento en invernadero, la estrategia aplicada fue tasa de nebulización variables introducido en el invernadero, así como el porcentaje de apertura de ventilación. Con el objetivo de mantener el déficit de presión de vapor atmosférico y la entalpía, compararon con la estrategia de tasa de nebulización constante, basado en el *DPV*. Obteniendo como resultado un ahorro de 36% de agua y 30% menos energía eléctrica. En otra de las estrategias implementada donde utilizaron el ajuste de entalpías específicas del aire ($55.8 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) y *DPV*= 1.0kPa para controlar la tasa de apertura de ventilación y las tasas de nebulización, dicha estrategia mantuvo el *DPV* en $1.03\pm 0.10 \text{ kPa}$, y $54.77\pm 3.26 \text{ k}\cdot\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (F. Villarreal-Guerrero et al., 2014).

Por parte, Pahuja et al., (2015), establecieron un simulador integrado con un controlador de múltiples entradas y salidas para clima de invernadero, en donde hacen uso de un modelo climático de invernadero simplificado basado en principios de balance de masa y energía, el sistema tiene la capacidad para simular y analizar el efecto de diferentes estrategias de control, sombreado, ventilación, enfriamiento o calefacción, para el clima interior del invernadero bajo diferentes condiciones climáticas, el simulador nombrado *GHS-DPV* está basado en el déficit de presión de vapor de cultivos de invernadero. Reportan que el simulador tiene la capacidad de simular y regular automáticamente el *DPV* de cultivo dentro de los límites deseados, de igual manera tiene capacidad variar adecuadamente la velocidad del sistema de enfriamiento y de ajustar el estado

de funcionamiento de los diferentes equipos de controles del clima, pantalla sombra, ventilación de techo, extractores de aire, y sistema de enfriamiento.

Por su parte R. Shamsiri et al., (2016), comparo la ventilación natural con un sistema de enfriamiento evaporativo mediante nebulización, la estrategia de enfriamiento fue basado en el déficit de presión de vapor óptimo. Encontrando diferencia significativa en la condición climática, la temperatura lo mantuvo en 5°C menos y 20% más de humedad, con una diferencia de DPV de 1.5kPa aplicando nebulización.

2.7 Importancia del control de DPV en los cultivos

La importancia de controlar déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c) en invernaderos son diversos, con un control de DPV_c se puede mejorar el estado de confort de las plantas, las condiciones climáticas internas de un invernadero. El control de DPV_c puede mejorar el estado fisiológico de la planta, el DPV_c puede ser utilizado como un indicador de condensación en cultivos bajo cubierta plástica. De manera resumida en la Cuadro 1, se puede apreciar la importancia de controlar el de DPV_c en ambientes controlados (invernaderos) descritos por diversos autores.

Cuadro 1. Rango óptimo de DPV_c para cultivos en invernadero, descritos por diversos autores.

Rango DPV (kPa)	Descripción	Bibliografía
[0.2-1.0]	Ideal para la polinización y para la prevención de enfermedades fúngicas, también reporta que en este rango tiene poco o ningún efecto negativo en la fisiología y el desarrollo del crecimiento del jitomate.	(Prenger & Ling, 2001)
	Para la mayoría de los cultivos de invernaderos, la fotosíntesis y la	

[0.4-0.79]	absorción de nutrientes son óptimas en este rango.	(Omafra, 2005)
0.35-1.0	Mejor germinación de semillas, ideal para el buen desarrollo del cultivo de jitomate. Se efficientiza el movimiento de minerales de savia en las plantas y una mejor conductancia estomática.	(Shamshiri et al., 2018)
0.47-1.1	Ideal para tasa de fotosíntesis y la conductancia estomática, así como una mejor intercambio de CO ₂ , se mejora el potencial hidráulico de las hojas, regulación de la presión osmótica.	(Du et al., 2018)
[0.8-1.4]	Aumento en la conductancia estomática durante el día, mejor tasa de fotosíntesis neta, aumento en la biomasa, mayor rendimiento y calidad de frutos.	(Lu et al., 2015)
[0.36-1.43]	Se mejoró la apertura estomática y se disminuyó el uso de agua durante el crecimiento en cultivo de jitomate.	(Arve et al., 2017a)
[0.7-1.5]	Se tiene mejor intercambio de gases y conductancia estomática, mejora la regulación del ácido abscísico foliar y la transpiración diurna, eficiencia del uso de agua es ideal.	(McAdam et al., 2016; McAdam & Brodribb, 2016)
[0.8-1.5]	Ideal para mejorar el estrés hídrico de la planta y aumento del área de intercambio de CO ₂ en la hoja, mejorando la tasa de fotosíntesis y un mejor aprovechamiento del agua de riego.	(Jiao et al., 2019)
[0.3-1.6]	Aumento de la conductancia estomática y mayor número de células, así como un aumento en el tamaño de las hojas.	(Carins Murphy et al., 2014)

1.5	Disminución de la pudrición de flores finales y agrietamiento de los frutos, así como un aumento del peso en los frutos.	(Bertin et al., 2000)
[0.75-1.5]	Aumento de la conductancia estomática y el mesófolio de las hojas, de igual manera se mejora la conductancia hidráulica y la fotorrespiración.	(Qiu et al., 2017)
1.6	Disminución en la tasa de pérdida de agua y el estrés hídrico de la planta se mantiene en equilibrio hídrico, mejora la producción de biomasa y frutos, desde la perspectiva fisiológica, se reduce la transpiración del cultivo.	(Zhang et al., 2017a)

Otras investigaciones realizadas por (Massmann et al., 2019), la evapotranspiración (*ET*) del cultivo está directamente relacionada con el déficit de presión de vapor atmosférico, estos autores describen que al aumentar el DPV la evapotranspiración disminuye, la disminución de la *ET* se debe principalmente por el cierre parcial de los poros estomáticos del cultivo. De acuerdo a los resultados reportados por los diversos autores se puede observar (Cuadro 1) claramente la importancia de controlar del *DPV_c* en un rango ideal.

2.8 Referencias

- Ahemd, H. A., Al-Faraj, A. A., & Abdel-Ghany, A. M. (2016). Shading greenhouses to improve the microclimate, energy and water saving in hot regions: A review. *Scientia Horticulturae*, 201, 36–45.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.01.030>
- Al-Helal, I. M., & Abdel-Ghany, A. M. (2010). Responses of plastic shading nets to global and diffuse PAR transfer: Optical properties and evaluation. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 57(2), 125–132.
<https://doi.org/10.1016/j.njas.2010.02.002>

- Al-Helal, Ibrahim M. (2007). Effects of Ventilation Rate on the Environment. *Applied Engineering in Agriculture*, 23(2), 221–230.
- Amer, O., Boukhanouf, R., & Ibrahim, H. G. (2015). A Review of Evaporative Cooling Technologies. *International Journal of Environmental Science and Development*, 6(2), 111–117. <https://doi.org/10.7763/ijesd.2015.v6.571>
- Arbel, A., Barak, M., & Shklyar, A. (2003). Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses. *Biosystems Engineering*, 84(1), 45–55. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(02\)00216-7](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(02)00216-7)
- Arbel, A., Yekutieli, O., & Barak, M. (1999). Performance of a fog system for cooling greenhouses. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 72(2), 129–136. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0351>
- Arellano, D. L., & Valera, M. (2011). *Natural and Forced Ventilation in Almeria-Type Greenhouse and its Relationship to Tomato Yield VENTILACIÓN NATURAL Y FORZADA DE INVERNADEROS TIPO ALMERÍA*. January 2018.
- Arellano García, M., Valera Martínez, D., Urrestarazu Gavilán, M., García Garza, S., Sánchez Salas, J., & Soria Ruiz, J. (2006). Estudio del microclima en dos subtipos de invernaderos Almería. *Agricultura Técnica En México*, 32(2), 225–234.
- Argus, 2009. Controls. (2009). *Understanding and Using Firewalls*. January.
- Arve, L. E., Kruse, O. M. O., Tanino, K. K., Olsen, J. E., Futsæther, C., & Torre, S. (2017a). Daily changes in VPD during leaf development in high air humidity increase the stomatal responsiveness to darkness and dry air. *Journal of Plant Physiology*, 211, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.011>
- Arve, L. E., Kruse, O. M. O., Tanino, K. K., Olsen, J. E., Futsæther, C., & Torre, S. (2017b). Daily changes in VPD during leaf development in high air

humidity increase the stomatal responsiveness to darkness and dry air.

Journal of Plant Physiology, 211, 63–69.

<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.011>

Arve, L. E., Kruse, O. M. O., Tanino, K. K., Olsen, J. E., Futsæther, C., & Torre, S. (2017c). Daily changes in VPD during leaf development in high air humidity increase the stomatal responsiveness to darkness and dry air.

Journal of Plant Physiology, 211, 63–69.

<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.011>

Arve, L. E., Terfa, M. T., Gislerød, H. R., Olsen, J. E., & Torre, S. (2013). High relative air humidity and continuous light reduce stomata functionality by affecting the ABA regulation in rose leaves. *Plant, Cell and Environment*, 36(2), 382–392. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02580.x>

ASHARAE HANDBOOK, 2017. (2017). *ASHARAE HANDBOOK, 2017* (A. H. Fundamentals (ed.); I-P Editio). 2017.

Bakker, J. C. (1991). Effects of humidity on stomatal density and its relation to leaf conductance. *Scientia Horticulturae*, 48(3–4), 205–212.

[https://doi.org/10.1016/0304-4238\(91\)90128-L](https://doi.org/10.1016/0304-4238(91)90128-L)

Bertin, N., Guichard, S., Leonardi, C., Longuenesse, J. J., Langlois, D., & Navez, B. (2000). Seasonal evolution of the quality of fresh glasshouse tomatoes under Mediterranean conditions, as affected by air vapour pressure deficit and plant fruit load. *Annals of Botany*, 85(6), 741–750.

<https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1123>

Bian, Z., Zhang, X., Wang, Y., & Lu, C. (2019). Improving drought tolerance by altering the photosynthetic rate and stomatal aperture via green light in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings under drought conditions.

Environmental and Experimental Botany, 167(April), 103844.

<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103844>

- Carins Murphy, M. R., Jordan, G. J., & Brodribb, T. J. (2014). Acclimation to humidity modifies the link between leaf size and the density of veins and stomata. *Plant, Cell and Environment*, 37(1), 124–131.
<https://doi.org/10.1111/pce.12136>
- Choudary and Monteith. (1986). Implications of stomatal response to saturation deficit for the heat balance of vetative. *Agricultural and Forest Medology*, 36 (1986) 215-225. *Elvevier Science Publishers B.V., Amsterdam-Printed in the Netherlands.*, 36(MD 20771 (U.S.A.)), : pp. 83-94.
- Dell', J. M., Rodríguez, A., & Morales Guevara, D. M. (2017). *Stomatal conductance behavior of two Cuban tomato varieties in field conditions and limited irrigation*. 38(2), 137–144. <http://ediciones.inca.edu.cu>
- Devi, M. J., & Reddy, V. R. (2018). Transpiration response of cotton to vapor pressure deficit and its relationship with stomatal traits. *Frontiers in Plant Science*, 871(October), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01572>
- Drake, P. L., Froend, R. H., & Franks, P. J. (2013). Smaller, faster stomata: Scaling of stomatal size, rate of response, and stomatal conductance. *Journal of Experimental Botany*, 64(2), 495–505.
<https://doi.org/10.1093/jxb/ers347>
- Du, Q., Xing, G., Jiao, X., Song, X., & Li, J. (2018). Stomatal responses to long-term high vapor pressure deficits mediated most limitation of photosynthesis in tomatoes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40(8), 0.
<https://doi.org/10.1007/s11738-018-2723-7>
- Fakhrabadi, F., & Kowsary, F. (2016). Optimal design of a regenerative heat and mass exchanger for indirect evaporative cooling. *Applied Thermal Engineering*, 102, 1384–1394.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.115>
- Fanourakis, D., Aliniaiefard, S., Sellin, A., Giday, H., Körner, O., Rezaei Nejad,

- A., Delis, C., Bouranis, D., Koubouris, G., Kambourakis, E., Nikoloudakis, N., & Tsaniklidis, G. (2020). Stomatal behavior following mid- or long-term exposure to high relative air humidity: A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 153, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.05.024>
- Fanourakis, D., Bouranis, D., Giday, H., Carvalho, D. R. A., Rezaei Nejad, A., & Ottosen, C. O. (2016). Improving stomatal functioning at elevated growth air humidity: A review. *Journal of Plant Physiology*, 207, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.10.003>
- Fernandes-Silva, A. A., López-Bernal, Á., Ferreira, T. C., & Villalobos, F. J. (2016). Leaf water relations and gas exchange response to water deficit of olive (cv. Cobrançosa) in field grown conditions in Portugal. *Plant and Soil*, 402(1–2), 191–209. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2786-9>
- Fitz-Rodríguez, E., Kacira, M., Guerrero, F. V., Kubota, C., Giacomelli, G., Linker, R., & Arbel, A. (2010). Dynamic response and environmental uniformity of a naturally ventilated greenhouse cooled with a variable-pressure fogging system. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2010, ASABE 2010*, 6(10), 4727–4742. <https://doi.org/10.13031/2013.29906>
- Francesconi, S., & Balestra, G. M. (2020). The modulation of stomatal conductance and photosynthetic parameters is involved in Fusarium head blight resistance in wheat. *PLoS ONE*, 15(6 June), 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235482>
- Fuchs, M., & Stanghellini, C. (2018). The functional dependence of canopy conductance on water vapor pressure deficit revisited. *International Journal of Biometeorology*, 62(7), 1211–1220. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1524-4>
- Gates, R. S., & Mach, C. A. (2017). Vapor Pressure Deficit Control Algorithm for Plant Studies. *IFAC Proceedings Volumes*, 33(29), 129–134.

[https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)36764-2](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)36764-2)

- Gates, R. S., Zolnier, S., & Buxton, J. (1998). Vapor Pressure Deficit Control Strategies for Plant Production. *IFAC Proceedings Volumes*, 31(12), 271–276. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)36076-7](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)36076-7)
- Gázquez, J. C., López, J. C., Baeza, E., Pérez-Parra, J. J., Fernández, M. D., Baille, A., & González-Real, M. (2008). Effects of vapour pressure deficit and radiation on the transpiration rate of a greenhouse sweet pepper crop. *Acta Horticulturae*, 797, 259–266.
- Ghani, S., Bakochristou, F., ElBialy, E. M. A. A., Gamaledin, S. M. A., Rashwan, M. M., Abdelhalim, A. M., & Ismail, S. M. (2019). Design challenges of agricultural greenhouses in hot and arid environments – A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12(1), 48–70. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.09.004>
- Ghoulem, M., El Moueddeb, K., Nehdi, E., Boukhanouf, R., & Kaiser Calautit, J. (2019). Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status. *Biosystems Engineering*, 183, 121–150. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.016>
- Gil-Marín, J. A., Rodríguez, R., Cantú, D. J., & Zermeño, A. (2006). Resistencia Estomática , Transpiración Y Potencial Hídrico. *Terra Latinoamericana*, 24(3), 355–365. <http://www.redalyc.org/pdf/573/57311103007.pdf>
- Hahn, F. (2011). Manejo automático de malla sombra y del riego en un invernadero con tomates. *Scientia Agropecuaria*, 2(1), 31–37.
- Handarto; Makio Hayashi; Katsumi Ohyama; Hiromi Toida; Eiji Goto and Toyoki Kozai. (2006). *Developing System Control Operation Logic for a High-Pressure Ventilated Fog Cooling Greenhouse for a Naturally Department of Bioproduction Science , Faculty of Horticulture , Chiba University ,*

greenhouse has been developed . A suitable duration of the f. 44(1), 1–9.

- Harel, D., Fadida, H., Slepoy, A., Gantz, S., & Shilo, K. (2014). The Effect of Mean Daily Temperature and Relative Humidity on Pollen, Fruit Set and Yield of Tomato Grown in Commercial Protected Cultivation. *Agronomy*, 4(1), 167–177. <https://doi.org/10.3390/agronomy4010167>
- Heidarinejad, G., Bozorgmehr, M., Delfani, S., & Esmaeelian, J. (2009). Experimental investigation of two-stage indirect/direct evaporative cooling system in various climatic conditions. *Building and Environment*, 44(10), 2073–2079. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.017>
- Ho, L. C., & White, P. J. (2005). A cellular hypothesis for the induction of blossom-end rot in tomato fruit. *Annals of Botany*, 95(4), 571–581. <https://doi.org/10.1093/aob/mci065>
- Ishii, M., Okushima, L., Moriyama, H., & Sase, S. (2014). An overview of natural ventilation, airflow, evaporative cooling and heat pump heating in greenhouses under mild climatic conditions. *Acta Horticulturae*, 1037, 493–500. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.61>
- Ishii, M., Sase, S., Moriyama, H., Kurata, K., Ikeguchi, A., Kubota, C., Hayashi, M., Sabeh, N., Romero, P., & Giacomelli, G. A. (2006). The effect of evaporative fog cooling in a naturally ventilated greenhouse on air and leaf temperature, relative humidity and water use in a semiarid climate. *Acta Horticulturae*, 719(2005), 491–498. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.56>
- Jiao, X. C., Song, X. M., Zhang, D. L., Du, Q. J., & Li, J. M. (2019). Coordination between vapor pressure deficit and CO₂ on the regulation of photosynthesis and productivity in greenhouse tomato production. *Scientific Reports*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45232-w>
- Katsoulas, N., Baille, A., & Kittas, C. (2001). Effect of misting on transpiration

- and conductances of a greenhouse rose canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106(3), 233–247. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00211-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00211-2)
- Katsoulas, N., Savvas, D., Tsirogiannis, I., Merkouris, O., & Kittas, C. (2009). Response of an eggplant crop grown under Mediterranean summer conditions to greenhouse fog cooling. *Scientia Horticulturae*, 123(1), 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.08.004>
- Kittas, Constantinos. Bartzanas, Thomas. Katsoula, N. (2013). Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops: Principles for Mediterranean Climate Areas. In *Fao* (Issue March 2020).
- Kittas, C., & Bartzanas, T. (2007). Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations. *Building and Environment*, 42(10), 3774–3784. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.020>
- Kittas, C., Boulard, T., & Papadakis, G. (1997). Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: Sensitivity to temperature and wind effects. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 40(2), 415–425. <https://doi.org/10.13031/2013.21268>
- Lawson, T., & Vialet-Chabrand, S. (2019). Speedy stomata, photosynthesis and plant water use efficiency. *New Phytologist*, 221(1), 93–98. <https://doi.org/10.1111/nph.15330>
- Leyva, R., Constán-Aguilar, C., Sánchez-Rodríguez, E., Romero-Gámez, M., & Soriano, T. (2015). Cooling systems in screenhouses: Effect on microclimate, productivity and plant response in a tomato crop. *Biosystems Engineering*, 129, 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.09.018>
- Li, H., Issaka, Z., Jiang, Y., Tang, P., & Chen, C. (2019). Overview of emerging

- technologies in sprinkler irrigation to optimize crop production. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(3), 1–9.
<https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191203.4310>
- Li, Q., Liu, Y., Tian, S., Liang, Z., Li, S., Li, Y., Wei, M., & Zhang, D. (2019). Effect of supplemental lighting on water transport, photosynthetic carbon gain and water use efficiency in greenhouse tomato. *Scientia Horticulturae*, 256(April), 108630. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108630>
- Li, S., & Willits, D. H. (2008). Comparing low-pressure and high-pressure fogging systems in naturally ventilated greenhouses. *Biosystems Engineering*, 101(1), 69–77.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.06.004>
- Li, Shuhai, Willits, D. H., & Yunker, C. (2005). Experimental study of fogging system in naturally ventilated greenhouses. *2005 ASAE Annual International Meeting*, 393–400. <https://doi.org/10.13031/2013.19910>
- Linker, R., Kacira, M., & Arbel, A. (2011). Robust climate control of a greenhouse equipped with variable-speed fans and a variable-pressure fogging system. *Biosystems Engineering*, 110(2), 153–167.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.07.010>
- López-Cruz, I. L., Ruíz-García, A., & Hernández-Larragoiti, L. (2014). Neuro-fuzzy modeling of transpiration rates of greenhouse tomatoes under temperate weather conditions of central Mexico. *Acta Horticulturae*, 1037, 345–352. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.42>
- Lu, N., Nukaya, T., Kamimura, T., Zhang, D., Kurimoto, I., Takagaki, M., Maruo, T., Kozai, T., & Yamori, W. (2015). Control of vapor pressure deficit (VPD) in greenhouse enhanced tomato growth and productivity during the winter season. *Scientia Horticulturae*, 197, 17–23.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.001>

- Markley, H.P. Allen, R. G. (2004). Sprinkle & Trickle Irrigation Lecture Notes. *Utah State University , USA 2004.*
- Márquez Quiroz, C., Robledo Torres, V., Benavides Mendoza, A., Vázquez Badillo, M., Cruz Lázaro, E., Estrada Botello, M., & López Espinosa, S. (2014). Uso de mallas sombra: una alternativa para la producción de tomate cherry. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 1(2), 175–180. <https://doi.org/10.19136/era.a1n2.165>
- Massmann, A., Gentine, P., & Lin, C. (2019). When Does Vapor Pressure Deficit Drive or Reduce Evapotranspiration? *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(10), 3305–3320. <https://doi.org/10.1029/2019MS001790>
- McAdam, S. A. M., & Brodribb, T. J. (2015). The evolution of mechanisms driving the stomatal response to vapor pressure deficit. *Plant Physiology*, 167(3), 833–843. <https://doi.org/10.1104/pp.114.252940>
- McAdam, S. A. M., & Brodribb, T. J. (2016). Linking turgor with ABA biosynthesis: Implications for stomatal responses to vapor pressure deficit across land plants. *Plant Physiology*, 171(3), 2008–2016. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00380>
- McAdam, S. A. M., Sussmilch, F. C., & Brodribb, T. J. (2016). Stomatal responses to vapour pressure deficit are regulated by high speed gene expression in angiosperms. *Plant Cell and Environment*, 39(3), 485–491. <https://doi.org/10.1111/pce.12633>
- Medrano-Cortes; (1999). *Universidad politécnica de madrid escuela técnica superior de ingenieros agrónomos gestión de riego en cultivo de pepino “.*
- Misra, D., & Ghosh, S. (2018). Evaporative cooling technologies for greenhouses: A comprehensive review. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 20(1), 1–15.
- Mutwiwa, U. N., Tantau, H. J., & Salokhe, V. M. (2006). Response of tomato

plants to natural ventilation and evaporative cooling methods. *Acta Horticulturae*, 719, 447–454.

<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.50>

Nieves García, V., Van der Valk, O., & Elings, A. (2011). Mexican protected horticulture: Production and market of Mexican protected horticulture described and analysed. *Wageningen UR Greenhouse Horticulture, Rapport GT*, 108.

O’Carrigan, A., Hinde, E., Lu, N., Xu, X. Q., Duan, H., Huang, G., Mak, M., Bellotti, B., & Chen, Z. H. (2014). Effects of light irradiance on stomatal regulation and growth of tomato. *Environmental and Experimental Botany*, 98, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.10.007>

Pahuja, R., Verma, H. K., & Uddin, M. (2015). Implementation of greenhouse climate control simulator based on dynamic model and vapor pressure deficit controller. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 8(4), 273–288. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2015.04.009>

Perdigones, A., García, J. L., Romero, A., Rodríguez, A., Luna, L., Raposo, C., & de la Plaza, S. (2008). Cooling strategies for greenhouses in summer: Control of fogging by pulse width modulation. *Biosystems Engineering*, 99(4), 573–586. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.01.001>

Prenger, J. J., & Ling, P. P. (2001). Greenhouse condensation control: understanding and using vapor pressure deficit (VPD). *The Ohio State University Extension*, page 3, 4.

Qiu, C., Ethier, G., Pepin, S., Dubé, P., Desjardins, Y., & Gosselin, A. (2017). Persistent negative temperature response of mesophyll conductance in red raspberry (*Rubus idaeus* L.) leaves under both high and low vapour pressure deficits: a role for abscisic acid? *Plant Cell and Environment*, 40(9), 1940–1959. <https://doi.org/10.1111/pce.12997>

- Romantchik, E., Ríos, E., Sánchez, E., López, I., & Sánchez, J. R. (2017). Determination of energy to be supplied by photovoltaic systems for fan-pad systems in cooling process of greenhouses. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1161–1168. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.011>
- Rosales-Vicelis. (2016). Desarrollo de un sistema de monitoreo de déficit de presión de vapor encultivo de invernadero. *Tesis Profesional*, 76.
- Sabeh, N. C., Giacomelli, G. A., & Kubota, C. (2007). Water use by greenhouse evaporative cooling systems in a semi-arid climate. *2007 ASABE Annual International Meeting, Technical Papers*, 8 BOOK(07).
- Sase, S., Ishii, M., Moriyama, H., Kurata, K., Kubota, C., Hayashi, M., Sabeh, N., Romero, P., & Giacomelli, G. A. (2007). Transpiration of tomato plant canopy and water use for a fog cooled greenhouse in semiarid climate. *Acta Horticulturae*, 761(1990), 63–69. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.761.6>
- Sethi, V. P., & Sharma, S. K. (2007). Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, 81(12), 1447–1459. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.03.004>
- Shamshiri, R. (2013). A Review of Greenhouse Climate Control and Automation Systems in Tropical Regions. *Journal of Agricultural Science and Applications*, 02(03), 175–182. <https://doi.org/10.14511/jasa.2013.020307>
- Shamshiri, R., Ahmad, D., Wan Ismail, W. I., Man, H. C., Zakaria, A. J., Van Beveren, P., & Yamin, M. (2016). Comparative evaluation of naturally ventilated screenhouse and evaporative cooled greenhouse based on optimal vapor pressure deficit. *2016 American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, ASABE 2016*, 2454215, 2–11. <https://doi.org/10.13031/aim.20162454215>
- Shamshiri, Radmon Ramin., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C.,

- & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics*, 32(2), 287–302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- Shamshiri, Redmond R., Mahadi, M. R., Thorp, K. R., Ismail, W. I. W., Ahmad, D., & Man, H. C. (2017). Adaptive Management Framework for Evaluating and Adjusting Microclimate Parameters in Tropical Greenhouse Crop Production Systems. *Plant Engineering*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69972>
- Shamshiri, Redmond Ramin, Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics*, 32(2), 287–302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- Sinclair, T. R., Devi, J., Shekoofa, A., Choudhary, S., Sadok, W., Vadez, V., Riar, M., & Rufty, T. (2017). Limited-transpiration response to high vapor pressure deficit in crop species. *Plant Science*, 260, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.04.007>
- Singh, M. C., Singh, J. P., & Singh, K. G. (2018). Development of mathematical models for predicting vapour pressure deficit inside a greenhouse from internal and external climate. *Journal of Agrometeorology*, 20(3), 238–241.
- Sorensen, H. K., Fanourakis, D., Tsaniklidis, G., Bouranis, D., Nejad, A. R., & Ottosen, C. O. (2020). Using artificial lighting based on electricity price without a negative impact on growth, visual quality or stomatal closing response in *Passiflora*. *Scientia Horticulturae*, 267(December 2019), 109354. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109354>
- Stanghellini, C. (1987). *Transpiration of greenhouse crops an aid to climate management*. 150.

- Steiner, A. A. (1961). A Universal Method for Preparing Nutrient Solutions of a Certain Desired Composition. *Plant and Soil* XV, VI. 15, 134–154.
<https://edepot.wur.nl/309364>
- Streck-Nereu. A. (2003). Stomatal Response To Water Vapor Pressure Deficit: an Unsolved Issue. *Revista Brasileira de Agrociência*, 9(4), 317–322.
<https://doi.org/10.18539/cast.v9i4.649>
- Toida, H., Ohyama, K., Kozai, T., Handarto, & Hayashi, M. (2006). A method for measuring dry-bulb temperatures during the operation of a fog system for greenhouse cooling. *Biosystems Engineering*, 93(3), 347–351.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.12.004>
- Tonetto, S., McElrone, A. J., Shackel, K. A., & Mitcham, E. J. (2014). Calcium partitioning and allocation and blossom-end rot development in tomato plants in response to whole-plant and fruit-specific abscisic acid treatments. *Journal of Experimental Botany*, 65(1), 235–247.
<https://doi.org/10.1093/jxb/ert364>
- Villarreal-Guerrero, F., Flores-Velazquez, J., & Kacira, M. (2014). Comparative performance of a greenhouse cooling strategy with natural ventilation and fogging under different outside climates. *Acta Horticulturae*, 1037, 57–64.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.3>
- Villarreal-Guerrero, Federico, Kacira, M., Fitz-Rodríguez, E., Linker, R., Kubota, C., Giacomelli, G. A., & Arbel, A. (2012). Simulated performance of a greenhouse cooling control strategy with natural ventilation and fog cooling. *Biosystems Engineering*, 111(2), 217–228.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.11.015>
- Viuda-Martos, M., Sanchez-Zapata, E., Sayas-Barberá, E., Sendra, E., Pérez-Álvarez, J. A., & Fernández-López, J. (2014). Tomato and Tomato Byproducts. Human Health Benefits of Lycopene and Its Application to Meat Products: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(8),

1032–1049. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.623799>

- Von Zabeltitz, C. (2011). Integrated Greenhouse Systems For Mild
Climates: Climate conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate
Control. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Yaaran, A., Negin, B., & Moshelion, M. (2019). Role of guard-cell ABA in
determining steady-state stomatal aperture and prompt vapor-pressure-
deficit response. *Plant Science*, 281(August 2018), 31–40.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.12.027>
- Zakari, M. D., Abubakar, Y. S., Muhammad, Y. B., Shanono, N. J., Nasidi, N. M.,
Abubakar, M. S., Muhammad, A. I., Lawan, I., & Ahmad, R. K. (2016).
Design and construction of an evaporative cooling system for the storage of
fresh tomato. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(4),
2340–2348.
- Zhang D., Zhang Z., Li J., Chang Y., Du Q., P. T. (2017). Vapour pressure deficit
control in relation to water transport and water productivity in greenhouse
tomato production during summer. *Scientific RepoRts*, 7, 11.
<https://doi.org/10.1038/srep43461>
- Zhang, D., Du, Q., Zhang, Z., Jiao, X., Song, X., & Li, J. (2017a). Vapour
pressure deficit control in relation to water transport and water productivity
in greenhouse tomato production during summer. *Scientific Reports*, 7.
<https://doi.org/10.1038/srep43461>
- Zhang, D., Du, Q., Zhang, Z., Jiao, X., Song, X., & Li, J. (2017b). Vapour
pressure deficit control in relation to water transport and water productivity
in greenhouse tomato production during summer. *Scientific Reports*,
7(August 2016), 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep43461>
- Zhang, D., Zhang, Z., Li, J., Chang, Y., Du, Q., & Pan, T. (2015a). Regulation of
vapor pressure deficit by greenhouse micro-fog systems improved growth

and productivity of tomato via enhancing photosynthesis during summer season. *PLoS ONE*, 10(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133919>

Zhang, D., Zhang, Z., Li, J., Chang, Y., Du, Q., & Pan, T. (2015b). Regulation of Vapor Pressure Deficit by Greenhouse Micro-Fog Systems Improved Growth and Productivity of Tomato via Enhancing Photosynthesis during Summer Season. *PLOS ONE*, 10(7), e0133919. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133919>

3.- Control simple (ON/OFF) del déficit de presión de vapor (DPV_c) para cultivos en invernaderos con sistema de nebulización

A simple ON-OFF control of vapor pressure deficit (VPD_c) in greenhouse crops

José Orbelin Gutiérrez-Hernández¹ (ORCID:0000-0001-7678-310X)

Efrén Fitz-Rodríguez^{1*} (ORCID: 0000-0002-9212-8719)

¹Universidad Autónoma Chapingo, en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo México, C.P. 56230, MÉXICO.

* Autor para correspondencia: EFITZ@chapingo.mx

Resumen

Con el control del déficit de presión de vapor de cultivos (DPV_c) en rangos óptimos se obtienen diversos beneficios, incrementar la fotosíntesis y en consecuencia la productividad y la calidad del cultivo, así como también la reducción del estrés hídrico excesivo o la prevención de enfermedades causadas por la condensación en el cultivo. Para poder controlar el VPD_c es necesario tener un sistema que permita controlar el contenido de humedad en el aire, ya sea agregándola o removiéndola del ambiente. Por otro lado, también es necesario tener un sistema que incluya sensores para medir la temperatura y humedad relativa del aire y la temperatura del follaje del cultivo. Para desarrollar e implementar un control de DPV_c fue necesario caracterizar el sistema de nebulización, así como determinar un pequeño rango de apertura de ventilas (10/50), combinación ventilación-nebulización, para obtener las condiciones idóneas del cultivo, minimizando el consumo de agua y energía (pulso) y condiciones de la T_a , HR , T_h y DPV_c óptimo de los cultivos. En esta investigación se desarrolló un control de DPV_c de fácil implementación para cultivos en invernadero como lo es el control ON/OFF dicho control funciona adecuadamente, se mejoró las condiciones ambientales

resultando idóneos para los cultivos. El sistema de control de DPV_c trabajó a una tasa de nebulización constante de $0.15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (8.27 MPa), en promedio el control mantuvo un DPV_c $0.99 \pm 0.2 \text{ kPa}$ con (setpoint de 1.1 kPa), la humedad relativa en 60.06 % y la temperatura del aire a 24.8°C , T_h a 23.45°C . Con el sistema de control implementado se mejoró considerablemente la conductancia estomática (g_s) en un 54.5%.

Palabras claves: Déficit de Presión de Vapor, Temperatura, Ventilación, Déficit de Humedad, Temperatura de cultivo, Conductancia estomática.

3.1 INTRODUCCIÓN

El **jitomate** (*Lycopersicon esculentum* L.) es una de las hortalizas de invernadero más cultivadas en el mundo, y de las más demandadas por el mercado de productos frescos y las industrias de procesamiento (Viuda-Martos et al., 2014), para México el principal cultivo producido bajo invernadero es el jitomate con un 68% de la producción total (SIAP 2019). De acuerdo a la SIAP (2019), el nivel tecnológico de los invernaderos en México es de baja-mediana tecnología. Es por eso la necesidad de automatizar los invernaderos en México con un sistema de control simple (ON/OFF) de DPV_c , para satisfacer las demandas de los mercados de productos frescos producido en invernadero. Los beneficio manejo de DPV_c en los cultivos de invernadero son diversos como, medir la amenaza de enfermedades (Prenger & Ling, 2001) y el potencial de condensación (Argus, 2009), también se puede mejorar la resistencia estomática del cultivo, aumentando de la tasa de fotosíntesis neta, rendimiento y mejor calidad de fruto (Zhang et al., 2017).

Debido a que el efecto de la radiación se incorpora en la temperatura de las hojas (T_h), es preferible utilizar el DPV_c para realizar el control (Bate y Bubenheim,

1994). sugieren realizar el control del DPV_c en los rangos de 0.8 a 1.2 kPa (Lu et al., 2015), dado que en este rango se logra reducir el consumo de agua y aumentar las tasas de cambio de gases CO_2 , entre el cultivo y el aire.

Otros de los benéficos de mantener en el rango óptimo de DPV_c , en un cultivo de jitomate, se reduce efectivamente el estrés hídrico provocado por altas temperaturas del aire y un bajo contenido de vapor de agua en el aire, favoreciendo el estado fisiológico del cultivo. Algunas respuestas morfológicas, incluyen el alargamiento de las hojas y tallo, contribuyendo a una elevación sustancial del área final de la hoja y la biomasa del brote, así como también el crecimiento de la planta (Arve et al., 2017b; Zhang et al., 2015b).

Para controlar el DPV_c , es importante mencionar como es el comportamiento durante el día y la noche, en las noches el DPV_c se ve afectado por las bajas temperatura y por el incremento de la humedad relativa por tal motivo es necesario calentar y ventilar (Prenger & Ling, 2001), por otro lado, en el día el DPV_c es afectado por las altas temperaturas y la baja humedad por lo cual se necesita enfriar (Toida et al., 2006), en la actualidad existen diferentes métodos para realizar este proceso como lo es la ventilación pasiva, ventilación mecánica, pared húmeda, nebulización (Misra & Ghosh, 2018), siendo los sistema de nebulización más eficientes para proporcionar condiciones climáticas adecuadas en las regiones cálidas y secas (Kittas et al., 2013), con el sistema de nebulización se reduce las fluctuaciones de humedad relativa y la temperatura del aire ,principalmente durante las horas de mayor carga solar (10:00 a16:30), favoreciendo un clima moderado, mejorando el desarrollo del cultivo (Shamshiri et al., 2018; Zhang et al., 2015).

Este sistema tiene la característica de pulverizar el agua en pequeñas gotas entre los 2-60 μ m y de homogenizar el DPV_c en toda la in situ (Arbel et al., 1999). Otros autores como (Shuhai Li et al., 2005), han descrito que es unos de los sistemas que ha dado mejores resultados para prevenir la deshidratación de las hojas en los cultivos en invernaderos, también porque es uno de los sistemas más

efectivos para mantener en estado favorable en la concentración de agua en las hojas del cultivo en periodos de fuerte demanda de vaporación (Zakari et al., 2016).

La creación de un mejorado mediante el control de déficit de presión de vapor de cultivo-aire (DPV_{c-a}) con sistema de nebulización, es ahora posible, con la implementación de sensores infrarrojos para la medición de temperatura del follaje del cultivo, y sensores para medir las condiciones ambientales. De manera alternativas puede implementar el control del déficit de presión de vapor de aire (DPV_a), aunque hay una sobreestimación del valor real en referencia con la planta (Gates et al., 1988). Aunque el DPV_a atmosférico ha sido ampliamente reconocido como la fuerza impulsora de la evaporación para el transporte de agua, también se le asocia con el potencial para reducir el consumo de agua de las plantas y mejorar la productividad del agua mediante la regulación de DPV_a (Zhang et al., 2017). Por tal motivo, se propone implementar un control simple ON-OFF del DPV_c en invernaderos de bajo-mediano nivel tecnológico con un sistema de nebulización de alta presión y con sistemas de ventilación natural.

3.2 Materiales y Métodos

3.2.1 Área de estudio

El sistema se implementó en un invernadero de baja tecnología de 300 m² (10x30 m de largo y ancho) con cubierta de plástico y con ventilación natural (provisto de ventilas laterales y cenitales), con una orientación norte-sur, ubicado en el laboratorio de biosistemas de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México (19°29'28.8 N, 98°53'36.9 O).

Para dimensionar el sistema de nebulización de alta presión del sistema control de DPV_c para área de estudio, se realizó un análisis de datos climáticos en la ubicación del invernadero. De acuerdo con Von Zabeltitz (2011) y con el climograma construido para la región (Figura 3a) los requerimientos de enfriamiento suceden en los meses de abril a junio, cuando los promedios diarios

de temperatura del aire exceden de 22°C, y en los meses de diciembre a febrero, cuando el promedio diario de la temperatura del aire está por debajo de 12°C, se requeriría de algún sistema de calefacción. Durante el resto del año los invernaderos se pueden operar con solo la ventilación natural para lograr condiciones adecuadas de temperatura del aire. Sin embargo, cuando se analiza la humedad en el ambiente, como se observa en la Figura 3b, es necesario humidificar en los meses de diciembre a mayo, debido a que se encuentra por debajo de los rangos (55-65%) recomendados por Von Zabeltitz, (2011), mientras que de agosto a octubre se necesita extraer el exceso de humedad con algún sistema de deshumidificación, para el resto del año se puede trabajar con ventilación natural.

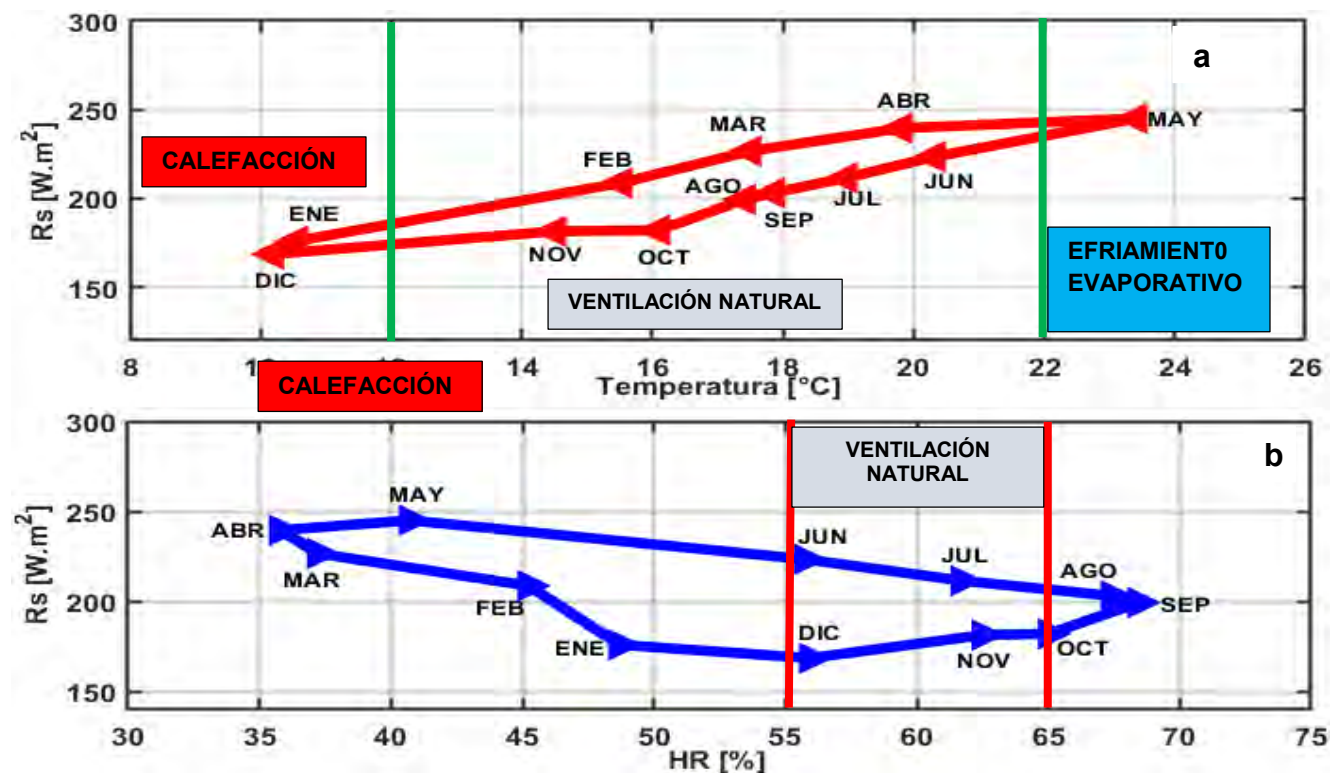


Figura 3. Temperatura del aire promedio mensual (Figura 1a), promedio mensual de la Humedad relativa del ambiente (Figura 3b).

Durante la evaluación del sistema de control de VPD_c , se implementó un cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum*) tipo saladette pai-pai trasplantado el 10 de

septiembre de 2019 en sustrato de fibra de coco en bolsas de 20x10x100 cm, a una densidad de 3.5 plantas por metro cuadrado e irrigado con un sistema de fertirriego con una solución nutritiva tipo Steiner (Steiner, 1961), El invernadero se equipó con un sistema de nebulización de alta presión (Lubing, Barnstorf, Germany), el cual está compuesto por un sistema de micro-filtros (20-15-10-5µm), una bomba de 1hp, mangueras y tuberías de acero inoxidable de alta presión, y líneas de distribución con boquillas nebulizadoras), Con fines de flexibilidad en el sistema se instalaron dos líneas de nebulizadores, con 15 boquillas en cada una de las líneas, respectivamente Figura 4.

Las líneas de nebulizadores se instalaron a una altura de 5 metros y pulverizan agua (en gotas de 5-10 µm, dependiendo de la presión de operación). La presión de operación del sistema de nebulización se puede regular de manera manual ajustando una perilla de presión en un rango de [0.76-12.41 MPa. Para determinar la uniformidad de distribución de las nebulizaciones en toda el área del invernadero, se caracterizó el sistema de nebulización midiendo el caudal en cada una de las boquillas bajo diferentes presiones de operación [4.137 5.516, 6.895 y 8.274 MPa] durante un minuto y 4 repeticiones. La uniformidad de gasto de agua dosificado en las dos líneas laterales para cada una de las presiones de operación resultó en el rango de 0.076 a 0.15 g·m⁻²·s⁻¹

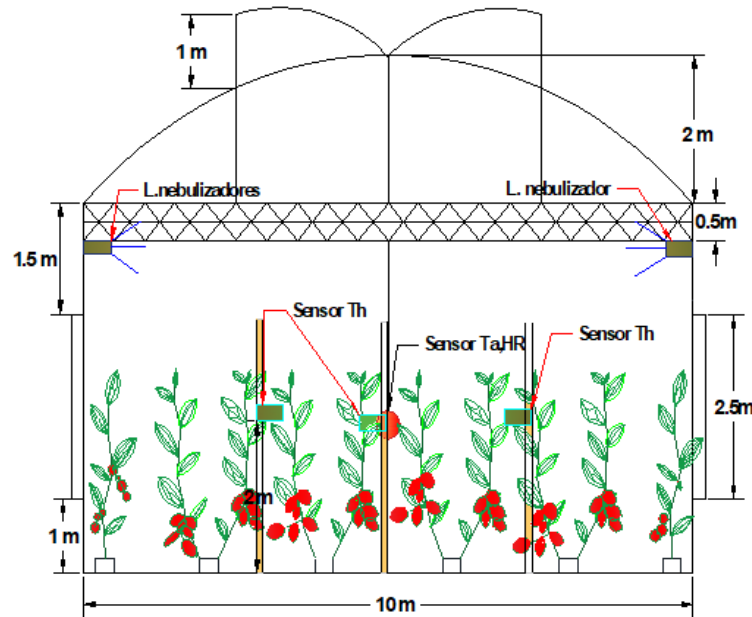


Figura 4. Vista frontal del invernadero experimental, con 30 boquillas para el tratamiento del control de *DPV_c*.

3.2.2 Caracterización del sistema de nebulización.

El sistema de nebulización implementado en el insitu tiene la capacidad de ajustar la presión de operación de manera manual (Figura 5a), para determinar las tasas de nebulización en todo el sistema se midieron los caudales de cada una de las boquillas (Figura 5b), con diferentes presiones de trabajo del sistema de nebulización.

La tasa nebulización es directamente proporcional a la presión de operación del sistema a mayor presión (Figura 5a y 5b), la tasa de nebulización se incrementa [$0.076-0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$], y por lo tanto el enfriamiento del ambiente del invernadero es mayor, lo cual coincide con el estudio reportado por Fitz-Rodríguez et al., (2010), donde analizó la respuesta dinámica y la uniformidad ambiental en un invernadero con ventilación natural y enfriado con un sistema de nebulización de presión variable. Se reporta que, a mayor presión de operación del sistema, la

tasa de nebulización es mayor, produciendo un ambiente más frío y uniforme, en contraste cuando el sistema trabaja a baja presión.

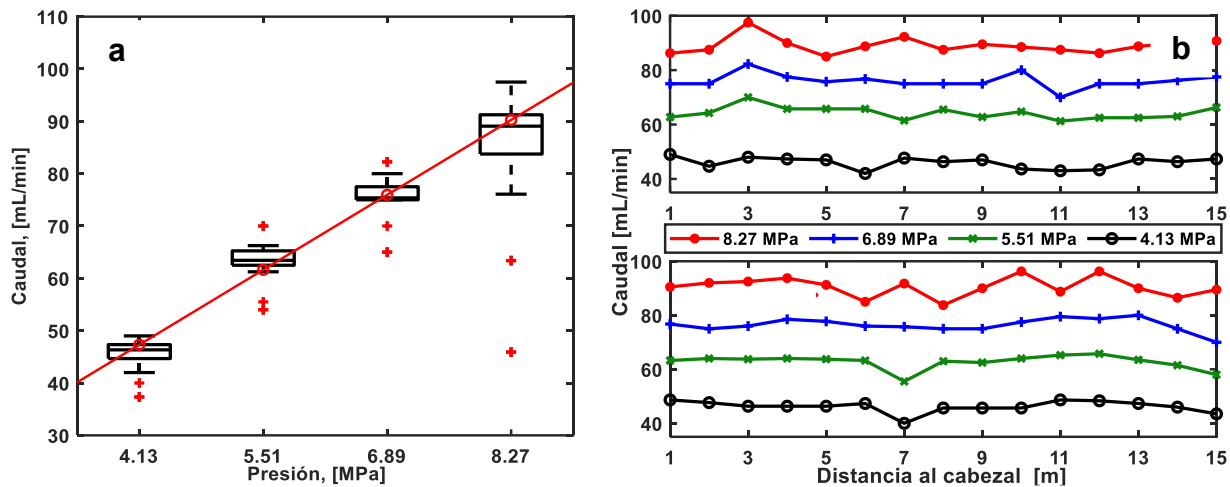


Figura 5. a) Caracterización de las líneas del sistema de nebulización a diferentes presiones de operación. b) Uniformidad del caudal en las boquillas nebulizadoras en las líneas laterales, (Pared este y oeste del invernadero).

3.2.3 Configuración de la ventilación

Uno de los mecanismos más simples de regulación del ambiente de un invernadero son los sistemas de ventilación natural, que pueden incluir ventilas laterales o cenitales (Katsoulas et al., 2009). Con el ajuste del porcentaje de apertura de las ventilas se regula la tasa de ventilación con lo cual, dependiendo de las condiciones externas, se puede desechar la energía o humedad acumulada al interior del invernadero (Villarreal et al., 2012).

Cuando la ventilación natural o forzada no es suficiente para lograr las condiciones idóneas para el cultivo, es necesario agregar algún sistema de enfriamiento artificial (Ishii et al., 2006). Los sistemas de enfriamiento evaporativo (nebulizadores y paredes húmedas) resultan atractivos por su economía, en comparación con sistemas de refrigeración (Sethi & Sharma, 2007), así como para controlar la temperatura y la humedad relativa del ambiente en regiones cálidas y secas (Kittas et al., 2013).

Los sistemas de nebulización resultan atractivos por la uniformidad del ambiente que generan, en comparación con las paredes húmedas, donde puede haber un gradiente horizontal considerable (Misra & Ghosh, 2018).

Dado que control de la variable DPV_c está relacionada no solo con la cantidad de agua que se agrega al ambiente, sino también con los intercambios de aire con el exterior, resultado de la apertura de las ventilas (Sethi & Sharma, 2007).

La operación del sistema de nebulización debe estar en sincronía con el sistema de ventilación, de tal manera que se garantice un efecto duradero de enfriamiento y humidificación en el ambiente para cada pulso de nebulización. Una ventilación excesiva resulta en intercambios de aire muy grandes y el efecto de la nebulización no beneficia al cultivo (Sabeh et al., 2007; Ishii et al, 2014), sino que se estaría desechando el vapor de agua al exterior del invernadero (Villarreal-Guerrero et al., 2012). Por el contrario, si se tiene una ventilación insuficiente resulta en una acumulación de energía y una elevada temperatura y contenido de humedad en el ambiente.

Para reducir los ciclos de operación del sistema de nebulización las tasas de ventilación tienen que ser adecuadas para lograr mantener el DPV_c en los rangos idóneos. Para ello se determinó la apertura de ventilas adecuada con las tasas de nebulización ($0.15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), se desarrollaron experimentos cuyos tratamientos consisten en diferentes combinaciones aperturas de ventilas laterales y cenitales de manera manual, incluyendo 5/50, 10/50, 15/50 y 20/50 de los cuales las combinaciones que resultaron más adecuadas son 10/50 y 15/50 que permitieron mantener el DPV_c estable y con menos gasto de agua por nebulización. Que concuerda con otros estudios (Perdigones et al., 2008; Villarreal-Guerrero et al., 2012), donde también se analizan sistemas de nebulización en invernaderos con ventilación natural.

La duración de los pulsos del sistema de nebulización tiene un comportamiento parabólico con el porcentaje de apertura de las ventilas, incrementándose en las configuraciones de menor y mayor apertura (Figura 6). Para este trabajo la ventila

cenital se mantuvo constante en 50%, por simplicidad se mantuvo a una tasa de nebulización constante de $0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, para disminuir el tiempo de activación de enfriamiento y permitir agregar la mayor cantidad de vapor de agua al ambiente con pulsos de activación cortos. Durante estas mediciones en el invernadero se tenía un cultivo de jitomate con un IAF de 2.13 y 150 días después del trasplante, con una densidad de 3.4 plantas por metro cuadrado.

De manera análoga otros estudios por Arbel et al., (2003) y Linker et al., (2011) reportan que para tener un control preciso de la ventilación, es necesario tener ventilación forzada, y en consecuencia se tiene mejor distribución del agua aplicada en el sistema. De acuerdo con los resultados, aplicar solo ventilación natural durante este periodo de experimentación, no se puede lograr condiciones ambientales de temperatura del aire, humedad relativa y un DPV_c para el desarrollo adecuado de un cultivo de jitomate. En la Cuadro 2 se muestran los valores promedio de las variables ambientales al interior del invernadero, así como variables externas, Radiación solar (Rs), temperatura del aire (T_{a-e}), humedad relativa (HR_e), déficit de presión de vapor del aire (DPV_a) y la velocidad del viento ($V.V$), aplicando diferentes configuraciones de apertura en las ventilas laterales.

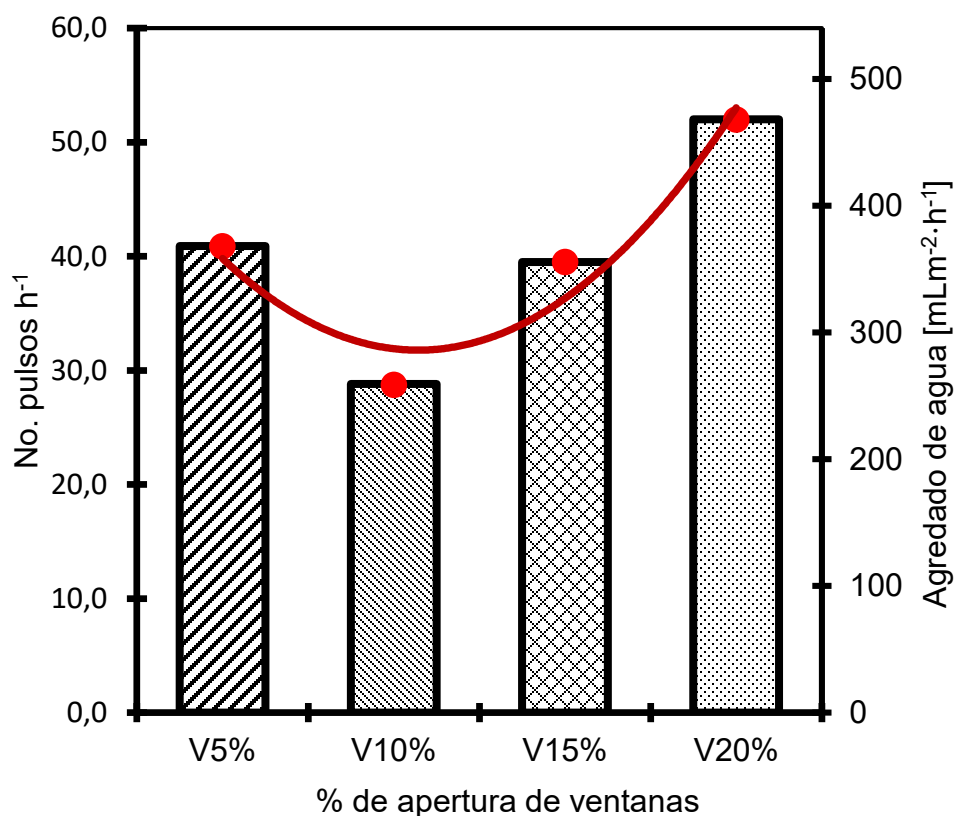


Figura 6. Consumo de agua (barras) y número de pulsos (-o-) diarios del sistema de nebulización a diferentes porcentajes de apertura de ventilas laterales (barras). La ventila cenital se mantuvo constante a 50 % de apertura.

Cuadro 2. Caracterización del ambiente del invernadero a diferentes combinaciones de apertura de ventilas.

% de apertura de las ventilas laterales	No de pulsos por día	Gasto de agua (mL·m ⁻² ·h)	T_a (°C)	HR (%)	R_s (W·m ⁻² ·s ⁻¹)	T_{a-e} (°C)	HR_e (%)	DPV_a (kPa)	$V.V$ (m ² /s ⁻¹)
5	266±0.47	368.3±2.0	27.5±0.96	64.4±4.6	703.94±287.2	26.07±1.6	36.06±4.6	2.18±0.35	1.8±1.2
10	187±0.5	258.5±2.2*	26.1±1.4	62.82±4.8	625.28±323.2	25.68±1.4	38.14±4.4	2.31±0.33	2.09±1
15	257±0.48	355.4±2.1*	25.3±1.7	58.2±4.8	655.19±340.1	24.29±1.5	27.8±3.9	2.49±0.34	2.03±1.1
20	411±0.34	467.7±1.3	24.1±1.7	56.9±5.8	618.89±346.9	24.41±1.8	33.31±6.5	2.07±0.43	2.94±1.6

Representan el MSE (n=480), diferencia significativa de los tratamientos de apertura de ventanas comparado aplicando la prueba de Tukey, significativo $P < 0.05$ (*).

3.2.4 Temperatura y Humedad relativa del aire optimo del cultivo de tomate en invernadero

Autores como Shamshiri et al., (2018), describe que la temperatura del aire óptima para un buen desarrollo del cultivo de tomate en invernadero, para tener amarre de frutos adecuados y racimos, debe de ser entre los 15 por la noche y por el día 21 °C, también es considerado temperatura optima del aire para el tomate durante toda la temporada de crecimiento.

El rango óptimo de humedad relativa durante todas las etapas de crecimiento del tomate debe de estar entre los 50%-70%. Otros estudios también expresan que la polinización del tomate mejora significativamente cuando la *HR* se mantiene alrededor de los 60% (Harel et al., 2014). En general, para mantener en los rangos idóneos de temperatura y humedad relativa del aire, se requiere enfriamiento para reducir estas tensiones y en regiones con clima frío, por el día, la HR es generalmente baja debido a una transpiración más baja y niveles más altos de condensación por las noches.

3.2.5 Rangos idóneos de *DPVc* para el desarrollo del tomate en invernadero.

Autores como Shamshiri et al., (2018), describe que la temperatura óptima del aire para un buen desarrollo del cultivo de jitomate en invernadero, debe de ser entre 15 y 21 °C, durante la noche y día, respectivamente.

Por otro lado, el rango óptimo de humedad relativa (*HR*) durante todas las etapas de crecimiento del jitomate debe de estar entre 50 a 70%. Otros estudios también expresan que la polinización de las plantas mejora significativamente cuando la *HR* se mantiene alrededor de los 60% (Harel et al., 2014). En general, para mantener los rangos idóneos de temperatura y humedad relativa del aire, se requiere de enfriamiento artificial para reducir estas tensiones, en regiones con clima frío, por el día, la HR generalmente es baja, por lo cual es necesario humidificar para mantenerlo en un rango idóneo.

3.2.6 Calculo del déficit de presión de vapor de cultivo DPV_c

A partir de la temperatura del aire y la humedad relativa se puede tener una caracterización importante del ambiente donde se desarrollan los cultivos, no obstante, el déficit de presión de vapor del cultivo (DPV_c), es una forma práctica de integrar las condiciones ambientales en una sola variable y que se, relaciona con los procesos fisiológicos del cultivo Shamshiri et al., (2017, 2018), describen los rangos adecuados DPV_c para las diferentes etapas fisiológicas del cultivo de jitomate, para la etapa vegetativa es necesario mantenerlo entre [0.59-1.06 kPa], mientras que en la etapas de floración y madurez de fruto se debe mantener en el rango de [0.59-1.42] kPa) para garantizar un buen desarrollo del cultivo de jitomate.

Para el cálculo del DPV_c se utilizó la ecuación 1, la cual es trabajado por meteorólogos y productores comerciales de invernadero (Gates & Mach, 1998; Pahuja et al., 2015).

$$DPV_c = (PV_{s-h} - PV_a)/1000 \quad (1)$$

Donde:

VPD_c Déficit de presión de vapor del cultivo (kPa)

PV_{s-h} , Presión de vapor a saturación a la temperatura de las hojas del cultivo (kPa)

PV_a , Presión de vapor actual del aire (kPa)

Las presiones de vapor de agua, tanto de la condición del aire, como a condiciones de saturación a la temperatura de la planta, se determinan con la Ecuación 2 (Prenger & Ling, 2001; ASHARAE HANDBOOK, 2017).

$$PV_{s-h} = \exp\left(\frac{C_1}{T_c} + C_2 + C_3 * T_c + C_4 * T_c^2 + C_5 * T_c^3 + C_6 * \log(T_c)\right) \quad (2)$$

$$PV_a = (PV_{s-h} * HR)/1000 \quad (3)$$

Donde

T_c Temperatura promedio del follaje en cultivo (K)

HR , Humedad relativa del aire (%)

Coeficientes, $C1=-5.8002206E+03$; $C2=1.3914993E+00$; $C3=-4.8640239E-02$;
 $C4=4.1764768E-05$; $C5=-1.4452093E-08$; $C6=6.5459673E+00$;

Coeficientes para presión de saturación sobre el agua líquida para el rango de temperatura de 0 a 200 °C. (ASHRAE,2017).

Para el control DPV_c se implementó un controlador convencional ON-OFF, la retroalimentación del sistema es simple, se usa típicamente en muchas aplicaciones de control de temperatura, para el trabajo realizado, el controlador de encendido/apagado se implementó con sensores de temperatura (T_a) y humedad relativa (HR) del ambiente, así como sensores infrarrojos que midieron la temperatura del cultivo (T_h), con la ecuación 1 se realizó el cálculo de DPV_c donde se compara el setpoint superior igual a 1.1 kPa (DPV_{sps}) con las mediciones de los sensores, emitiendo la señal de encendido si supera ese punto, mientras que se desactiva cuando el sistema detectaba que el DPV_c es igual o menor al setpoint inferior a 0.9 kPa (DPV_{spi}). Si el sistema está por debajo del setpoint superior el ciclo se repite una y otra vez, en el siguiente diagrama de flujo se describe el proceso de control ON/OFF para el sistema de nebulización (Figura 7).

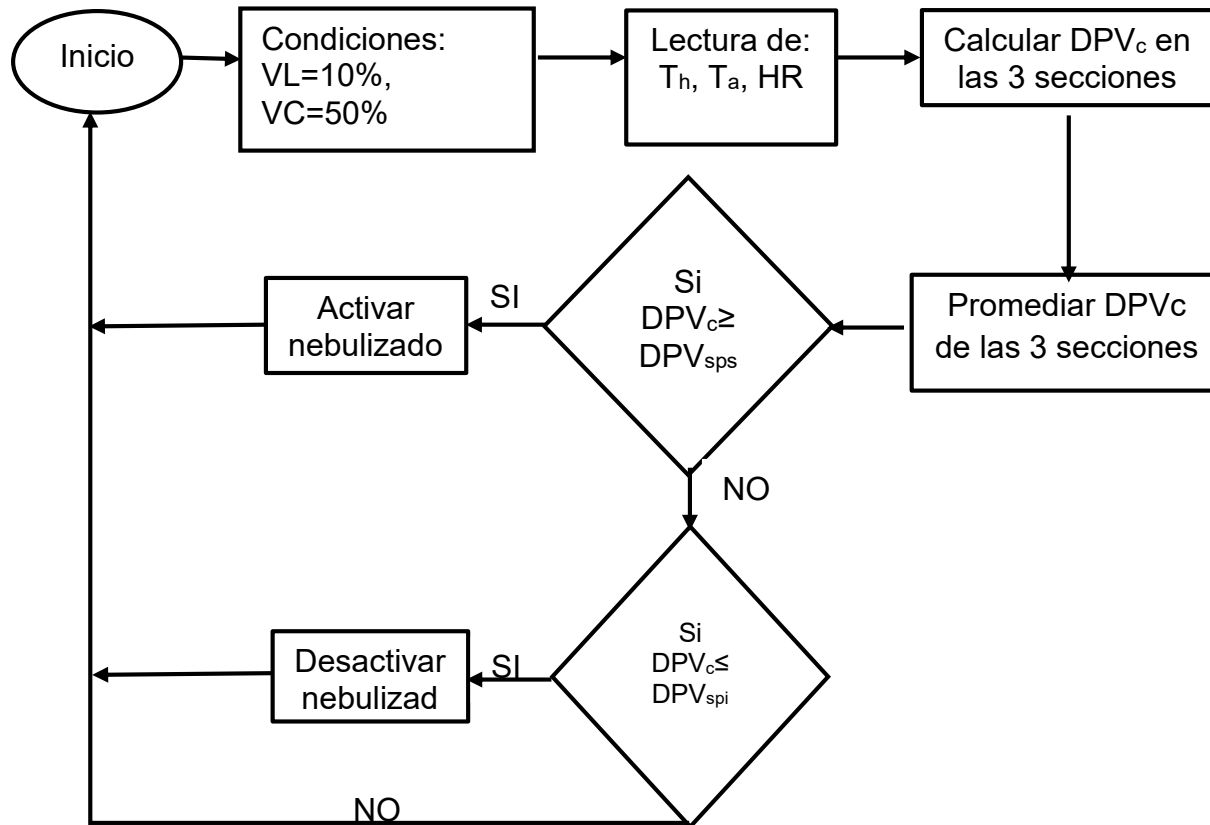


Figura 7 Diagrama de flujo para el algoritmo de control ON/OFF del DPV_c para cultivos de invernadero.

3.2.7 Sistema de adquisición de datos

Para el control del VPD_c se implementó con un sistema de adquisición de datos CR1000X (Campbell Sci., Logan UT, USA) al cual se conectaron: un sensor de temperatura del aire y humedad relativa HMP60 (Vaisala, Helsinki, Finland), colocado al centro del invernadero; tres sensores infrarrojos SI-111-SS (Apogee Instruments, Inc., Logan, UT, EE.UU.) distribuidos en la sección sur, centro y norte del invernadero; y otras sensores para medir las variables ambientales dentro y fuera del invernadero, incluyendo una estación meteorológica equipado con, sensor cuántico (Campbell Sci. EU), sensor de radiación global (Campbell Sci. EU), dirección y velocidad de viento YOUNG5305 (R.M. Young Company.USA).

Para tener una mejor lectura de la temperatura del follaje del cultivo, se colocaron los tres sensores infrarrojos en cada una de las secciones del invernadero. Las lecturas se promediaron para realizar el cálculo de la variable de control DPV_c . Dado que el efecto de los pulsos de nebulización es casi instantáneo, se aplicó una tasa de lectura de los sensores de 10 s, registrando el promedio cada minuto.

3.2.8 Efecto del DPV_c en el cultivo de jitomate

Se analizó el efecto que se tienen en la conductancia estomática de las plantas, al controlar el DPV_c , para Las mediciones de la conductancia estomática (g_s) del cultivo se realizó mediante porómetro de hojas SC-1 (Decagon Diveces Inc., cd, stado, EE.UU), para determinar el efecto del DPV_c en la transpiración de la planta, se utilizó el modelo propuesto por Stanghellini, (1987).

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.3.1 Evaluación del sistema de control de DPV_c en un cultivo de jitomate

Aun cuando en invierno se tienen temperaturas del aire bajas, el contenido de humedad relativa en el exterior (HR_e) durante el día es relativamente bajo oscilando entre los 21-30%, y la contribución de las plantas por transpiración no es suficiente para lograr un DPV_c adecuado para el cultivo.

Para comparar el efecto del control ON/OFF de DPV_c durante los periodos de experimentación Cuadro 3, se describe las medias de algunas variables climáticas del interior del invernadero (T_h , T_a , HR), así como también variables externas como es radiación solar (R_s), Humedad relativa (HR_e), temperatura del aire (T_{a-e}) y la velocidad del viento ($V.V$). De acuerdo a estos datos se puede inferir que el sistema de control implementado de DPV_c (setpoint=1.1kPa) se mejora las

condiciones ambientales en el interior del invernadero, sobre todo en la humedad relativa, temperatura del aire y la temperatura de la planta.

Cuadro 3. Medias de variables climáticas interna del invernadero y condiciones externas de los días de evaluación.

	Fecha	T_h (°C)	T_a (°C)	T_{a-e} (°C)	HR (%)	HR_e (%)	Rs ($W \cdot m^{-2} s^{-1}$)	$V.V$ ($m \cdot s^{-1}$)
Sin control	04/02/2020	26.5	30.39	25.69	23.45	21.19	826.8	1.64
	05/02/2020	24.99	28.62	25.76	24.38	22.86	709.95	1.61
Con control	11/02/2020	23.21	24.7	22.02	60.0	30.11	700.93	1.98
	12/02/2020	23.45	24.85	23.6	60.06	35.04	690.8	2.06

Variación diurna del ambiente al interior del invernadero durante invierno aplicando nebulización y los días sin nebulización (Figura 8). Los datos ambientales mostraron variaciones diurnas en la mayoría de los días durante la experimentación principalmente en la temperatura y humedad relativa (Figura 6a y 8c), sin embargo, el DPV_c (Figura 8e) se mantuvo en el objetivo establecido en el control (setpoint), por lo tanto, el sistema de nebulización tiene un efecto positivo en el ambiente interior del invernadero, el sistema de control trabajo con una configuración de las ventanas de 10% para las laterales y 50% la cenital.

Los resultados de la estrategia de control con ventilas abiertas al 10% las laterales y al 50% las de cenitales, comparado con dos días sin nebulización con ventilas al 50% las laterales y cenitales mostraron efectos en el ambiente Figura 8. Al activar el control implementado disminuyo significativamente el DPV_c en el interior del invernadero, especialmente en las horas de radiación solar (10:00 a 16:30), cuando la radiación solar y la temperatura eran altas, y la humedad relativa baja. El valor del DPV_c cuando no se activó el sistema de control alcanzo 2.44 kPa en promedio, durante el periodo del medio día, mientras que el déficit de presión de vapor del aire (DPV_a) tuvo un registro de 3.28 kPa, por otro lado, al activar el sistema de control se redujo el DPV_c considerablemente a 0.99 kPa manteniendo en objetivo programado (Figura 6e). La implementación del control

ON/OFF en el sistema invernadero permitió mantener en un rango ideal el DPV_c , para este caso en el cultivo de jitomate. Por otro lado, la humedad relativa del aire en el interior del área experimental en promedio lo mantuvo en 59% durante todo el día (Figura 8d) (R. Shamsiri, 2013).

Figura 6. Al detectar un DPV_c alto activo el sistema de nebulización permitiendo el agregado de agua pulverizada, promoviendo el enfriamiento en el interior del invernadero hasta alcanzar el punto de equilibrio. Los efectos que tuvo el control de DPV_c en la temperatura del aire y del cultivo fue bastante satisfactorio, las diferencias registradas en las variables climáticas que están directamente relacionadas con la variable DPV_c y DPV_a , cuando el sistema de control activa el sistema de nebulización, se puede observar en la Cuadro 4.

Con el sistema de control de DPV_c se logró mantener en el setpoint establecido 1.1 kPa (Figura 8e). Los datos obtenidos describen que el sistema de control implementado no solo alivia eficazmente el DPV_c del cultivo, sino que también reduce las fluctuaciones extremas en las variables ambientales durante mediodía, principalmente la humedad relativa que en promedio se mantuvo alrededor del 60.06 % durante el día. Este mismo comportamiento fue observado por Katsoulas et al., (2009) en un experimento con berenjenas al utilizar un control de humidificación con sistema de nebulización de alta presión.

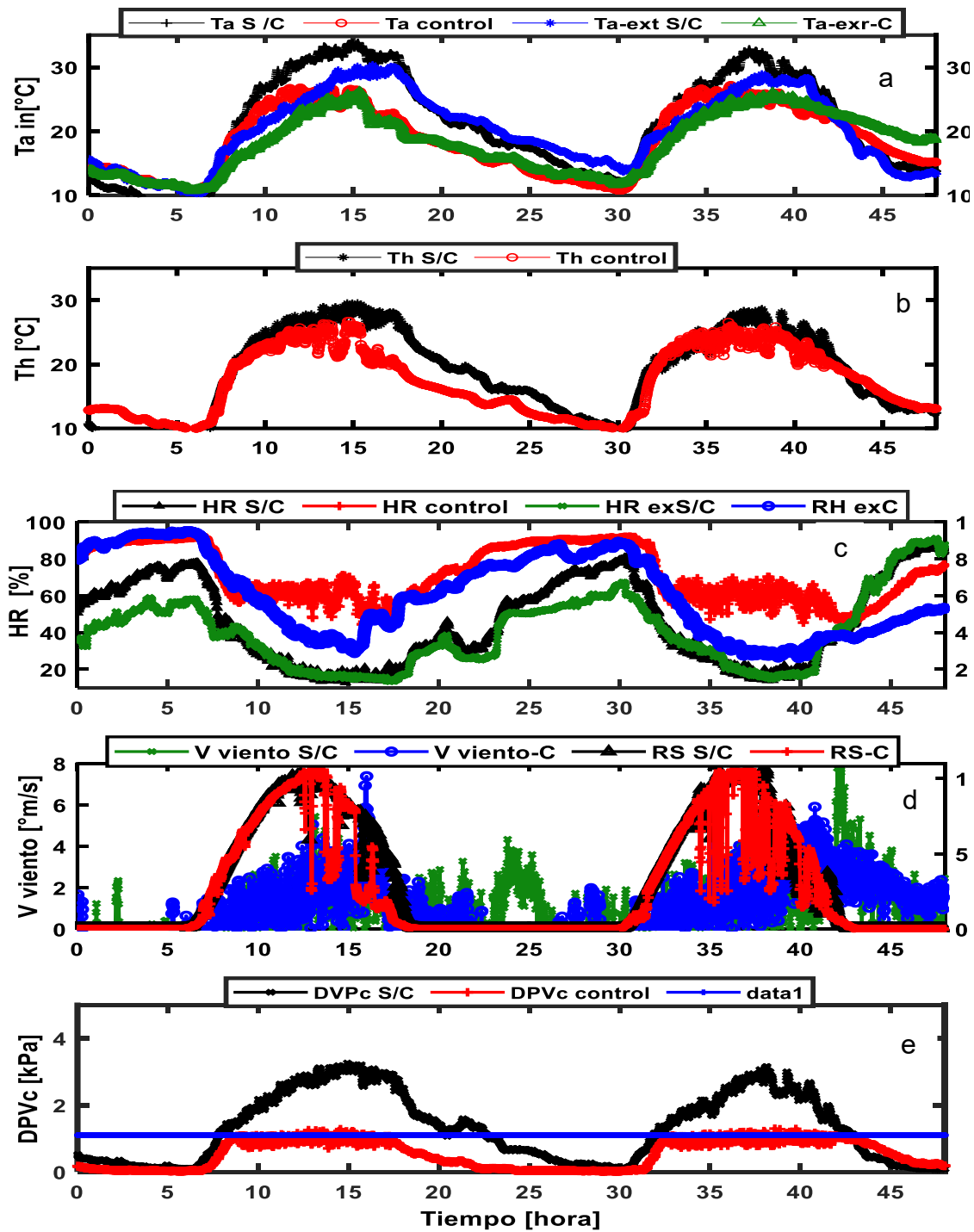


Figura 8. Comportamiento de las variables climáticas que están directamente relacionadas con el DPV_c en el interior del invernadero. (a) Temperatura del aire interior con control(-o-), sin control (-+-), Temperatura del aire exterior día sin control (-*-) y con control (-^--). (b) Temperatura de la hoja control(-o-), sin control

(-*). (c) Humedad relativa interior sin control (-^), con control (-+-), Humedad exterior día con control (-o-), sin control (-*-). (d) Velocidad del viento día sin control (-*-), con control (-o-), Radiación solar día con control (-+-), sin control (-^). (e) DPVc con control (-+-), sin control (-*-), objetivo DPVc (-^). fecha de datos.

Al activar el sistema de nebulización se eleva el contenido de humedad del aire, reduciendo la temperatura del aire y de la misma manera la temperatura de la planta, durante el periodo de mayor carga solar (10:00 a 16:30), como se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Comparación de medias de variables ambientales del interior y exterior del invernadero, con y sin control del *DPV_c*.

Tratamientos	T _a (°C)	T _h (°C)	HR (%)	R _s (W·m ⁻² s ⁻¹)	T _{a-e} (°C)	HR _e (%)	V.V (m·s ⁻¹)
Control							
<i>DPV_c</i>	24.85±1.3*	23,33±1.4	60.06±4.9**	690.7±277	22.7±2.3	39.5±10	2.02±1.2
S/control	29,51±2.6	25,74±1.9	24,38±6.3	768.2±230	25.7±2.8	22.02±7.2	1.6±1

Los valores representan el MSE (n=480), diferencia significativa de los tratamientos con y sin control de DPVc aplicando prueba de Tukey, significativo P≤0.05(*), significativamente P≤0.01(**).

3.3.2 Evaluación del algoritmo de contro de *DPV_c* a diferentes valores objetivos, en cultivo de jitomate

Para evaluar la efectividad del sistema de control de *PDV_c*, se probó el sistema a diferentes valores objetivo (0.4, 0.7, 1.0, 1.4, 1.7, 1.9 kPa, y sin control) del *DPV_c*, con una combinación de apertura de ventilas de 10% en laterales y cenitales 50% para cada uno de los tratamientos.

Con los resultados se demuestra que el sistema de control de *VPD_c*, tiene la capacidad de mantener en el objetivo establecido, sin embargo, para rangos

bajos de 0.4 y 0.7 kPa obtuvo las mayores variaciones en el ambiente y el mayor consumo de agua y energía. Esto se debe a la gran cantidad de vapor de agua requerida para lograr esos niveles de DPV_c en 0.4 y 0.7 kPa. Por otro lado, cuando se utiliza un setpoint de 1.0, 1.3, 1.6 y 1.9 kPa de DPV_c las variaciones en el ambiente fueron menores. A como la temperatura de la hoja, temperatura y humedad relativa del aire, las variaciones de los diferentes tratamientos de DPV_c se puede observar en la siguiente Figura 9.

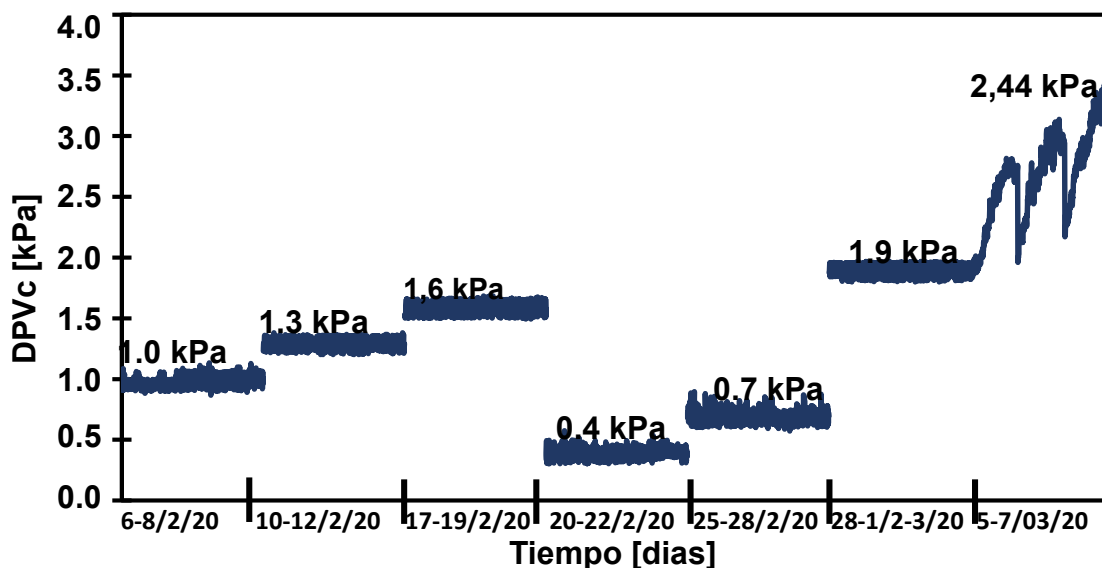


Figura 9. Tratamientos de DPV_c con diferentes rangos de activación del sistema de control ON/OFF.

Los efectos que se tuvo el clima en interior del invernadero con las variables que están directamente relacionadas con el DPV_c , al activar el sistema en un rango de DPV_c bajo, efectivamente se aumenta la humedad relativa del ambiente, sin embargo, no se tuvo una baja de temperatura del aire, esto se debe a la baja ventilación ya que para estos tratamientos se cerró casi por completo las ventanas laterales (2%) y al 50% de la cenital, la finalidad fue para mantener el DPV_c bajo de 0.4 y 0.7 kPa. Mientras se aumenta el DPV_c en el invernadero la temperatura del aire y del cultivo aumento linealmente, por otro lado, la humedad se redujo inversamente proporcional al aumento del DPV_c Figura 10. Argus, (2009)

y Zhang et al., (2017), describen que al aumentar el DPV_a la humedad relativa del aire tiende a disminuir, mientras que la temperatura es directamente proporcional a la disminución y al aumento del DPV_c . En la Cuadro 5, se puede observar los efectos que tuvo las variables climáticas con respecto a los diferentes tratamientos de DPV_c implementado en un cultivo de jitomate.

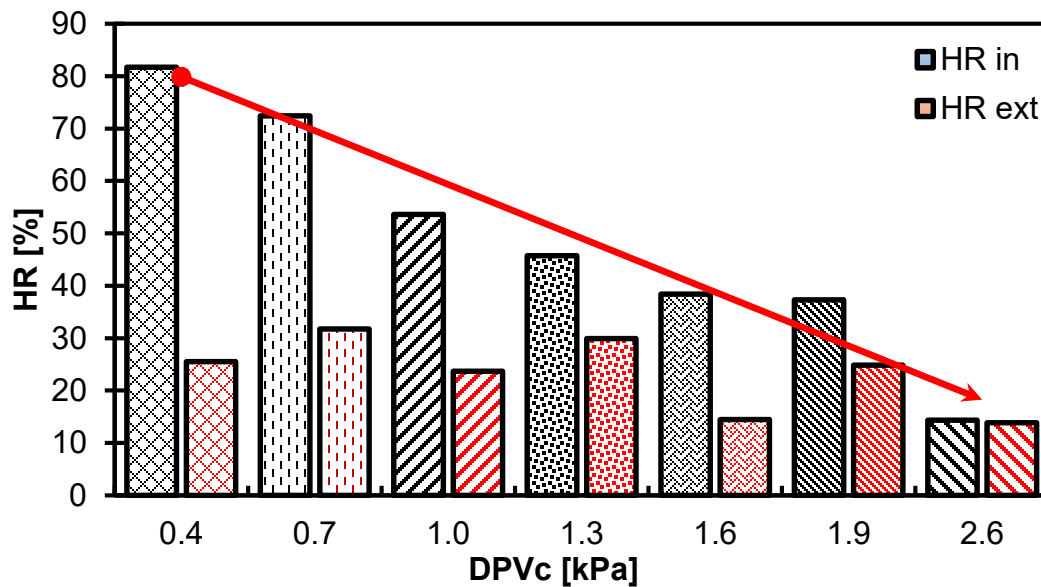


Figura 10 Comparación de la humedad relativa interna con el DPV_c controlado y humedad relativa externa para cada tratamiento.

Cuadro 5. Condiciones en el interior del invernadero, a diferentes DPV_c (setpoint) y condiciones externas.

Trata
mient
os

DPV_c kPa	T_h (°C)	T_a (°C)	HR (%)	$Rs(W \cdot m^{-2} s^{-1})$	T_{a-e} (°C)	HR_e (%)
0.4	26.98±2.1	28.5±2.6	81.79±4.8**	771.92±208	24.29±2	25.52±5.1
0.7	25.95±1.3	27.51±2.2	72.48±7.8**	792.58±151	22.22±2.1	31.76±6.5
1.0	21.1±1.6*	23.13±1.6**	53.65±4.5*	779.9±219	22.52±2.1	23.67±6.6
1.3	22.9±1.2*	25.7±1.4*	45.73±4.6	768.7±128	23.16±1.8	29.93±6.2
1.6	23.8±0.8*	27.02±1.4	38.43±3	801.4±104	25.76±2.7*	14.45±5.6*

1.9	25.43±0.7	27.38±0.9	37.31±3.9	805.5±114	24.19±2.4	24.83±9.9
S/C	25.86±1.7	31.35±2.2	14.36±3.8	903.1±125	26.45±2.2*	13.87±4.1*

Datos de las variables climáticas internas y externas MSE (n=900), diferencia significativa de los tratamientos con diferentes DPV_c comparado aplicando la prueba de Tukey, significativo P≤0.05 (*), Significativamente P≤0.01(**).

De todos los tratamientos *DPV_c* implementados en el cultivo de jitomate, se tuvieron diferencia significativa en los tratamientos de 0.4,0.7, 1.0 y 1.3, 2.6 kPa de *DPV_c* en las variables climáticas, excepto los tratamientos de 1.3,1.6 y 1.9 no se tuvo diferencia significativa (Tukey P≤0.05) en la T_h, T_a y HR, de acuerdo al análisis de varianza (ANOVA).

3.3.3 Efecto del control *DPV_c* en la transpiración del cultivo de jitomate

Al activar el sistema de control de *DPV_c* se mantiene en condiciones idóneas para un buen desarrollo del cultivo. El incremento en la tasa de transpiración de las plantas se debe al bajo contenido de agua en el ambiente, con el sistema de nebulización se puede mejorar esas condiciones de humedad, al mismo tiempo la temperatura tiende a bajar, así como el déficit de presión de vapor del cultivo (*DPV_c*). Por otro lado, la tasa de transpiración de la planta de tomate aumenta linealmente con el aumento de déficit de presión vapor del cultivo *DPV_c*, (Figura 11). (Katsoulas et al., 2001; Sase et al., 2007; Sinclair et al., 2017). Al disminuir la pérdida de agua en las plantas, favorece la reducción del estrés hídrico en área foliar del cultivo, la desecación en las hojas y el potencial hídrico negativo excesivo se evitan al mantener en equilibrio el *DPV_c*, (0.99 kPa), el equilibrio del *DPV_c*, suprime la fuerza motriz y la velocidad del flujo de agua reduciendo sustancialmente la transpiración (Zhang et al., 2017; Du et al., 2018; Jiao et al., 2019), se puede observar en la Figura 8, al activar el sistema de control de *DPV_c* en el punto de 1.1 kPa y desactivado cuando el *DPV_c* es cuantificado en 0.8 kPa la transpiración es reducida.

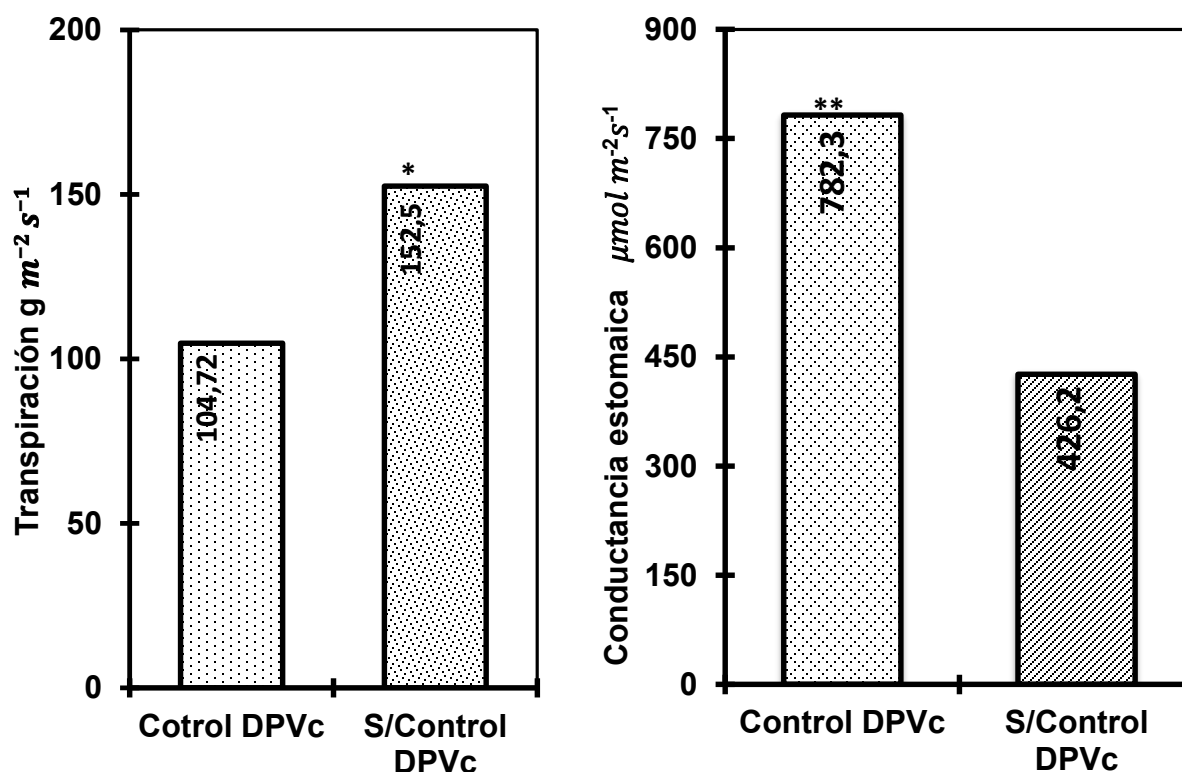


Figura 11. Efecto del control de DPV_c en la transpiración (E) y conductancia estomática (g_s) en el cultivo de jitomate en 150 días después del trasplante. Análisis de varianza (ANOVA), MSE(n=480), la diferencia significativa entre tratamientos del control DPV_c y sin control se comparó mediante prueba de Tukey. Significativo $P < 0.05$ (*), significativamente $p < 0.01$ (**).

Para ver el efecto del DPV_c en el cultivo, se midió la conductancia estomática (g_s) y se determinó la transpiración (E), durante un día con el control del VPD_c a 1.0 kPa, y otro sin control (obteniéndose valores de 2.44 kPa). En los días sin control de VPD_c , se reduce considerablemente la conductancia estomática ($426.2\ g\cdot m^{-2}\ s^{-1}$) y de manera contraria se incrementa la transpiración. Por otro lado, cuando se mantiene un VPD_c controlado a 1.0 kPa se tiene un valor de $782.3\ g\cdot m^{-2}\ s^{-1}$ en la conductancia estomática.

La reducción del DPV_c de 2.44 Kpa 0.99 kPa aumenta considerablemente la conductancia estomática del cultivo (g_e), McAdam et al., (2016) observaron similarmente que al aumentar el DPV disminuye considerablemente la conductancia estomática, por otro lado, (Mutwiwa et al., 2006; Lu et al., 2015;

Jiao et al., 2019), reportaron que al mantener el DPV bajo en el rango de 0.8 a 1.4 kPa se reduce el estrés hídrico y aumenta la conductancia estomática, así como la tasa de fotosíntesis neta en la planta de jitomate durante el día.

Reconocimiento

Este trabajo se realizó con el apoyo de la empresa Lubing Mesoamerica México, quien dono el sistema de nebulización de alta presión y calentadores.

3.4 CONCLUSIONES

Se propuso un sistema de control simple (ON/OFF) de DPV_c para cultivos en invernaderos el cual funciona adecuadamente, logrando los valores establecidos en el setpoint de DPV_c ($DPV_{csp.}$), mejorando las condiciones ambientales resultando idóneas para los cultivos.

Se determinó un pequeño rango de apertura de ventilas (10/50), la combinación adecuada de ventilación-nebulización, para obtener las condiciones idóneas del cultivo, minimizando el consumo de agua y energía (pulsos), y con condiciones T_a , HR y DPV_c óptimos de los cultivos.

Se caracterizó el sistema de nebulización, para determinar la cantidad de agua agregada en cada pulso de activación del sistema de nebulización, obteniendo una tasa de nebulización entre $0.076 - 0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ con presiones de trabajo de [4.13-8.27 MPa].

Se midió el efecto que se tiene en el cultivo al controlar el DPV_c en las horas diurna, de acuerdo a las mediciones realizadas, se mejoró significativamente la conductancia estomática del cultivo de jitomate en un $54.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, comparado con las mediciones cuando no se activa el sistema de control de DPV_c .

3.5 Referencias

- Ahemd, H. A., Al-Faraj, A. A., & Abdel-Ghany, A. M. (2016). Shading greenhouses to improve the microclimate, energy and water saving in hot regions: A review. *Scientia Horticulturae*, 201, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.01.030>
- Al-Helal, I. M., & Abdel-Ghany, A. M. (2010). Responses of plastic shading nets to global and diffuse PAR transfer: Optical properties and evaluation. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 57(2), 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2010.02.002>
- Al-Helal, Ibrahim M. (2007). Effects of Ventilation Rate on the Environment. *Applied Engineering in Agriculture*, 23(2), 221–230.
- Amer, O., Boukhanouf, R., & Ibrahim, H. G. (2015). A Review of Evaporative Cooling Technologies. *International Journal of Environmental Science and Development*, 6(2), 111–117. <https://doi.org/10.7763/ijesd.2015.v6.571>
- Arbel, A., Barak, M., & Shklyar, A. (2003). Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses. *Biosystems Engineering*, 84(1), 45–55. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(02\)00216-7](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(02)00216-7)
- Arbel, A., Yekutieli, O., & Barak, M. (1999). Performance of a fog system for cooling greenhouses. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 72(2), 129–136. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0351>
- Arellano, D. L., & Valera, M. (2011). *Natural and Forced Ventilation in Almeria-Type Greenhouse and its Relationship to Tomato Yield VENTILACIÓN NATURAL Y FORZADA DE INVERNADEROS TIPO ALMERÍA*. January 2018.
- Arellano García, M., Valera Martínez, D., Urrestarazu Gavilán, M., García Garza, S., Sánchez Salas, J., & Soria Ruiz, J. (2006). Estudio del microclima en dos subtipos de invernaderos Almería. *Agricultura Técnica En México*, 32(2), 225–234.
- Argus, 2009. Controls. (2009). *Understanding and Using Firewalls*. January.
- Arve, L. E., Kruse, O. M. O., Tanino, K. K., Olsen, J. E., Futsæther, C., & Torre, S. (2017a). Daily changes in VPD during leaf development in high air humidity increase the stomatal responsiveness to darkness and dry air. *Journal of Plant Physiology*, 211, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.011>
- Arve, L. E., Kruse, O. M. O., Tanino, K. K., Olsen, J. E., Futsæther, C., & Torre, S. (2017b). Daily changes in VPD during leaf development in high air humidity increase the stomatal responsiveness to darkness and dry air.

- Journal of Plant Physiology*, 211, 63–69.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.011>
- Arve, L. E., Kruse, O. M. O., Tanino, K. K., Olsen, J. E., Futsæther, C., & Torre, S. (2017c). Daily changes in VPD during leaf development in high air humidity increase the stomatal responsiveness to darkness and dry air. *Journal of Plant Physiology*, 211, 63–69.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.011>
- Arve, L. E., Terfa, M. T., Gislørød, H. R., Olsen, J. E., & Torre, S. (2013). High relative air humidity and continuous light reduce stomata functionality by affecting the ABA regulation in rose leaves. *Plant, Cell and Environment*, 36(2), 382–392. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02580.x>
- ASHARAE HANDBOOK, 2017. (2017). *ASHARAE HANDBOOK, 2017* (A. H. Fundamentals (ed.); I-P Editio). 2017.
- Bakker, J. C. (1991). Effects of humidity on stomatal density and its relation to leaf conductance. *Scientia Horticulturae*, 48(3–4), 205–212.
[https://doi.org/10.1016/0304-4238\(91\)90128-L](https://doi.org/10.1016/0304-4238(91)90128-L)
- Bertin, N., Guichard, S., Leonardi, C., Longuenesse, J. J., Langlois, D., & Navez, B. (2000). Seasonal evolution of the quality of fresh glasshouse tomatoes under Mediterranean conditions, as affected by air vapour pressure deficit and plant fruit load. *Annals of Botany*, 85(6), 741–750.
<https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1123>
- Bian, Z., Zhang, X., Wang, Y., & Lu, C. (2019). Improving drought tolerance by altering the photosynthetic rate and stomatal aperture via green light in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings under drought conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 167(April), 103844.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103844>
- Carins Murphy, M. R., Jordan, G. J., & Brodribb, T. J. (2014). Acclimation to humidity modifies the link between leaf size and the density of veins and stomata. *Plant, Cell and Environment*, 37(1), 124–131.
<https://doi.org/10.1111/pce.12136>
- Choudary and Monteith. (1986). Implications of stomatal response to saturation deficit for the heat balance of vetative. *Agricultural and Forest Medology*, 36 (1986) 215-225. *Elvevier Science Publishers B.V., Amsterdam-Printed in the Netherlands.*, 36(MD 20771 (U.S.A.)), : pp. 83-94.
- Dell', J. M., Rodríguez, A., & Morales Guevara, D. M. (2017). *Stomatal conductance behavior of two Cuban tomato varieties in field conditions and limited irrigation*. 38(2), 137–144. <http://ediciones.inca.edu.cu>
- Devi, M. J., & Reddy, V. R. (2018). Transpiration response of cotton to vapor pressure deficit and its relationship with stomatal traits. *Frontiers in Plant*

- Science*, 871(October), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01572>
- Drake, P. L., Froend, R. H., & Franks, P. J. (2013). Smaller, faster stomata: Scaling of stomatal size, rate of response, and stomatal conductance. *Journal of Experimental Botany*, 64(2), 495–505. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers347>
- Du, Q., Xing, G., Jiao, X., Song, X., & Li, J. (2018). Stomatal responses to long-term high vapor pressure deficits mediated most limitation of photosynthesis in tomatoes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40(8), 0. <https://doi.org/10.1007/s11738-018-2723-7>
- Fakhrabadi, F., & Kowsary, F. (2016). Optimal design of a regenerative heat and mass exchanger for indirect evaporative cooling. *Applied Thermal Engineering*, 102, 1384–1394. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.115>
- Fanourakis, D., Aliniaiefard, S., Sellin, A., Giday, H., Körner, O., Rezaei Nejad, A., Delis, C., Bouranis, D., Koubouris, G., Kambourakis, E., Nikoloudakis, N., & Tsaniklidis, G. (2020). Stomatal behavior following mid- or long-term exposure to high relative air humidity: A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 153, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.05.024>
- Fanourakis, D., Bouranis, D., Giday, H., Carvalho, D. R. A., Rezaei Nejad, A., & Ottosen, C. O. (2016). Improving stomatal functioning at elevated growth air humidity: A review. *Journal of Plant Physiology*, 207, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.10.003>
- Fernandes-Silva, A. A., López-Bernal, Á., Ferreira, T. C., & Villalobos, F. J. (2016). Leaf water relations and gas exchange response to water deficit of olive (cv. Cobrançosa) in field grown conditions in Portugal. *Plant and Soil*, 402(1–2), 191–209. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2786-9>
- Fitz-Rodríguez, E., Kacira, M., Guerrero, F. V., Kubota, C., Giacomelli, G., Linker, R., & Arbel, A. (2010). Dynamic response and environmental uniformity of a naturally ventilated greenhouse cooled with a variable-pressure fogging system. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2010, ASABE 2010*, 6(10), 4727–4742. <https://doi.org/10.13031/2013.29906>
- Francesconi, S., & Balestra, G. M. (2020). The modulation of stomatal conductance and photosynthetic parameters is involved in Fusarium head blight resistance in wheat. *PLoS ONE*, 15(6 June), 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235482>
- Fuchs, M., & Stanghellini, C. (2018). The functional dependence of canopy conductance on water vapor pressure deficit revisited. *International Journal of Biometeorology*, 62(7), 1211–1220. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1524-4>

- Gates, R. S., & Mach, C. A. (2017). Vapor Pressure Deficit Control Algorithm for Plant Studies. *IFAC Proceedings Volumes*, 33(29), 129–134. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)36764-2](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)36764-2)
- Gates, R. S., Zolnier, S., & Buxton, J. (1998). Vapor Pressure Deficit Control Strategies for Plant Production. *IFAC Proceedings Volumes*, 31(12), 271–276. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)36076-7](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)36076-7)
- Gázquez, J. C., López, J. C., Baeza, E., Pérez-Parra, J. J., Fernández, M. D., Baille, A., & González-Real, M. (2008). Effects of vapour pressure deficit and radiation on the transpiration rate of a greenhouse sweet pepper crop. *Acta Horticulturae*, 797, 259–266.
- Ghani, S., Bakochristou, F., ElBialy, E. M. A. A., Gamaledin, S. M. A., Rashwan, M. M., Abdelhalim, A. M., & Ismail, S. M. (2019). Design challenges of agricultural greenhouses in hot and arid environments – A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12(1), 48–70. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.09.004>
- Ghoulem, M., El Moueddeb, K., Nehdi, E., Boukhanouf, R., & Kaiser Calautit, J. (2019). Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status. *Biosystems Engineering*, 183, 121–150. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.016>
- Gil-Marín, J. A., Rodríguez, R., Cantú, D. J., & Zermeno, A. (2006). Resistencia Estomática , Transpiración Y Potencial Hídrico. *Terra Latinoamericana*, 24(3), 355–365. <http://www.redalyc.org/pdf/573/57311103007.pdf>
- Hahn, F. (2011). Manejo automático de malla sombra y del riego en un invernadero con tomates. *Scientia Agropecuaria*, 2(1), 31–37.
- Handarto; Makio Hayashi; Katsumi Ohyama; Hiromi Toida; Eiji Goto and Toyoki Kozai. (2006). *Developing System Control Operation Logic for a High-Pressure Ventilated Fog Cooling Greenhouse for a Naturally Department of Bioproduction Science , Faculty of Horticulture , Chiba University , greenhouse has been developed . A suitable duration of the f.* 44(1), 1–9.
- Harel, D., Fadida, H., Slepoy, A., Gantz, S., & Shilo, K. (2014). The Effect of Mean Daily Temperature and Relative Humidity on Pollen, Fruit Set and Yield of Tomato Grown in Commercial Protected Cultivation. *Agronomy*, 4(1), 167–177. <https://doi.org/10.3390/agronomy4010167>
- Heidarinejad, G., Bozorgmehr, M., Delfani, S., & Esmaeelian, J. (2009). Experimental investigation of two-stage indirect/direct evaporative cooling system in various climatic conditions. *Building and Environment*, 44(10), 2073–2079. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.017>
- Ho, L. C., & White, P. J. (2005). A cellular hypothesis for the induction of

- blossom-end rot in tomato fruit. *Annals of Botany*, 95(4), 571–581.
<https://doi.org/10.1093/aob/mci065>
- Ishii, M., Okushima, L., Moriyama, H., & Sase, S. (2014). An overview of natural ventilation, airflow, evaporative cooling and heat pump heating in greenhouses under mild climatic conditions. *Acta Horticulturae*, 1037, 493–500. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.61>
- Ishii, M., Sase, S., Moriyama, H., Kurata, K., Ikeguchi, A., Kubota, C., Hayashi, M., Sabeh, N., Romero, P., & Giacomelli, G. A. (2006). The effect of evaporative fog cooling in a naturally ventilated greenhouse on air and leaf temperature, relative humidity and water use in a semiarid climate. *Acta Horticulturae*, 719(2005), 491–498.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.56>
- Jiao, X. C., Song, X. M., Zhang, D. L., Du, Q. J., & Li, J. M. (2019). Coordination between vapor pressure deficit and CO₂ on the regulation of photosynthesis and productivity in greenhouse tomato production. *Scientific Reports*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45232-w>
- Katsoulas, N., Baille, A., & Kittas, C. (2001). Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106(3), 233–247. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00211-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00211-2)
- Katsoulas, N., Savvas, D., Tsirogiannis, I., Merkouris, O., & Kittas, C. (2009). Response of an eggplant crop grown under Mediterranean summer conditions to greenhouse fog cooling. *Scientia Horticulturae*, 123(1), 90–98.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.08.004>
- Kittas, Constantinos. Bartzanas, Thomas. Katsoula, N. (2013). Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops: Principles for Mediterranean Climate Areas. In *Fao* (Issue March 2020).
- Kittas, C., & Bartzanas, T. (2007). Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations. *Building and Environment*, 42(10), 3774–3784.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.020>
- Kittas, C., Boulard, T., & Papadakis, G. (1997). Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: Sensitivity to temperature and wind effects. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 40(2), 415–425. <https://doi.org/10.13031/2013.21268>
- Lawson, T., & Vialet-Chabrand, S. (2019). Speedy stomata, photosynthesis and plant water use efficiency. *New Phytologist*, 221(1), 93–98.
<https://doi.org/10.1111/nph.15330>
- Leyva, R., Constán-Aguilar, C., Sánchez-Rodríguez, E., Romero-Gámez, M., &

- Soriano, T. (2015). Cooling systems in screenhouses: Effect on microclimate, productivity and plant response in a tomato crop. *Biosystems Engineering*, 129, 100–111.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.09.018>
- Li, H., Issaka, Z., Jiang, Y., Tang, P., & Chen, C. (2019). Overview of emerging technologies in sprinkler irrigation to optimize crop production. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(3), 1–9.
<https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191203.4310>
- Li, Q., Liu, Y., Tian, S., Liang, Z., Li, S., Li, Y., Wei, M., & Zhang, D. (2019). Effect of supplemental lighting on water transport, photosynthetic carbon gain and water use efficiency in greenhouse tomato. *Scientia Horticulturae*, 256(April), 108630. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108630>
- Li, S., & Willits, D. H. (2008). Comparing low-pressure and high-pressure fogging systems in naturally ventilated greenhouses. *Biosystems Engineering*, 101(1), 69–77.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.06.004>
- Li, Shuhai, Willits, D. H., & Yunker, C. (2005). Experimental study of fogging system in naturally ventilated greenhouses. *2005 ASAE Annual International Meeting*, 393–400. <https://doi.org/10.13031/2013.19910>
- Linker, R., Kacira, M., & Arbel, A. (2011). Robust climate control of a greenhouse equipped with variable-speed fans and a variable-pressure fogging system. *Biosystems Engineering*, 110(2), 153–167.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.07.010>
- López-Cruz, I. L., Ruíz-García, A., & Hernández-Larragoiti, L. (2014). Neuro-fuzzy modeling of transpiration rates of greenhouse tomatoes under temperate weather conditions of central Mexico. *Acta Horticulturae*, 1037, 345–352. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.42>
- Lu, N., Nukaya, T., Kamimura, T., Zhang, D., Kurimoto, I., Takagaki, M., Maruo, T., Kozai, T., & Yamori, W. (2015). Control of vapor pressure deficit (VPD) in greenhouse enhanced tomato growth and productivity during the winter season. *Scientia Horticulturae*, 197, 17–23.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.001>
- Markley, H.P. Allen, R. G. (2004). Sprinkle & Trickle Irrigation Lecture Notes. *Utah State University , USA 2004*.
- Márquez Quiroz, C., Robledo Torres, V., Benavides Mendoza, A., Vázquez Badillo, M., Cruz Lázaro, E., Estrada Botello, M., & López Espinosa, S. (2014). Uso de mallas sombra: una alternativa para la producción de tomate cherry. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 1(2), 175–180.
<https://doi.org/10.19136/era.a1n2.165>

- Massmann, A., Gentine, P., & Lin, C. (2019). When Does Vapor Pressure Deficit Drive or Reduce Evapotranspiration? *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(10), 3305–3320. <https://doi.org/10.1029/2019MS001790>
- McAdam, S. A. M., & Brodribb, T. J. (2015). The evolution of mechanisms driving the stomatal response to vapor pressure deficit. *Plant Physiology*, 167(3), 833–843. <https://doi.org/10.1104/pp.114.252940>
- McAdam, S. A. M., & Brodribb, T. J. (2016). Linking turgor with ABA biosynthesis: Implications for stomatal responses to vapor pressure deficit across land plants. *Plant Physiology*, 171(3), 2008–2016. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00380>
- McAdam, S. A. M., Sussmilch, F. C., & Brodribb, T. J. (2016). Stomatal responses to vapour pressure deficit are regulated by high speed gene expression in angiosperms. *Plant Cell and Environment*, 39(3), 485–491. <https://doi.org/10.1111/pce.12633>
- Medrano-Cortes; (1999). *Universidad politécnica de madrid escuela técnica superior de ingenieros agrónomos gestión de riego en cultivo de pepino* “.
- Misra, D., & Ghosh, S. (2018). Evaporative cooling technologies for greenhouses: A comprehensive review. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 20(1), 1–15.
- Mutwiwa, U. N., Tantau, H. J., & Salokhe, V. M. (2006). Response of tomato plants to natural ventilation and evaporative cooling methods. *Acta Horticulturae*, 719, 447–454. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.50>
- Nieves García, V., Van der Valk, O., & Elings, A. (2011). Mexican protected horticulture: Production and market of Mexican protected horticulture described and analysed. *Wageningen UR Greenhouse Horticulture, Rapport GT*, 108.
- O’Carrigan, A., Hinde, E., Lu, N., Xu, X. Q., Duan, H., Huang, G., Mak, M., Bellotti, B., & Chen, Z. H. (2014). Effects of light irradiance on stomatal regulation and growth of tomato. *Environmental and Experimental Botany*, 98, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.10.007>
- Pahuja, R., Verma, H. K., & Uddin, M. (2015). Implementation of greenhouse climate control simulator based on dynamic model and vapor pressure deficit controller. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 8(4), 273–288. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2015.04.009>
- Perdigones, A., García, J. L., Romero, A., Rodríguez, A., Luna, L., Raposo, C., & de la Plaza, S. (2008). Cooling strategies for greenhouses in summer: Control of fogging by pulse width modulation. *Biosystems Engineering*, 99(4), 573–586. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.01.001>

- Prenger, J. J., & Ling, P. P. (2001). Greenhouse condensation control: understanding and using vapor pressure deficit (VPD). *The Ohio State University Extension*, page 3, 4.
- Qiu, C., Ethier, G., Pepin, S., Dubé, P., Desjardins, Y., & Gosselin, A. (2017). Persistent negative temperature response of mesophyll conductance in red raspberry (*Rubus idaeus* L.) leaves under both high and low vapour pressure deficits: a role for abscisic acid? *Plant Cell and Environment*, 40(9), 1940–1959. <https://doi.org/10.1111/pce.12997>
- Romantchik, E., Ríos, E., Sánchez, E., López, I., & Sánchez, J. R. (2017). Determination of energy to be supplied by photovoltaic systems for fan-pad systems in cooling process of greenhouses. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1161–1168. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.011>
- Rosales-Vicelis. (2016). Desarrollo de un sistema de monitoreo de déficit de presión de vapor en cultivo de invernadero. *Tesis Profesional*, 76.
- Sabeh, N. C., Giacomelli, G. A., & Kubota, C. (2007). Water use by greenhouse evaporative cooling systems in a semi-arid climate. *2007 ASABE Annual International Meeting, Technical Papers, 8 BOOK(07)*.
- Sase, S., Ishii, M., Moriyama, H., Kurata, K., Kubota, C., Hayashi, M., Sabeh, N., Romero, P., & Giacomelli, G. A. (2007). Transpiration of tomato plant canopy and water use for a fog cooled greenhouse in semiarid climate. *Acta Horticulturae*, 761(1990), 63–69. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.761.6>
- Sethi, V. P., & Sharma, S. K. (2007). Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, 81(12), 1447–1459. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.03.004>
- Shamshiri, R. (2013). A Review of Greenhouse Climate Control and Automation Systems in Tropical Regions. *Journal of Agricultural Science and Applications*, 02(03), 175–182. <https://doi.org/10.14511/jasa.2013.020307>
- Shamshiri, R., Ahmad, D., Wan Ismail, W. I., Man, H. C., Zakaria, A. J., Van Beveren, P., & Yamin, M. (2016). Comparative evaluation of naturally ventilated screenhouse and evaporative cooled greenhouse based on optimal vapor pressure deficit. *2016 American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, ASABE 2016*, 2454215, 2–11. <https://doi.org/10.13031/aim.20162454215>
- Shamshiri, Radmon Ramin., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics*, 32(2), 287–302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>

- Shamshiri, Redmond R., Mahadi, M. R., Thorp, K. R., Ismail, W. I. W., Ahmad, D., & Man, H. C. (2017). Adaptive Management Framework for Evaluating and Adjusting Microclimate Parameters in Tropical Greenhouse Crop Production Systems. *Plant Engineering*.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.69972>
- Shamshiri, Redmond Ramin, Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics*, 32(2), 287–302.
<https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- SIAP, Servicio de información agroalimentaria y pesquera (2019). Panorama agroalimentario.https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2019/Atlas-Agroalimentario-2019
- Sinclair, T. R., Devi, J., Shekoofa, A., Choudhary, S., Sadok, W., Vadez, V., Riar, M., & Rufty, T. (2017). Limited-transpiration response to high vapor pressure deficit in crop species. *Plant Science*, 260, 109–118.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.04.007>
- Singh, M. C., Singh, J. P., & Singh, K. G. (2018). Development of mathematical models for predicting vapour pressure deficit inside a greenhouse from internal and external climate. *Journal of Agrometeorology*, 20(3), 238–241.
- Sorensen, H. K., Fanourakis, D., Tsaniklidis, G., Bouranis, D., Nejad, A. R., & Ottosen, C. O. (2020). Using artificial lighting based on electricity price without a negative impact on growth, visual quality or stomatal closing response in Passiflora. *Scientia Horticulturae*, 267(December 2019), 109354. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109354>
- Stanghellini, C. (1987). *Transpiration of geenhouse crops an aid to climate management*. 150.
- Steiner, A. A. (1961). A Universal Method for Preparing Nutrient Solutions of a Certain Desired Composition. *Plan and Soil XV, VI*. 15, 134–154.
<https://edepot.wur.nl/309364>
- Streck-Nereu, A. (2003). Stomatal Response To Water Vapor Pressure Deficit: an Unsolved Issue. *Revista Brasileira de Agrociência*, 9(4), 317–322.
<https://doi.org/10.18539/cast.v9i4.649>
- Toida, H., Ohyama, K., Kozai, T., Handarto, & Hayashi, M. (2006). A method for measuring dry-bulb temperatures during the operation of a fog system for greenhouse cooling. *Biosystems Engineering*, 93(3), 347–351.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.12.004>
- Tonetto, S., McElrone, A. J., Shackel, K. A., & Mitcham, E. J. (2014). Calcium partitioning and allocation and blossom-end rot development in tomato

- plants in response to whole-plant and fruit-specific abscisic acid treatments. *Journal of Experimental Botany*, 65(1), 235–247.
<https://doi.org/10.1093/jxb/ert364>
- Villarreal-Guerrero, F., Flores-Velazquez, J., & Kacira, M. (2014). Comparative performance of a greenhouse cooling strategy with natural ventilation and fogging under different outside climates. *Acta Horticulturae*, 1037, 57–64.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.3>
- Villarreal-Guerrero, Federico, Kacira, M., Fitz-Rodríguez, E., Linker, R., Kubota, C., Giacomelli, G. A., & Arbel, A. (2012). Simulated performance of a greenhouse cooling control strategy with natural ventilation and fog cooling. *Biosystems Engineering*, 111(2), 217–228.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.11.015>
- Viuda-Martos, M., Sanchez-Zapata, E., Sayas-Barberá, E., Sendra, E., Pérez-Álvarez, J. A., & Fernández-López, J. (2014). Tomato and Tomato Byproducts. Human Health Benefits of Lycopene and Its Application to Meat Products: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(8), 1032–1049. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.623799>
- Von Zabeltitz, C. (2011). Integrated Greenhouse Systems For Mild Climates: Climate conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Yaaran, A., Negin, B., & Moshelion, M. (2019). Role of guard-cell ABA in determining steady-state stomatal aperture and prompt vapor-pressure-deficit response. *Plant Science*, 281(August 2018), 31–40.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.12.027>
- Zakari, M. D., Abubakar, Y. S., Muhammad, Y. B., Shanono, N. J., Nasidi, N. M., Abubakar, M. S., Muhammad, A. I., Lawan, I., & Ahmad, R. K. (2016). Design and construction of an evaporative cooling system for the storage of fresh tomato. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(4), 2340–2348.
- Zhang D., Zhang Z., Li J., Chang Y., Du Q., P. T. (2017). Vapour pressure deficit control in relation to water transport and water productivity in greenhouse tomato production during summer. *Scientific Reports*, 7, 11.
<https://doi.org/10.1038/srep43461>
- Zhang, D., Du, Q., Zhang, Z., Jiao, X., Song, X., & Li, J. (2017a). Vapour pressure deficit control in relation to water transport and water productivity in greenhouse tomato production during summer. *Scientific Reports*, 7.
<https://doi.org/10.1038/srep43461>
- Zhang, D., Du, Q., Zhang, Z., Jiao, X., Song, X., & Li, J. (2017b). Vapour pressure deficit control in relation to water transport and water productivity in greenhouse tomato production during summer. *Scientific Reports*,

7(August 2016), 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep43461>

Zhang, D., Zhang, Z., Li, J., Chang, Y., Du, Q., & Pan, T. (2015a). Regulation of vapor pressure deficit by greenhouse micro-fog systems improved growth and productivity of tomato via enhancing photosynthesis during summer season. *PLoS ONE*, 10(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133919>

Zhang, D., Zhang, Z., Li, J., Chang, Y., Du, Q., & Pan, T. (2015b). Regulation of Vapor Pressure Deficit by Greenhouse Micro-Fog Systems Improved Growth and Productivity of Tomato via Enhancing Photosynthesis during Summer Season. *PLOS ONE*, 10(7), e0133919. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133919>

4.- Repuesta de conductancia estomática en plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) al déficit de presión de vapor

José Orbelin Gutiérrez Hernández¹, Efrén Fitz Rodríguez*,
J. Armando Ramírez Árias, Irineo L. López Cruz, Agustín Ruiz García.

¹Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO

* Autor para correspondencia efitzr@chapingo.mx , 595-112-1943 (0000-0002-9212-8719)

Resumen

Es importante mencionar que los sistemas de nebulización de alta presión ayudan a mejorar las condiciones de algunas variables meteorológicas como lo son; la temperatura del aire, humedad relativa, temperatura de la hoja de la planta, déficit de presión de vapor de cultivo y el déficit de presión de vapor del

aire, en un espacio cerrado como los son los invernaderos. El sistema de nebulización ayudo a reducir el estrés por el calor y por la baja humedad. Se analizó los efectos que tienen las variables climáticas, temperatura de la hoja del cultivo, humedad relativa y la radiación solar en la conductancia estomática (g_s). Los resultados de estos análisis estadísticos, muestran que mantener el déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c) en el rango de 0.7 a 1.3 kPa se mejora considerablemente la conductancia estomática en cultivo de jitomate en un 54.5%, entre la g_s y el DPV_c se tiene una relación polinomial de segundo orden, disminuyendo la g_s por los extremos. Al aumentar temperatura de la hoja se tiene un efecto negativo en la conductancia estomática, mientras que con la humedad se tiene un efecto positivo, con la condicional de mantenerlo alrededor de 45-80%, de igual manera la radiación solar se tiene un efecto tangible, siempre y cuando se mantenga en un rango ideal el déficit de presión de vapor del cultivo. Se observó que iluminación van de la mano con el DPV_c para tener una buena conductancia estomática en el cultivo de jitomate.

PALABRAS CLAVES: Déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c), Déficit de presión de vapor del aire (DPV_a), Conductancia estomática (g_s), Temperatura de la hoja (T_h), Humedad relativa (HR), Temperatura del aire (T_a), radiación solar (R_s).

4.1 Introducción

Los sistemas de nebulización de alta presión mejoran las condiciones ambientales de un área de producción hortícola (invernadero), mejorando la temperatura (T_a), húmeda relativa del aire (HR), déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c), déficit de presión de vapor del aire (DPV_a) y la temperatura de la hoja (T_h) del cultivo. Al regular estas variables climáticas en un rango ideal para los cultivos se mejora de manera significativa la conductancia estomática (g_s), esta variable biológica (g_s) de las plantas puede ser definida como; el mecanismo fisiológico de la planta necesaria para el intercambio de gases con el fin de lograr un proceso fotosintético óptimo mediante el ajuste de la transpiración de agua

(Francesconi et al 2020). La g_s puede ser caracterizado como el flujo de vapor de agua a través de los estomas, la unidad de medición puede ser en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (m^3 de vapor de agua transferido por m^2 de área foliar por segundo) o $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Al mitigar la temperatura de la hoja, temperatura del aire y el DPV_c y mantener una buena humedad en el interior de un invernadero se mejora la conductancia estomática, la absorción de CO_2 y por lo consecuente una mejor tasa de fotosíntesis en el cultivo (Zhang et al., 2015a). Mantener el DPV_c en los rangos de 0.8 a 1.4 kPa por el día, se mejora considerablemente la apertura estomática en las plantas (Lu et al., 2015; Qiu et al., 2017) y la acumulación de biomasa es mayor (Zhang et al., 2015a), muchos estudios realizados anteriormente describen que el DPV juega un papel muy importante en la apertura estomática y en la transpiración del cultivo (Devi & Reddy, 2018), así como el uso eficiente del consumo de agua en el sistema de riego durante el ciclo del cultivo (Arve et al., 2017). Por otro lado, el alto déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c entre 1.6-6 kPa) crean condiciones indeseables para el crecimiento de plantas de jitomate, favoreciendo el estrés hídrico y llegando al punto del cierre parcial de los poros estomáticos (Jiao et al., 2019). Sin embargo disminuir demasiado el DPV_c alcanzando una humedad relativa del aire $HR > 85\%$, se tiene la problemática de desarrollar estomas que funciona mal (Fanourakis et al., 2016), por lo tanto, aumenta su transpiración y reducido la tolerancia a la desecación cuando se transfieren a condiciones de humedad relativa más baja (Arve et al., 2017).

También se han demostrado que la falta de agua en el aire es uno de los estrés abióticos más importantes que reducen la producción en los cultivos en todo el globo terráqueo, las plantas cierran sus estomas para disminuir la pérdida de agua y mantener el metabolismo celular reduciendo la tasa fotosintética (Dell' et al., 2017), por ende las plantas deben controlar de forma constante su g_s para acceder lo suficiente CO_2 en el tejido mesofílico de la hoja y evitar pérdida de agua innecesaria durante la transpiración, jugando un papel clave en el aumento

de la tasa de fotosíntesis, la productividad de las plantas y la eficiencia del uso de agua (Lawson & Violet-Chabrand, 2019).

La conductancia estomática en los cultivos tiene una relación directa con la intensidad luminosa y el DPV_c , al disminuir la luz en los cultivos también decrece la conductancia estomática del cultivo, así mismo, mantener un déficit de presión alto de 1.5 kPa en adelante o muy bajo (0.0-0.3 kPa) la conductancia estomática es afectada negativamente. Fernandes-Silva et al., (2016), describe que al aumentar el DPV_a la planta tiene una reacción fuerte a la baja en la conductancia estomática y paralelo al estrés hídrico del cultivo. Se ha mencionado que la luz juega también un importante papel en la apertura estomática de los cultivos. Estudios recientes describe que manipular la iluminación en cultivo en invernadero se tiene una mejora en la conductancia estomática durante todo el ciclo de producción hortícola en cultivos de jitomate (Bian et al., 2019; Q. Li et al., 2019) y los mismo sucede en la producción de plantas ornamentales (Sorensen et al., 2020).

El objetivo de esta investigación fue observar como es el comportamiento de la conductancia estomática en un cultivo de jitomate, variando los rangos de DPV_c con un sistema de nebulización de alta presión con ventilación natural, sin manipular la radiación solar. Esta investigación es de suma importancia ya que por medio de la variación del DPV_c se pretende encontrar cual es el rango ideal para tener la mayor apertura estomática durante el día, los hallazgos esperados contribuirán a la mejora en la producción de cultivos para una gestión más eficiente en la producción bajo invernaderos. Pero hay estudios que aun describen que la respuesta estomática en las plantas al DPV sigue siendo un tema controvertido y constituye un buen fundamento de investigación para las generaciones actuales de fisiólogo de plantas (Streck-Nereu. A, 2003).

4.2 Materiales y Métodos

El trabajo de investigación se realizó en un invernadero ubicado en las instalaciones del Área de Energías Alternas y Biosistemas del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, dicho invernadero es de polietileno y es del tipo de doble ala el cual tiene las siguientes características; 10 metros de ancho, 30 metros de largo por 7 metros de alto, piso cubierto de gronwcober blanco, orientado de norte a sur. Cultivado con jitomate saladette pai-pai (*Solanum lycopersicum*), trasplantado el 10 de septiembre de 2019 en fibra de coco industrializado, con una densidad de 3.5 plantas por metro cuadrado, El invernadero está equipado con un sistema de nebulización de alta presión de la empresa Lubing, dicho sistema cuenta con dos líneas laterales, con un total de 30 fogger que pulverizan el agua en gotas de (5-10 μm). Para este trabajo de investigación se realizó activación de todas las boquillas nebulizadoras, las líneas de los nebulizadores se encuentra a 4.5 metros sobre el nivel del suelo, Figura 12.

Las variables climáticas externas se midieron con una estación meteorológica equipado con data logger CR1000 de Campbell scientific, para las variables climáticas en el interior del invernadero como lo es la temperatura y la humedad relativa del aire sensor de HMP50-L, la medición de la temperatura de la hoja del cultivo de jitomate se realizó con sensores infrarrojos Apogee modelo (SI-111 y SI-1S1-SS) Figura 12, los cuales se distribuyeron en secciones en el invernadero, Sur, Centro y Norte, con las mediciones de los sensores infrarrojos y los datos del sensor HMP50-L, se realizó un control ON/OFF que permite cambiar los rangos de DPV_c de manera manual. para medir el comportamiento de la conductancia estomática del cultivo de jitomate.

La toma de los datos sobre la conductancia estomática (g_s) en cultivo de jitomate pai pai, se realizó seis meses después de su trasplante, la determinación de la g_s fue con un porometro de hoja SC-1 portátil (Decagon Diveces Inc., cd, stado, EE.UU). Para medir la g_s se utilizó la metodología descrita por Du et al., (2018),

donde indica que entre la quinta y octava hoja, contándolo de arriba hacia abajo se asegura la madures de la hoja y se asegura que le llega la máxima luminosidad en las mismas, las mediciones se realizaron cada hora iniciándose de las 10 horas a las 16 horas por tres días para cada tratamiento, debido a que esas horas se presenta la mayor incidencia solar del día y por ende la mayor apertura de los estomas, (Arve et al., 2017c) , para una mejor distribución de las mediciones, se realizaron en 15 plantas, una hoja por planta, la distribución de las plantas fue 5 plantas por secciones (Figura 12).

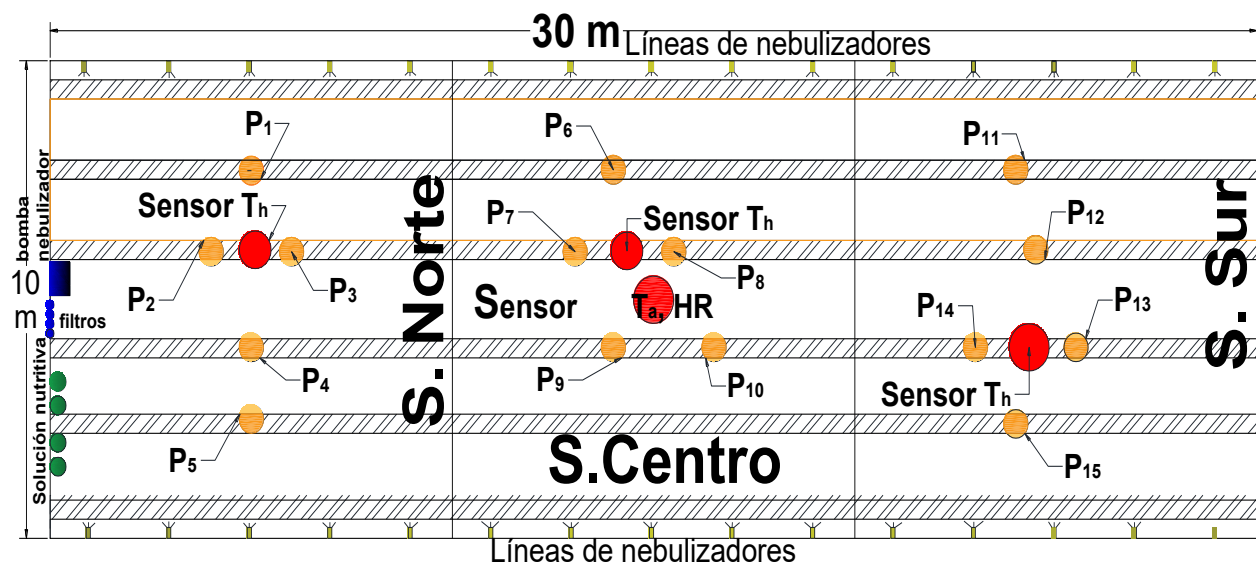


Figura 12. Muestreo de la conductancia estomática en cultivo de jitomate y distribución de los nebulizadores.

4.2.1 Tratamientos de déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c)

La condición de los tratamientos realizados se puede describir de la siguiente manera. Los tratamientos realizados en la investigación para medir la conductancia estomática (g_s), fue modificar el rango del déficit de presión de Vapor del cultivo (DPV_c), los tratamientos realizados fueron, de 0.4 kPa, 0.7 kPa, 1.0 kPa, 1.3 kPa, 1.6 kPa, 1.9 kPa y el tratamiento sin control del DPV_c , esto con la finalidad de saber en qué condiciones se obtiene una mejor apertura

estomática en cultivo de jitomate saladette en la región, cada tratamiento se realizó por tres días.

4.2.2 Análisis estadístico

Para probar que algunos de los tratamientos fueron significativamente diferentes entre uno y otro, se utilizó el análisis de varianza de medidas (ANOVA), las comparaciones de medias se realizaron mediante la prueba de Tukey ($P < 0.05$), esto con la finalidad de determinar el efecto de los tratamientos de DPV_c en la conductancia estomática del cultivo de jitomate.

4.3 Resultados y Discusiones

4.3.1 Comportamiento del clima en el interior del invernadero con los diferentes rangos de déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c)

Variar los rangos de déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c), tiene efectos significativos en variables internas que está directamente relacionadas como lo es la temperatura de la hoja (T_h), temperatura (T_a) y la humedad relativa (HR) del aire, de igual manera se midieron variables externas, Radiación solar (Rs), temperatura del aire (T_{a-e}) y la humedad relativa (HR_e) (Cuadro 7). Mantener un DPV_c en los rangos de 0.4-1.3 kPa la conductancia estomática aumento significativamente de igual manera la humedad relativa del ambiente comparado cuando el DPV_c aumenta de 1.3-2.6 kPa la conductancia estomática disminuyo significativamente, de igual manera la humedad relativa (Cuadro 6). McAdam & Brodribb, (2015) reporta la disminución de la g_s debido al cierre de los estomas al aumentar gradual del DPV_a de 0.7 a 1.5 kPa en especies leñosas. Por otro lado, Fernandes-Silva et al., (2016), describe que la disminución de la conductancia estomática al aumento del DPV_a , se debe a los efectos asociados a la disminución de la sequía en la conductancia hidráulica específica de las hojas y por el bajo contenido de agua en el aire, .

Es importante mencionar que para alcanzar el DPV_c bajo (0.4 y 00.7 kPa) fue necesario cerrar casi por completo las ventanas lateras del invernadero, ocasionando un aumento en la temperatura del aire de igual manera la humedad relativa, esto se debió a la baja ventilación en el interior del invernadero. Manipular el DPV_c se tiene un aumento de 0.3 kPa en cada uno de los tratamientos en el DPV_a , esto debe a la diferencia de temperatura entre el aire y la temperatura de la hoja, estos resultados obtenidos en el DPV_a concuerdan con lo reportado por (Argus Lts, 2009).

Cuadro 6. Efecto de la variación del déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c), variables que están relacionadas como la temperatura y humedad relativa del aire, la temperatura de la hoja del cultivo, conductancia estomática (g_s) del cultivo de jitomate, así como variables del exterior que influyen en las condiciones del invernadero.

Trata
mient
os

DPV_c kPa	g_s $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	T_h (°C)	T_a (°C)	HR (%)	Rs ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	T_{a-e} (°C)	HR_e (%)
0.4	657.1±86.1	26.98±2.1	28.5±2.6	81.79±4.8**	771.92±208	24.29±2	25.52±5.1
0.7	672.8±90.5	25.95±1.3	27.51±2.2	72.48±7.8**	792.58±151	22.22±2.1	31.76±6.5
1.0	782.3±71.5	21.1±1.6*	23.13±1.6**	53.65±4.5*	779.9±219	22.52±2.1	23.67±6.6
1.3	662.6±98.5	22.9±1.2*	25.7±1.4*	45.73±4.6	768.7±128	23.16±1.8	29.93±6.2
1.6	517.6±54.5	23.8±0.8*	27.02±1.4	38.43±3	801.4±104	25.76±2.7*	14.45±5.6*
1.9	449.5±32.5	25.43±0.7	27.38±0.9	37.31±3.9	805.5±114	24.19±2.4	24.83±9.9
S/C	426.2±52.9	25.86±1.7	31.35±2.2	14.36±3.8	903.1±125	26.45±2.2*	13.87±4.1*

Comparaciones de medias se realizaron mediante la prueba de Tukey ($P<0.05$), esto con la finalidad de determinar el efecto de los tratamientos en la conductancia estomática (g_s) del cultivo de jitomate.

Del cuadro 7, es necesario recalcar que el efecto más significativo en el clima del invernadero es la humedad relativa del aire, ya que al disminuir la humedad relativa por debajo de los 40% el DPV_c y DPV_a se incrementa escalonadamente, este aumento del DPV_c provoca una disminución de la conductancia estomática significativamente, estudios anteriores reportan que al tener un DPV_a alto

ocasionan un cierre casi parcial de los estomas (Carins Murphy et al., 2014), por lo tanto, una disminución de absorción de CO₂ para fotosíntesis y una pérdida considerable de agua a través de la transpiración (Lawson & Violet-Chabrand, 2019).

4.3.2 Efecto de la variación déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c) en la conductancia estomática en cultivo de jitomate.

La conductancia estomática (g_s) en la planta de jitomate puede ser afectado por diferentes factores ambientales, radiación solar (R_s), temperatura del aire (T_a) y temperatura de hoja (T_h), humedad relativa (HR) y DPV_c . De acuerdo a los resultados obtenidos la g_s fue afectado por las variaciones en los diferentes rangos de déficit de presión de vapor del cultivo (DPV_c), en muchos de los casos la respuesta estomática de la planta no es lineal debido a los factores externos que lo afectan directa o indirectamente en la apertura de los estomas, por otro lado, mantener el número de poros abiertos por el resto del día es muy complicado debido a que las plantas nunca están en equilibrio termodinámico con el ambiente, ya que el ambiente está en constante cambio con respecto al tiempo. De acuerdo a los resultados obtenidos en las mediciones en la conductancia estomática con la variación del DPV_c , tiene una representación polinomial de segundo orden, con disminución por ambos extremos de la parábola con respecto al déficit de presión de vapor del cultivo. Mientras tanto, los resultados obtenidos muestran que si se incrementa el DPV_c de 1.6-2.0 kPa la conductancia estomática se ve afectado negativamente, por otro lado, si el DPV_c es inferior de 0.4 a 0.7 kPa también es reducido la g_s en un grado que no es significativo Figura 13.

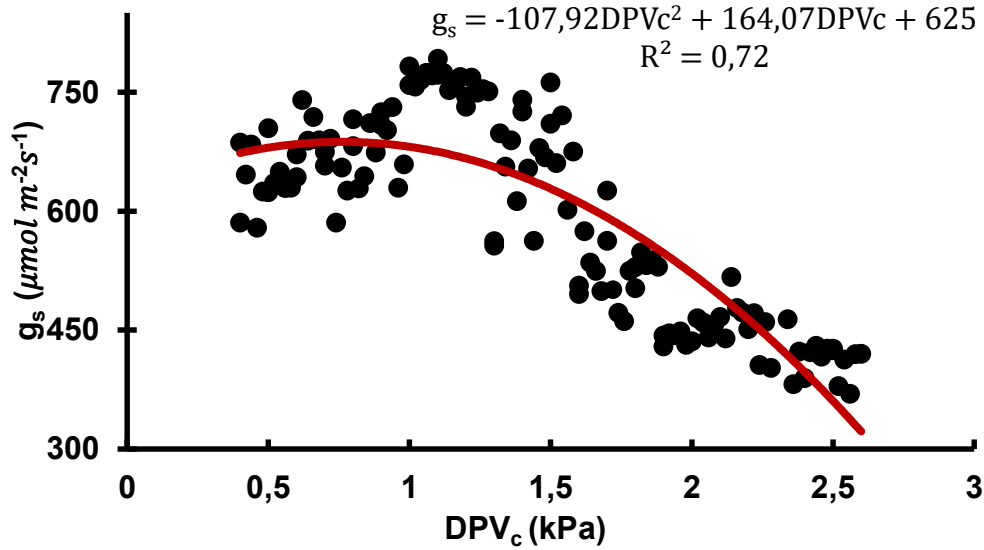


Figura 13. Relación de la conductancia estomática y el déficit de presión de vapor de cultivo (DPV_c) en cultivo de jitomate.

La relación de la conductancia estomática y el déficit de presión de vapor del cultivo (DPV_c) es descrita por una ecuación polinomial de segundo orden (Ecuación 6), en donde se puede ver que es afectado de manera negativa por los extremos Figura 13.

$$g_s = -107.92DPV_c^2 + 164.07DPV_c + 625 \quad (6)$$

$$(R^2 = 0.72)$$

Esta ecuación indica la relación inversamente proporcional entre la conductancia estomática y el DPV_c , en la cual, un incremento en DPV_c trae consigo una disminución de la conductancia estomática en el cultivo de jitomate. De igual manera esta ecuación describe que cuando el DPV_c tiende a cero, la conductancia estomática no es mínima, la mínima se alcanza cuando el DPV_c se incrementa 2 kPa en adelante, llegando a cerrar los poros de los estomas cuando llega a un nivel crítico de DPV_c , de acuerdo a Choudary and Monteith, (1986), el valor crítico de DPV_c en el que la conductancia es cercano a cero y el valor no varía entre diferentes especies de cultivos, es considerado entre los 7 kPa.

La reducción de la conductancia estomática en un rango más bajo que el óptimo ($DPV_c=1.1$ kPa), se puede deber a la concentración excesiva de humedad en el ambiente, en la cual la presión de vapor del aire es bajo, siendo unos de los parámetros importante para el flujo de agua en las hojas. Sin embargo, cuando se aumenta el DPV_c por arriba de los rangos recomendados por Shamshiri et al., (2017) de 0.8 a 1.3 kPa, la conductancia estomática es reducida ampliamente por la baja humedad y por el incremento de la temperatura del aire, así como la temperatura de la hoja, Figura 14. Du et al., (2018) observo este mismo comportamiento de la reducción de la conductancia estomática cuando el DPV_c se incrementa, además, reporta que al reducir la g_s la tasa de fotosíntesis neta también es afectado negativamente. Las observaciones realizadas en la conductancia estomática para este trabajo concuerdan con lo reportado por Devi & Reddy (2018), de igual manera describen que la disminución de la conductancia estomática aun DPV_c alto se debe al mantener el potencial hídrico de la hoja para reducir el daño en la misma.

La reducción del déficit de presión de vapor del aire (DPV_a) alivia la apertura de los estomas en los cultivos producidos bajo invernaderos, por el contrario, el cierre de los estomas y el estrés hídrico en el cultivo se da por el aumento del DPV_a (McAdam et al., 2016). De acuerdo Zhang et al 2017 y Qiu et al., (2017), mantener el déficit de presión vapor bajo (0.7 a 1.4 kPa) se mejora la conductancia estomática y también se mejora el aprovechamiento del agua de riego de manera significativa, de igual manera Lu et al., (2015) reporta, mantener en los rangos de 0.8 a 1.4 kPa se mejora considerablemente la conductancia estomática en cultivos de jitomate y crece la biomasa del cultivo. Al mantener los estomas abiertos también se mejora la absorción de CO_2 intracelular, así mismo se mejora la tasa de fotosíntesis neta considerablemente, estos resultados lo describe Jiao et al., (2019), investigación basado en la coordinación del déficit de presión de vapor entre el CO_2 y la regulación de la fotosíntesis en cultivo de jitomate.

Mantener DPV_c un rango de 0.9 a 1.1 kPa en el interior del invernadero la conductancia estomática es favorecida considerablemente en la planta de jitomate; así mismo, al mejorar la conductancia estomática se mantiene abierto los estomas permitiendo el intercambio de la entrada de CO_2 (Gil-Marín et al., 2006). Esta mejora de la g_s se debe por las condiciones que se genera con el sistema de nebulización, se reduce la temperatura del aire y la T_h , por otro lado, la humedad del aire aumento ampliamente comparado con los tratamientos que se mantuvieron un DPV_c alto, en la Figura 14, se puede observar el comportamiento de la conductancia estomática con respecto a los diferentes tratamiento de déficit de presión de vapor del cultivo.

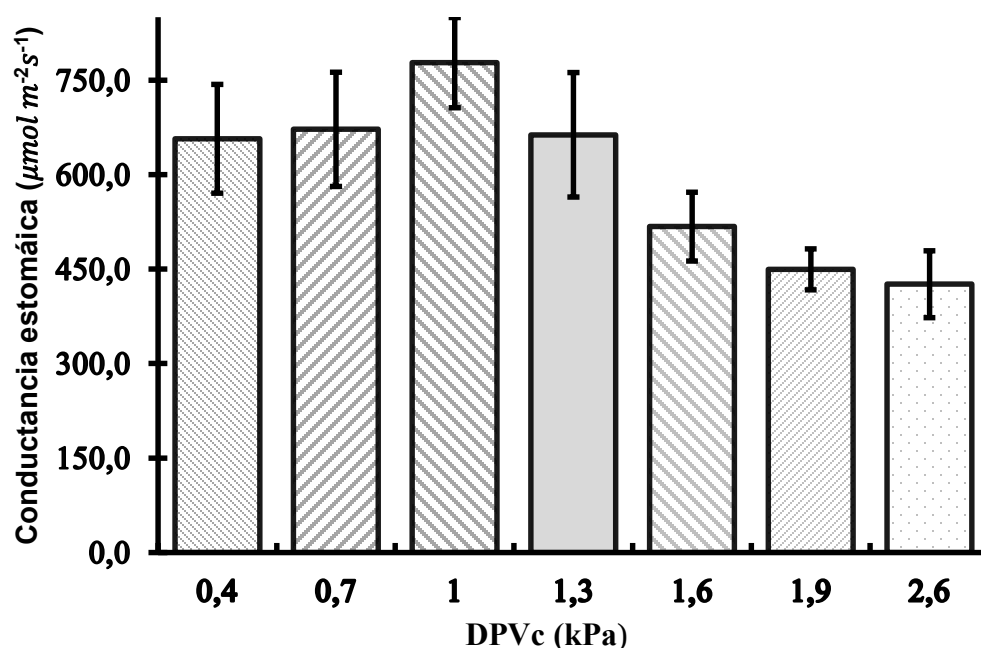


Figura 14. Respuesta de la conductancia estomática de acuerdo a los diferentes tratamientos de DPV_c con sistema de nebulización de alta presión, implementado en un cultivo de jitomate con ventilación natural. Las comparaciones de medias se realizaron mediante la prueba de Tukey ($P < 0.05$).

Mantener el déficit de presión de vapor del cultivo (DPV_c) dentro de los intervalos de 0.7 a 1.3 kPa, la apertura estomática se favorece, y se puede observar que

hay una mayor conductancia estomática. Cuando DPV_c es mayor de 1.3 kPa en adelante la conductancia estomática disminuye considerablemente.

El cultivo de jitomate mostro una respuesta de la conductancia estomática escalonada, de 0.4 a 1.0 kPa positivamente, mientras, que cuando se rebaso el umbral de 1.0 kPa la conductancia estomática tuvo una respuesta negativa, esto se debió al aumento del DPV_c que afecto la apertura de los estomas. Resultados reportados por Arve et al., (2017) y Li et al., (2019), indicaron que si se mantiene el DPV_a en los rangos de 0.36 a 1.43 kPa se mejora la apertura estomática y se maximiza el consumo de agua durante el crecimiento en cultivo de jitomate. Por otro lado, si se mantiene un DPV_c bajo se mejora considerablemente la tasa de fotosíntesis neta en las plantas cultivadas, de la misma manera se mejora el intercambio de CO_2 planta-aire (Zhang et al., 2017a).

4.3.3 Relación de la conductancia estomática con la temperatura de la hoja de cultivo (T_h)

La temperatura de la hoja del cultivo (T_h) juega un papel muy importante en la conductancia estomática (g_s), así como la temperatura del aire. Las plantas cultivadas en invernadero abren sus estomas en el día a temperatura intermedias, cuando se tiene luz suficiente y el gradiente de concentración de vapor entre el aire y hoja es pequeño. La relación conductancia estomática y temperatura describen que, si se mantiene a una temperatura promedio de la hoja entre 18 y 22 °C, la apertura de los estomas se ven favorecidas. Por otro lado, si se aumenta la temperatura de la hoja por el día a partir de un valor crítico, la conductancia estomática es reducida considerablemente, en trabajos previos estos mismos efectos fueron observados en cultivos de trigo por Francesconi y Balestra (2020), de igual manera Qiu et al., (2017), reporta que se tiene una disminución de la g_s de un 70% cuando la temperatura de hoja aumenta de 20 a 35 °C estos efectos fueron observado en cultivo de frambuesa roja, por lo consiguiente una disminución de la tasa de fotosíntesis neta, Leyva et al., (2015) describe que al aumentar la temperatura se tiene condiciones de estrés hídrico

retardando la acumulación de agua por parte de los fruto de jitomate, llevando a una producción frutos pequeños durante la producción en verano. En la Figura 15, se puede observar el efecto que tiene la temperatura de la hoja en la g_s al aumentar o al disminuir dicha variable.

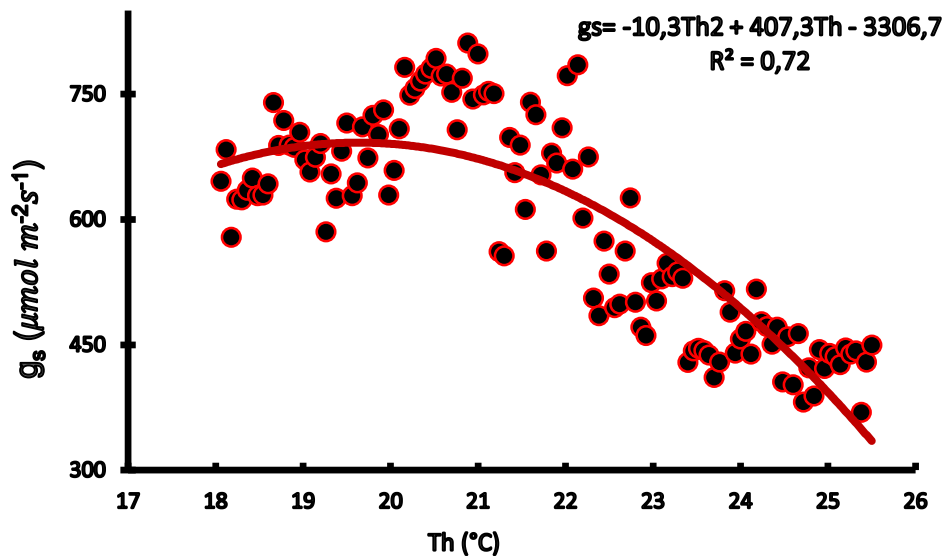


Figura 15. Efecto de la temperatura de la hoja en la conductancia estomática en cultivó de jitomate. Esta variable tiene un efecto negativo en la apertura estomática al aumentar la temperatura de la hoja.

Al aumentar la temperatura de la hoja por arriba de los 23 °C se afecta la apertura de los estomas negativamente, el cierre de los estomas de las plantas lo realiza para protegerse a sí mismo y para evitar la pérdida de agua, los resultados obtenidos en el presente trabajo Gil-Marín et al., (2006) también observo similarmente estos efectos en la conductancia estomática en sábila. Estudios realizados por Devi & Reddy (2018), aumentar la temperatura de la hoja tiene un impacto en la fotorrespiración del cultivo causando una acumulación de temporal del CO₂ interno y por consecuente una disminución de la conductancia estomática.

Aumentar la temperatura de la hoja puede provocar estrés hídrico hasta llegar al punto de marchitamiento del cultivo, por lo consiguiente el cerrado pasivo de los poros estomáticos, de acuerdo Fernandes-Silva et al., (2016), al aumentar la temperatura y mantener una baja humedad se incrementa el *DPV* provocando la disminución del potencial hídrico de las hojas y por consecuente el cierre parcial de los estomas.

4.3.4 Relación de la conductancia estomática con la humedad relativa del aire (*HR*).

Unas de las variables que influye directamente en la apertura estomáticas es la humedad relativa (*HR*) del aire, mantener un promedio de humedad de un 60% ayuda a la conductancia estomática de manera positiva, esto se puede deber a la hidratación de las hojas por el contenido de agua en el aire, pero al exceder por arriba de los 85% de humedad en el ambiente es afectada negativamente, de la misma manera si la humedad es reducida por debajo de 40% por el día, la conductancia estomática es afectada de manera negativa. Estos efectos se pueden observar claramente en la Figura 16, en donde la humedad relativa es directamente proporcional a la conductancia estomática del cultivo de jitomate. Por otro lado, Bakker (1991) y Yaaran et al., (2019) al estudiar los efectos de la humedad en la apertura estomática en cultivos de invernadero, encontraron que mantener la humedad alta es favorecida positivamente la conductancia estomática de la hoja y se incrementa el intercambio de CO₂. Al reducir la humedad del ambiente el *DPV_c* es aumentado exponencialmente, por lo que se disminuye la conductancia estomática del cultivo, por el bajo contenido de agua en el aire.

De acuerdo a lo observado en la Figura 16, moderar la humedad relativa y la temperatura del aire, se mejora considerablemente la apertura estomática en el cultivo de jitomate, consecuentemente la conductancia estomática es mejorada. Estos mismos resultados fueron observados por Arve et al., (2017), al evaluar la

conductancia estomática en cultivos de jitomate con diferentes tratamientos de humedad y DPV_a .

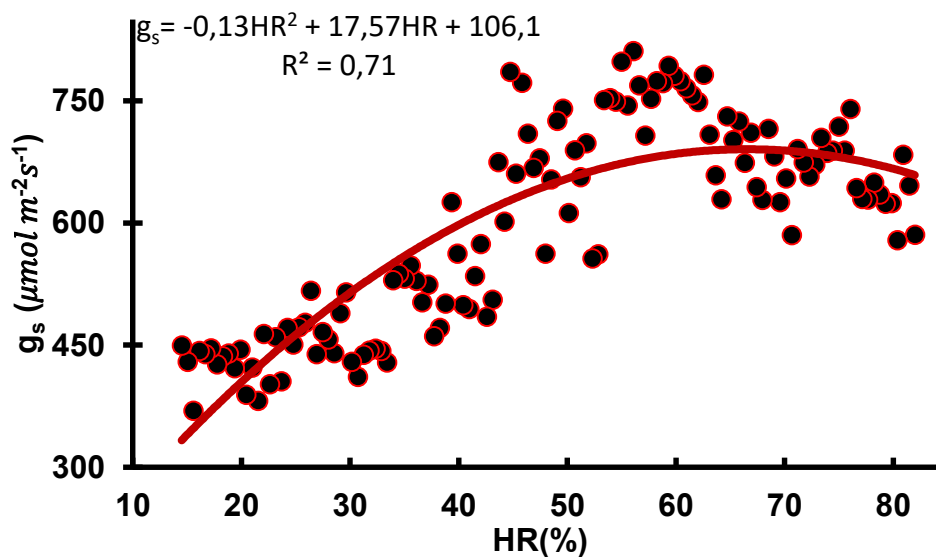


Figura 16. Efecto de la humedad relativa en la conductancia estomáticas en cultivo de jitomate. Esta variable climática tiene una relación positiva al incremento de la humedad.

Mantener en los rangos de 50 a 80 % de humedad relativa en los cultivos bajo protección, se mejora el funcionamiento de los estomas considerablemente de las plantas Figura 16, en trabajos anteriores describen que mantener de 51 a 87% se mejora considerablemente al respuesta estomática en los cultivos como *A. Thaliana*, (Fanourakis et al., 2016), *Lycopersicon esculentum* (Arve et al., 2017), trabajo realizado por Zhang et al., (2015), describe que si se tiene una buena humidificación en el interior del invernadero de manera homogénea se garantiza una buena apertura estomática, ganancia de carbono fotosintético en todo el cultivo y reducción de fluctuaciones del entorno del invernadero aliviando el estrés por calor. Así mismo, mantener una humedad adecuada en el interior de un invernadero se favorece la absorción de nutrientes por las raíces y a los órganos superior del cultivo (Fanourakis et al., 2016).

Mantener la humedad alta en cultivos bajo invernadero se mejora la conductancia estomática positivamente, pero mantener la $HR \geq 85\%$ esto puede ocasionar problemas cuando se transportan a condiciones de alta demanda evaporativa, llegando hacer propensas al marchitamiento y mal funcionamiento de los estomas (Arve et al., 2013), así como también el riesgo de letalidad por estrés abiótico y biótico (Fanourakis et al., 2020). De igual manera Bakker (1991) describe que al mantener la humedad alta hay una alta probabilidad de producir estomas sensibles y débiles, llegando al punto de enfermarse debido a la baja resistencia a algunas enfermedades que se presentan durante el ciclo del cultivo. Al tener mal formaciones de los estomas provocada por la alta humedad, provoca trastorno por la deficiencia de Ca debido a la baja tasas de transpiración de las hojas como fuerza impulsora del Ca (Ho & White, 2005). Por el otro extremo de la gráfica (Figura 16) cuando la humedad es demasiado baja se tiene estrés hídrico debido al bajo contenido de agua en el ambiente, esta falta de agua en el aire ocasiona estrés hídrico y trastorno por deficiencia de Ca provocando pudrición del extremo de la flor en cultivos de jitomates (Tonetto et al., 2014).

4.3.5 Efecto de la radiación solar (R_s) en la conductancia estomática (g_s)

Se han descritos las variables climáticas que están directamente relacionadas con el déficit de presión de vapor del cultivo (DPV_c) y los efectos negativos y positivos que se tiene en la conductancia estomática en el cultivo de jitomate.

Es importante describir, así como la temperatura de la hoja (T_h), Temperatura del aire (T_a), Humedad relativa (HR) y DPV_c , también la radiación solar (R_s) es uno de los factores que ayudan a la apertura estomática de los cultivos. En la siguiente Figura 17, se puede observar el efecto que se tiene en la conductancia estomática al controlar el DPV_c en un rango de 0.9 a 1.0 kPa, (línea azul), línea negra sin intervención del control DPV_c y la radiación solar (línea roja), estudios posteriores realizado por Stanghellini (1987) describe que los factores climáticos que afecta negativamente la conductancia estomática son; T_h , T_a , HR , la concentración de CO_2 en el ambiente y la nutrición de mineral.

Al aumentar la intensidad luminosa de igual manera la conductancia estomática se incrementa significativamente (con control de DPV_c). Sin embargo, cuando no se tiene un control de DPV_c la g_s decrece, esto decremento se puede deber al cierre de los poros estomático por el incremento de DPV_c , estos mismos resultados fueron reportados por Medrano-Cortes (1999), en donde describe que la apertura estomática es favorecida por el incremento de la radiación solar. La conductancia estomática y la radiación solar es descrita por una función hiperbólica, donde la apertura estomática es favorecida cuando la radiación solar aumenta durante el día, por otro lado, la conductancia estomática es afectado cuando la radiación solar disminuye. Estudios posteriores realizado por Burrows y Milthorpe (1976) representa matemáticamente la conductancia estomática entre la radiación solar como una función hiperbólica.

También se puede observar que la conductancia estomática en función de las horas del día tiene una representación polinomial de segundo orden (Figura 17), donde la apertura estomática es favorecida cuando se tiene la hora solar con más incidencia, y disminuye cuando la hora de incidencia de la radiación solar es menor, estos mismos resultados fueron reportados por Drake et al., (2013), Lawson & Vialet-Chabrand, (2019) donde el aumento de la g_s crece en respuesta a un acrecentamiento escalonado de la luz, está relación positiva con la irradiación en el día lo describen como una función polinomial de segundo orden. Es importante mencionar que esta representación se obtiene cuando se controla DPV_c , sin embargo, cuando no se controla el déficit de presión de vapor del cultivo se tiene una líneas altas-bajas, en donde la conductancia estomática es afectada negativamente, esta disminución de la g_s es porque la planta se protege para evitar el estrés hídrico en la planta por el alto DPV_c y por la baja humedad en aire (Gil-Marín et al., 2006).

La respuesta estomática a la luz y al DPV_c tiene una respuesta positivamente, mantener una buena luminosidad y controlar el DPV_c en los rangos de 0.8 a 1.2 kPa, se garantiza una buena apertura estomática del cultivo en este caso jitomate. Sin embargo mantener DPV_c elevados entre 1.5 a 2.6 kPa aun teniendo

buena luminosidad la conductancia estomática es afectada negativamente hasta un 56% menos que cuando se controla el *DPV_c* (Figura 17), resultados similares fueron reportados por O’Carrigan et al., (2014), en donde observo diferentes rangos de irradiancia de luz en cultivos de jitomate, obtuvieron respuestas negativa a la conductancia estomática con mucha luz y *DPV* alto.

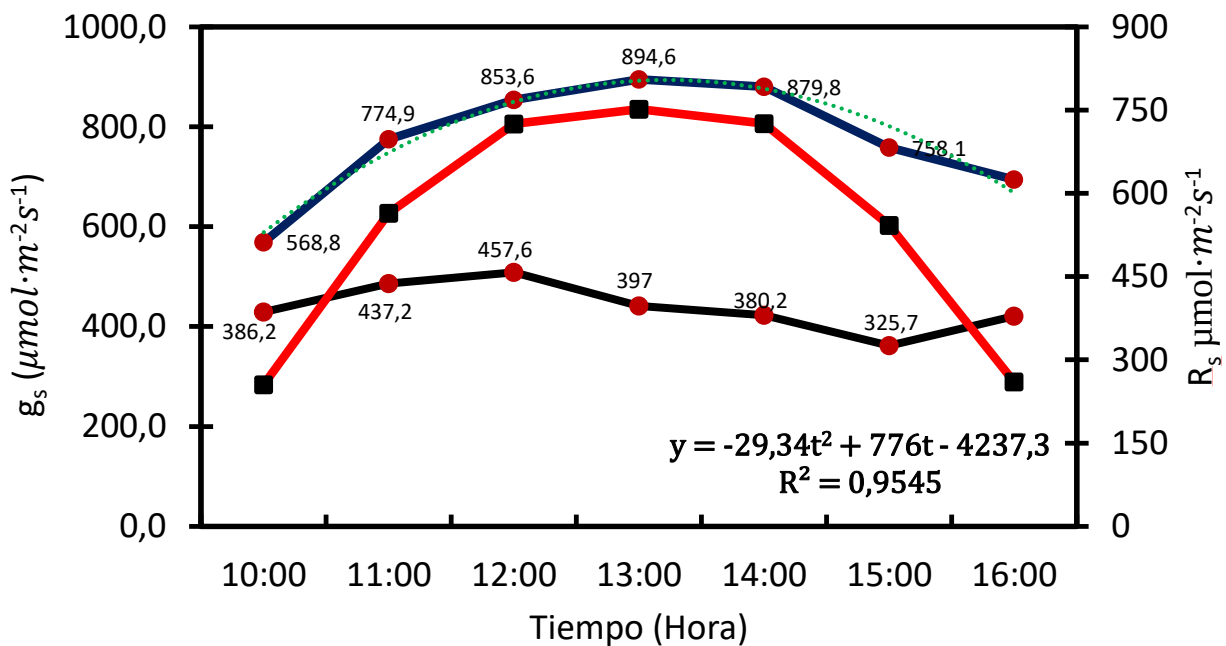


Figura 17. Respuesta de la conductancia estomática con respecto a la hora del día, conductancia estomática con control de *DPV_c* (Línea azul), respuesta estomática sin control de *DPV_c* (Línea negra), radiación solar PAR (Línea roja). Las horas representadas son el tiempo en las que se realizaron las mediciones.

Es importante describir que la conductancia estomática va muy de la mano con la radiación solar y el control de *DPV_c*, estudios anteriores reportan que mantener una buena radiación solar alrededor de 400 a 800 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y controlar el *DPV_c* en un rango de 0.8 a 1.2 kPa la apertura estomática se mejora significativamente (Medrano-Cortes, 1999). Estudios recientes reportan también que mantener una iluminación homogénea aplicando luz LED a lo largo del dosel vertical se mejora

la conductancia estomática y la absorción de CO₂ en cultivo de jitomate (Bian et al., 2019; Q. Li et al., 2019), por otro lado, Sorensen et al., (2020) reporta que controlar iluminación en los cultivos se mejora la conductancia estomática y la pérdida de agua durante la producción en flores (*Passiflora*).

4.4 Conclusiones

De esta investigación se pudo constatar que controlar el DPV_c en un rango de 0.4 a 1.3 kPa mediante sistema de nebulización de alta presión, se mejora las condiciones ambientales en el interior del invernadero, disminuyendo las fluctuaciones de la temperatura de la hoja y la humedad relativa. Los resultados encontrados describen que mantener el DPV_c en el rango de 0.7 a 1.3 kPa se mejora considerablemente la conductancia estomática en un 54.5%. Por otro lado, la conductancia estomática tiende a disminuir cuando el $DPV_c \geq 1.3$ kPa.

También se pudo observar de las variables climáticas que están directamente relaciona con la apertura estomáticas como lo es; T_h , T_a , HR , Rs y el DPV_c , de los datos meteorológicos se pudo determinar que mantener la T_h en un rango de 21 a 25 °C y una humedad relativa entre 45-81% se mejora significativamente la conductancia estomática.

De este trabajo también se alcanzó observar que la radiación solar, así como el DPV_c juegan un papel muy importante en la conductancia estomática del cultivo en específico el jitomate, ya que al disminuir la radiación solar la conductancia estomática tiende a disminuir negativamente aun controlando el DPV_c en el rango de 0.7 a 1.3 Kpa.

4.5 Referencias

Ahemd, H. A., Al-Faraj, A. A., & Abdel-Ghany, A. M. (2016). Shading greenhouses to improve the microclimate, energy and water saving in hot regions: A review. *Scientia Horticulturae*, 201, 36–45.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.01.030>

- Al-Helal, I. M., & Abdel-Ghany, A. M. (2010). Responses of plastic shading nets to global and diffuse PAR transfer: Optical properties and evaluation. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 57(2), 125–132.
<https://doi.org/10.1016/j.njas.2010.02.002>
- Al-Helal, Ibrahim M. (2007). Effects of Ventilation Rate on the Environment. *Applied Engineering in Agriculture*, 23(2), 221–230.
- Amer, O., Boukhanouf, R., & Ibrahim, H. G. (2015). A Review of Evaporative Cooling Technologies. *International Journal of Environmental Science and Development*, 6(2), 111–117. <https://doi.org/10.7763/ijesd.2015.v6.571>
- Arbel, A., Barak, M., & Shklyar, A. (2003). Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses. *Biosystems Engineering*, 84(1), 45–55. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(02\)00216-7](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(02)00216-7)
- Arbel, A., Yekutieli, O., & Barak, M. (1999). Performance of a fog system for cooling greenhouses. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 72(2), 129–136. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0351>
- Arellano, D. L., & Valera, M. (2011). *Natural and Forced Ventilation in Almeria-Type Greenhouse and its Relationship to Tomato Yield VENTILACIÓN NATURAL Y FORZADA DE INVERNADEROS TIPO ALMERÍA*. January 2018.
- Arellano García, M., Valera Martínez, D., Urrestarazu Gavilán, M., García Garza, S., Sánchez Salas, J., & Soria Ruiz, J. (2006). Estudio del microclima en dos subtipos de invernaderos Almería. *Agricultura Técnica En México*, 32(2), 225–234.
- Argus, 2009. Controls. (2009). *Understanding and Using Firewalls*. January.
- Arve, L. E., Kruse, O. M. O., Tanino, K. K., Olsen, J. E., Futsæther, C., & Torre, S. (2017a). Daily changes in VPD during leaf development in high air humidity increase the stomatal responsiveness to darkness and dry air. *Journal of Plant Physiology*, 211, 63–69.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.011>

- Arve, L. E., Kruse, O. M. O., Tanino, K. K., Olsen, J. E., Futsæther, C., & Torre, S. (2017b). Daily changes in VPD during leaf development in high air humidity increase the stomatal responsiveness to darkness and dry air. *Journal of Plant Physiology*, 211, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.011>
- Arve, L. E., Kruse, O. M. O., Tanino, K. K., Olsen, J. E., Futsæther, C., & Torre, S. (2017c). Daily changes in VPD during leaf development in high air humidity increase the stomatal responsiveness to darkness and dry air. *Journal of Plant Physiology*, 211, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.011>
- Arve, L. E., Terfa, M. T., Gislerød, H. R., Olsen, J. E., & Torre, S. (2013). High relative air humidity and continuous light reduce stomata functionality by affecting the ABA regulation in rose leaves. *Plant, Cell and Environment*, 36(2), 382–392. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02580.x>
- ASHARAE HANDBOOK, 2017. (2017). *ASHARAE HANDBOOK, 2017* (A. H. Fundamentals (ed.); I-P Editio). 2017.
- Bakker, J. C. (1991). Effects of humidity on stomatal density and its relation to leaf conductance. *Scientia Horticulturae*, 48(3–4), 205–212. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(91\)90128-L](https://doi.org/10.1016/0304-4238(91)90128-L)
- Bertin, N., Guichard, S., Leonardi, C., Longuenesse, J. J., Langlois, D., & Navez, B. (2000). Seasonal evolution of the quality of fresh glasshouse tomatoes under Mediterranean conditions, as affected by air vapour pressure deficit and plant fruit load. *Annals of Botany*, 85(6), 741–750. <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1123>
- Bian, Z., Zhang, X., Wang, Y., & Lu, C. (2019). Improving drought tolerance by altering the photosynthetic rate and stomatal aperture via green light in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings under drought conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 167(April), 103844. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103844>

- Carins Murphy, M. R., Jordan, G. J., & Brodribb, T. J. (2014). Acclimation to humidity modifies the link between leaf size and the density of veins and stomata. *Plant, Cell and Environment*, 37(1), 124–131.
<https://doi.org/10.1111/pce.12136>
- Choudary and Monteith. (1986). Implications of stomatal response to saturation deficit for the heat balance of vetative. *Agricultural and Forest Medology*, 36 (1986) 215-225. *Elvevier Science Publishers B.V., Amsterdam-Printed in the Netherlands.*, 36(MD 20771 (U.S.A.)), : pp. 83-94.
- Dell', J. M., Rodríguez, A., & Morales Guevara, D. M. (2017). *Stomatal conductance behavior of two Cuban tomato varieties in field conditions and limited irrigation*. 38(2), 137–144. <http://ediciones.inca.edu.cu>
- Devi, M. J., & Reddy, V. R. (2018). Transpiration response of cotton to vapor pressure deficit and its relationship with stomatal traits. *Frontiers in Plant Science*, 871(October), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01572>
- Drake, P. L., Froend, R. H., & Franks, P. J. (2013). Smaller, faster stomata: Scaling of stomatal size, rate of response, and stomatal conductance. *Journal of Experimental Botany*, 64(2), 495–505.
<https://doi.org/10.1093/jxb/ers347>
- Du, Q., Xing, G., Jiao, X., Song, X., & Li, J. (2018). Stomatal responses to long-term high vapor pressure deficits mediated most limitation of photosynthesis in tomatoes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40(8), 0.
<https://doi.org/10.1007/s11738-018-2723-7>
- Fakhrabadi, F., & Kowsary, F. (2016). Optimal design of a regenerative heat and mass exchanger for indirect evaporative cooling. *Applied Thermal Engineering*, 102, 1384–1394.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.115>
- Fanourakis, D., Aliniaiefard, S., Sellin, A., Giday, H., Körner, O., Rezaei Nejad, A., Delis, C., Bouranis, D., Koubouris, G., Kambourakis, E., Nikoloudakis, N., & Tsaniklidis, G. (2020). Stomatal behavior following mid- or long-term

- exposure to high relative air humidity: A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 153, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.05.024>
- Fanourakis, D., Bouranis, D., Giday, H., Carvalho, D. R. A., Rezaei Nejad, A., & Ottosen, C. O. (2016). Improving stomatal functioning at elevated growth air humidity: A review. *Journal of Plant Physiology*, 207, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.10.003>
- Fernandes-Silva, A. A., López-Bernal, Á., Ferreira, T. C., & Villalobos, F. J. (2016). Leaf water relations and gas exchange response to water deficit of olive (cv. Cobrançosa) in field grown conditions in Portugal. *Plant and Soil*, 402(1–2), 191–209. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2786-9>
- Fitz-Rodríguez, E., Kacira, M., Guerrero, F. V., Kubota, C., Giacomelli, G., Linker, R., & Arbel, A. (2010). Dynamic response and environmental uniformity of a naturally ventilated greenhouse cooled with a variable-pressure fogging system. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2010, ASABE 2010*, 6(10), 4727–4742. <https://doi.org/10.13031/2013.29906>
- Francesconi, S., & Balestra, G. M. (2020). The modulation of stomatal conductance and photosynthetic parameters is involved in Fusarium head blight resistance in wheat. *PLoS ONE*, 15(6 June), 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235482>
- Fuchs, M., & Stanghellini, C. (2018). The functional dependence of canopy conductance on water vapor pressure deficit revisited. *International Journal of Biometeorology*, 62(7), 1211–1220. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1524-4>
- Gates, R. S., & Mach, C. A. (2017). Vapor Pressure Deficit Control Algorithm for Plant Studies. *IFAC Proceedings Volumes*, 33(29), 129–134. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)36764-2](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)36764-2)
- Gates, R. S., Zolnier, S., & Buxton, J. (1998). Vapor Pressure Deficit Control Strategies for Plant Production. *IFAC Proceedings Volumes*, 31(12), 271–

276. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)36076-7](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)36076-7)
- Gázquez, J. C., López, J. C., Baeza, E., Pérez-Parra, J. J., Fernández, M. D., Baille, A., & González-Real, M. (2008). Effects of vapour pressure deficit and radiation on the transpiration rate of a greenhouse sweet pepper crop. *Acta Horticulturae*, 797, 259–266.
- Ghani, S., Bakochristou, F., ElBialy, E. M. A. A., Gamaledin, S. M. A., Rashwan, M. M., Abdelhalim, A. M., & Ismail, S. M. (2019). Design challenges of agricultural greenhouses in hot and arid environments – A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12(1), 48–70. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.09.004>
- Ghoulem, M., El Moueddeb, K., Nehdi, E., Boukhanouf, R., & Kaiser Calautit, J. (2019). Greenhouse design and cooling technologies for sustainable food cultivation in hot climates: Review of current practice and future status. *Biosystems Engineering*, 183, 121–150. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.016>
- Gil-Marín, J. A., Rodríguez, R., Cantú, D. J., & Zermeño, A. (2006). Resistencia Estomática , Transpiración Y Potencial Hídrico. *Terra Latinoamericana*, 24(3), 355–365. <http://www.redalyc.org/pdf/573/57311103007.pdf>
- Hahn, F. (2011). Manejo automático de malla sombra y del riego en un invernadero con tomates. *Scientia Agropecuaria*, 2(1), 31–37.
- Handarto; Makio Hayashi; Katsumi Ohyama; Hiromi Toida; Eiji Goto and Toyoki Kozai. (2006). *Developing System Control Operation Logic for a High-Pressure Ventilated Fog Cooling Greenhouse for a Naturally Department of Bioproduction Science , Faculty of Horticulture , Chiba University , greenhouse has been developed . A suitable duration of the f.* 44(1), 1–9.
- Harel, D., Fadida, H., Slepoy, A., Gantz, S., & Shilo, K. (2014). The Effect of Mean Daily Temperature and Relative Humidity on Pollen, Fruit Set and Yield of Tomato Grown in Commercial Protected Cultivation. *Agronomy*, 4(1), 167–177. <https://doi.org/10.3390/agronomy4010167>

- Heidarinejad, G., Bozorgmehr, M., Delfani, S., & Esmaeelian, J. (2009). Experimental investigation of two-stage indirect/direct evaporative cooling system in various climatic conditions. *Building and Environment*, 44(10), 2073–2079. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.017>
- Ho, L. C., & White, P. J. (2005). A cellular hypothesis for the induction of blossom-end rot in tomato fruit. *Annals of Botany*, 95(4), 571–581. <https://doi.org/10.1093/aob/mci065>
- Ishii, M., Okushima, L., Moriyama, H., & Sase, S. (2014). An overview of natural ventilation, airflow, evaporative cooling and heat pump heating in greenhouses under mild climatic conditions. *Acta Horticulturae*, 1037, 493–500. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.61>
- Ishii, M., Sase, S., Moriyama, H., Kurata, K., Ikeguchi, A., Kubota, C., Hayashi, M., Sabeh, N., Romero, P., & Giacomelli, G. A. (2006). The effect of evaporative fog cooling in a naturally ventilated greenhouse on air and leaf temperature, relative humidity and water use in a semiarid climate. *Acta Horticulturae*, 719(2005), 491–498. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.56>
- Jiao, X. C., Song, X. M., Zhang, D. L., Du, Q. J., & Li, J. M. (2019). Coordination between vapor pressure deficit and CO₂ on the regulation of photosynthesis and productivity in greenhouse tomato production. *Scientific Reports*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45232-w>
- Katsoulas, N., Baille, A., & Kittas, C. (2001). Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106(3), 233–247. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00211-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00211-2)
- Katsoulas, N., Savvas, D., Tsirogiannis, I., Merkouris, O., & Kittas, C. (2009). Response of an eggplant crop grown under Mediterranean summer conditions to greenhouse fog cooling. *Scientia Horticulturae*, 123(1), 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.08.004>

- Kittas, Constantinos. Bartzanas, Thomas. Katsoula, N. (2013). Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops: Principles for Mediterranean Climate Areas. In *Fao* (Issue March 2020).
- Kittas, C., & Bartzanas, T. (2007). Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations. *Building and Environment*, 42(10), 3774–3784.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.020>
- Kittas, C., Boulard, T., & Papadakis, G. (1997). Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: Sensitivity to temperature and wind effects. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 40(2), 415–425. <https://doi.org/10.13031/2013.21268>
- Lawson, T., & Vialet-Chabrand, S. (2019). Speedy stomata, photosynthesis and plant water use efficiency. *New Phytologist*, 221(1), 93–98.
<https://doi.org/10.1111/nph.15330>
- Leyva, R., Constán-Aguilar, C., Sánchez-Rodríguez, E., Romero-Gámez, M., & Soriano, T. (2015). Cooling systems in screenhouses: Effect on microclimate, productivity and plant response in a tomato crop. *Biosystems Engineering*, 129, 100–111.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.09.018>
- Li, H., Issaka, Z., Jiang, Y., Tang, P., & Chen, C. (2019). Overview of emerging technologies in sprinkler irrigation to optimize crop production. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(3), 1–9.
<https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191203.4310>
- Li, Q., Liu, Y., Tian, S., Liang, Z., Li, S., Li, Y., Wei, M., & Zhang, D. (2019). Effect of supplemental lighting on water transport, photosynthetic carbon gain and water use efficiency in greenhouse tomato. *Scientia Horticulturae*, 256(April), 108630. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108630>
- Li, S., & Willits, D. H. (2008). Comparing low-pressure and high-pressure fogging systems in naturally ventilated greenhouses. *Biosystems*

- Engineering*, 101(1), 69–77.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.06.004>
- Li, Shuhai, Willits, D. H., & Yunker, C. (2005). Experimental study of fogging system in naturally ventilated greenhouses. *2005 ASAE Annual International Meeting*, 393–400. <https://doi.org/10.13031/2013.19910>
- Linker, R., Kacira, M., & Arbel, A. (2011). Robust climate control of a greenhouse equipped with variable-speed fans and a variable-pressure fogging system. *Biosystems Engineering*, 110(2), 153–167.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.07.010>
- López-Cruz, I. L., Ruíz-García, A., & Hernández-Larragoiti, L. (2014). Neuro-fuzzy modeling of transpiration rates of greenhouse tomatoes under temperate weather conditions of central Mexico. *Acta Horticulturae*, 1037, 345–352. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.42>
- Lu, N., Nukaya, T., Kamimura, T., Zhang, D., Kurimoto, I., Takagaki, M., Maruo, T., Kozai, T., & Yamori, W. (2015). Control of vapor pressure deficit (VPD) in greenhouse enhanced tomato growth and productivity during the winter season. *Scientia Horticulturae*, 197, 17–23.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.001>
- Markley, H.P. Allen, R. G. (2004). Sprinkle & Trickle Irrigation Lecture Notes. *Utah State University , USA 2004*.
- Márquez Quiroz, C., Robledo Torres, V., Benavides Mendoza, A., Vázquez Badillo, M., Cruz Lázaro, E., Estrada Botello, M., & López Espinosa, S. (2014). Uso de mallas sombra: una alternativa para la producción de tomate cherry. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 1(2), 175–180.
<https://doi.org/10.19136/era.a1n2.165>
- Massmann, A., Gentine, P., & Lin, C. (2019). When Does Vapor Pressure Deficit Drive or Reduce Evapotranspiration? *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(10), 3305–3320. <https://doi.org/10.1029/2019MS001790>
- McAdam, S. A. M., & Brodribb, T. J. (2015). The evolution of mechanisms

- driving the stomatal response to vapor pressure deficit. *Plant Physiology*, 167(3), 833–843. <https://doi.org/10.1104/pp.114.252940>
- McAdam, S. A. M., & Brodribb, T. J. (2016). Linking turgor with ABA biosynthesis: Implications for stomatal responses to vapor pressure deficit across land plants. *Plant Physiology*, 171(3), 2008–2016. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00380>
- McAdam, S. A. M., Sussmilch, F. C., & Brodribb, T. J. (2016). Stomatal responses to vapour pressure deficit are regulated by high speed gene expression in angiosperms. *Plant Cell and Environment*, 39(3), 485–491. <https://doi.org/10.1111/pce.12633>
- Medrano-Cortes; (1999). *Universidad politécnica de madrid escuela técnica superior de ingenieros agrónomos gestión de riego en cultivo de pepino “*.
- Misra, D., & Ghosh, S. (2018). Evaporative cooling technologies for greenhouses: A comprehensive review. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 20(1), 1–15.
- Mutwiwa, U. N., Tantau, H. J., & Salokhe, V. M. (2006). Response of tomato plants to natural ventilation and evaporative cooling methods. *Acta Horticulturae*, 719, 447–454. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.50>
- Nieves García, V., Van der Valk, O., & Elings, A. (2011). Mexican protected horticulture: Production and market of Mexican protected horticulture described and analysed. *Wageningen UR Greenhouse Horticulture, Rapport GT*, 108.
- O’Carrigan, A., Hinde, E., Lu, N., Xu, X. Q., Duan, H., Huang, G., Mak, M., Bellotti, B., & Chen, Z. H. (2014). Effects of light irradiance on stomatal regulation and growth of tomato. *Environmental and Experimental Botany*, 98, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.10.007>
- Pahuja, R., Verma, H. K., & Uddin, M. (2015). Implementation of greenhouse climate control simulator based on dynamic model and vapor pressure

- deficit controller. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 8(4), 273–288. <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2015.04.009>
- Perdigones, A., García, J. L., Romero, A., Rodríguez, A., Luna, L., Raposo, C., & de la Plaza, S. (2008). Cooling strategies for greenhouses in summer: Control of fogging by pulse width modulation. *Biosystems Engineering*, 99(4), 573–586. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.01.001>
- Prenger, J. J., & Ling, P. P. (2001). Greenhouse condensation control: understanding and using vapor pressure deficit (VPD). *The Ohio State University Extension*, page 3, 4.
- Qiu, C., Ethier, G., Pepin, S., Dubé, P., Desjardins, Y., & Gosselin, A. (2017). Persistent negative temperature response of mesophyll conductance in red raspberry (*Rubus idaeus* L.) leaves under both high and low vapour pressure deficits: a role for abscisic acid? *Plant Cell and Environment*, 40(9), 1940–1959. <https://doi.org/10.1111/pce.12997>
- Romantchik, E., Ríos, E., Sánchez, E., López, I., & Sánchez, J. R. (2017). Determination of energy to be supplied by photovoltaic systems for fan-pad systems in cooling process of greenhouses. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1161–1168. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.011>
- Rosales-Vicelis. (2016). Desarrollo de un sistema de monitoreo de déficit de presión de vapor en cultivo de invernadero. *Tesis Profesional*, 76.
- Sabeh, N. C., Giacomelli, G. A., & Kubota, C. (2007). Water use by greenhouse evaporative cooling systems in a semi-arid climate. *2007 ASABE Annual International Meeting, Technical Papers, 8 BOOK(07)*.
- Sase, S., Ishii, M., Moriyama, H., Kurata, K., Kubota, C., Hayashi, M., Sabeh, N., Romero, P., & Giacomelli, G. A. (2007). Transpiration of tomato plant canopy and water use for a fog cooled greenhouse in semiarid climate. *Acta Horticulturae*, 761(1990), 63–69. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.761.6>
- Sethi, V. P., & Sharma, S. K. (2007). Survey of cooling technologies for

- worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, 81(12), 1447–1459. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.03.004>
- Shamshiri, R. (2013). A Review of Greenhouse Climate Control and Automation Systems in Tropical Regions. *Journal of Agricultural Science and Applications*, 02(03), 175–182. <https://doi.org/10.14511/jasa.2013.020307>
- Shamshiri, R., Ahmad, D., Wan Ismail, W. I., Man, H. C., Zakaria, A. J., Van Beveren, P., & Yamin, M. (2016). Comparative evaluation of naturally ventilated screenhouse and evaporative cooled greenhouse based on optimal vapor pressure deficit. *2016 American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, ASABE 2016*, 2454215, 2–11. <https://doi.org/10.13031/aim.20162454215>
- Shamshiri, Radmon Ramin., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics*, 32(2), 287–302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- Shamshiri, Redmond R., Mahadi, M. R., Thorp, K. R., Ismail, W. I. W., Ahmad, D., & Man, H. C. (2017). Adaptive Management Framework for Evaluating and Adjusting Microclimate Parameters in Tropical Greenhouse Crop Production Systems. *Plant Engineering*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69972>
- Shamshiri, Redmond Ramin, Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics*, 32(2), 287–302. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- Sinclair, T. R., Devi, J., Shekoofa, A., Choudhary, S., Sadok, W., Vadez, V., Riar, M., & Rufty, T. (2017). Limited-transpiration response to high vapor pressure deficit in crop species. *Plant Science*, 260, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2017.04.007>

- Singh, M. C., Singh, J. P., & Singh, K. G. (2018). Development of mathematical models for predicting vapour pressure deficit inside a greenhouse from internal and external climate. *Journal of Agrometeorology*, 20(3), 238–241.
- Sorensen, H. K., Fanourakis, D., Tsaniklidis, G., Bouranis, D., Nejad, A. R., & Ottosen, C. O. (2020). Using artificial lighting based on electricity price without a negative impact on growth, visual quality or stomatal closing response in *Passiflora*. *Scientia Horticulturae*, 267(December 2019), 109354. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109354>
- Stanghellini, C. (1987). *Transpiration of greenhouse crops an aid to climate management*. 150.
- Steiner, A. A. (1961). A Universal Method for Preparing Nutrient Solutions of a Certain Desired Composition. *Plant and Soil* XV, VI. 15, 134–154. <https://edepot.wur.nl/309364>
- Streck-Nereu, A. (2003). Stomatal Response To Water Vapor Pressure Deficit: an Unsolved Issue. *Revista Brasileira de Agrociência*, 9(4), 317–322. <https://doi.org/10.18539/cast.v9i4.649>
- Toida, H., Ohyama, K., Kozai, T., Handarto, & Hayashi, M. (2006). A method for measuring dry-bulb temperatures during the operation of a fog system for greenhouse cooling. *Biosystems Engineering*, 93(3), 347–351. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.12.004>
- Tonetto, S., McElrone, A. J., Shackel, K. A., & Mitcham, E. J. (2014). Calcium partitioning and allocation and blossom-end rot development in tomato plants in response to whole-plant and fruit-specific abscisic acid treatments. *Journal of Experimental Botany*, 65(1), 235–247. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert364>
- Villarreal-Guerrero, F., Flores-Velazquez, J., & Kacira, M. (2014). Comparative performance of a greenhouse cooling strategy with natural ventilation and fogging under different outside climates. *Acta Horticulturae*, 1037, 57–64. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.3>

- Villarreal-Guerrero, Federico, Kacira, M., Fitz-Rodríguez, E., Linker, R., Kubota, C., Giacomelli, G. A., & Arbel, A. (2012). Simulated performance of a greenhouse cooling control strategy with natural ventilation and fog cooling. *Biosystems Engineering*, 111(2), 217–228.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.11.015>
- Viuda-Martos, M., Sanchez-Zapata, E., Sayas-Barberá, E., Sendra, E., Pérez-Álvarez, J. A., & Fernández-López, J. (2014). Tomato and Tomato Byproducts. Human Health Benefits of Lycopene and Its Application to Meat Products: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(8), 1032–1049. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.623799>
- Von Zabeltitz, C. (2011). Integrated Greenhouse Systems For Mild Climates: Climate conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Yaaran, A., Negin, B., & Moshelion, M. (2019). Role of guard-cell ABA in determining steady-state stomatal aperture and prompt vapor-pressure-deficit response. *Plant Science*, 281(August 2018), 31–40.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.12.027>
- Zakari, M. D., Abubakar, Y. S., Muhammad, Y. B., Shanono, N. J., Nasidi, N. M., Abubakar, M. S., Muhammad, A. I., Lawan, I., & Ahmad, R. K. (2016). Design and construction of an evaporative cooling system for the storage of fresh tomato. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(4), 2340–2348.
- Zhang D., Zhang Z., Li J., Chang Y., Du Q., P. T. (2017). Vapour pressure deficit control in relation to water transport and water productivity in greenhouse tomato production during summer. *Scientific RepoRts*, 7, 11.
<https://doi.org/10.1038/srep43461>
- Zhang, D., Du, Q., Zhang, Z., Jiao, X., Song, X., & Li, J. (2017a). Vapour pressure deficit control in relation to water transport and water productivity in greenhouse tomato production during summer. *Scientific Reports*, 7.
<https://doi.org/10.1038/srep43461>

- Zhang, D., Du, Q., Zhang, Z., Jiao, X., Song, X., & Li, J. (2017b). Vapour pressure deficit control in relation to water transport and water productivity in greenhouse tomato production during summer. *Scientific Reports*, 7(August 2016), 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep43461>
- Zhang, D., Zhang, Z., Li, J., Chang, Y., Du, Q., & Pan, T. (2015a). Regulation of vapor pressure deficit by greenhouse micro-fog systems improved growth and productivity of tomato via enhancing photosynthesis during summer season. *PLoS ONE*, 10(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133919>
- Zhang, D., Zhang, Z., Li, J., Chang, Y., Du, Q., & Pan, T. (2015b). Regulation of Vapor Pressure Deficit by Greenhouse Micro-Fog Systems Improved Growth and Productivity of Tomato via Enhancing Photosynthesis during Summer Season. *PLOS ONE*, 10(7), e0133919. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133919>