

Alan Jonathan
Wilson Chan

*Estrategias climáticas para optimizar las condiciones
de microclima para cultivos bajo un invernadero.*

2013



*Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería*

*Estrategias climáticas para optimizar las condiciones de
microclima para cultivos bajo un invernadero.*

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Diploma de

Especialidad en Ingeniería de Invernaderos

Presenta

Alan Jonathan Wilson Chan

Querétaro Qro Diciembre 2013



Portada Interna de Tesis

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de ingeniería
Especialidad en ingeniería de invernaderos

TESIS

Estrategias climáticas para optimizar las condiciones de microclima para cultivos bajo un invernadero.

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de la:

Especialidad en ingeniería de invernaderos

Presenta:

ALAN JONATHAN WILSON CHAN

Dirigido por:

Dra. Rosalía Virginia Ocampo Velázquez

SINODALES

Dra. Rosalía Virginia Ocampo Velázquez
Presidente

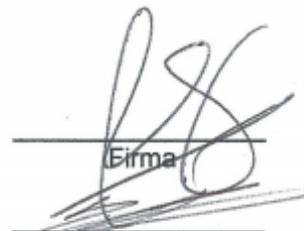
Dr. Enrique Rico García
Secretario

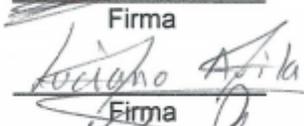
M en C. Luciano Ávila Juárez
Vocal

Dr. Irineo Torres Pacheco
Suplente

Dr. Ramón Gerardo Guevara González
Suplente


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

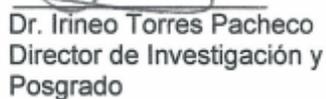

Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Gro.
Diciembre, 2013
México

RESUMEN

El cultivo bajo invernadero se realiza bajo estructuras construidas con la finalidad de evitar las restricciones que el medio impone al desarrollo de las plantas cultivadas, también sabemos que entre 70 y 80% de la energía consumida en invernaderos corresponde a la calefacción y enfriamiento. De ahí que es importante poner atención en estos sistemas y en todas las cosas asociadas a él, incluyendo el mantenimiento. Como objetivo de este trabajo fue diseñar estrategias de control climático basadas en manejo de ventilación natural para mejorar las condiciones microclimáticas, y reducir el uso de sistemas de climatización dentro de un invernadero, estas estrategias consistieron en el estudio de las variables climáticas como son temperatura, humedad relativa y CO₂ con el propósito de analizar su dinámica y comportamiento en el interior del invernadero. Se sensaron las variables anteriores y posteriormente se analizó estadísticamente cada estrategia entre ellas para determinar cuál es mejor en las condiciones que impuso el medio en la temporada donde se llevó a cabo el experimento. Por lo cual se propone que el uso de estrategias climáticas basadas en manejo de la ventilación puede mejorar un microclima adecuado para los cultivos dentro del invernadero.

(Palabras clave: *estrategias de control de clima, variables climáticas, ventilación*)

SUMMARY

The cultivation is carried out under greenhouse structures built in order to avoid the restrictions that the environment imposes the development of cultivated plants , we also know that between 70 and 80 % of the energy consumed is for heating greenhouses and cooling. Hence it is important to pay attention to these systems and all things associated with it, including maintenance. Aim of this work was to design strategies climate control based on handling natural ventilation to improve microclimatic conditions, and reduce the use of air conditioning systems inside a greenhouse, these strategies consisted in the study of climatic variables as are temperature, relative humidity and CO₂ in order to analyze their dynamic behavior inside the greenhouse. The above variables sensoron and every strategy including statistically analyzed to determine what is best under the conditions imposed in the heated medium where the experiment took place. Therefore it is proposed to use weather -based strategies ventilation management can improve a suitable microclimate for the crops in the greenhouse.

(Key words: *climate control strategies, climatic variables, ventilation*)

AGRADECIMIENTOS

Todos lo que me ayudaron a que fuera posible.

	Página
Resumen	i
<i>Summary</i>	<i>ii</i>
<i>Agradecimientos</i>	<i>iii</i>
<i>Indice</i>	<i>iv</i>
<i>Indice de cuadros</i>	<i>vi</i>
<i>Indice de figuras</i>	<i>vii</i>
I. INTRODUCCION	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 <i>Importancia económica de los invernaderos en México</i>	<i>3</i>
2.1.1 <i>Nivel tecnológico</i>	<i>4</i>
2.2 <i>Factores que influyen la producción bajo invernadero</i>	<i>5</i>
2.2.1 <i>Temperatura</i>	<i>6</i>
2.2.2 <i>Radiación</i>	<i>6</i>
2.2.3 <i>Humedad relativa</i>	<i>7</i>
2.2.4 <i>Dióxido de carbono (CO₂)</i>	<i>8</i>
2.3 <i>Técnicas de climatización en invernadero</i>	<i>9</i>
2.3.1 <i>Métodos de calentamiento</i>	<i>9</i>
2.3.1.1 <i>Calefacción de tipo convectivo</i>	<i>9</i>
2.3.1.2 <i>Calefacción por conducción</i>	<i>10</i>
2.3.1.3 <i>Calefacción por convección y radiación</i>	<i>10</i>
2.3.2 <i>Métodos de enfriamiento</i>	<i>11</i>
2.3.2.1 <i>Ventilación natural</i>	<i>12</i>
2.3.2.2 <i>Evapotranspiración de cultivo</i>	<i>12</i>
2.3.2.3 <i>Sistemas pasivos o estáticos</i>	<i>13</i>
2.3.2.4 <i>Ventilación forzada o sistemas activos</i>	<i>13</i>
2.4 <i>Estrategias climáticas</i>	<i>13</i>
2.5 <i>Déficit de presión de vapor como indicador de estrés en plantas</i>	<i>14</i>
III. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	18

	3.1 <i>Problemática</i>	18
	3.2 <i>Justificación</i>	18
IV.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS	19
	4.1 <i>Objetivo General</i>	19
	4.2 <i>Objetivos particulares</i>	19
	4.3 <i>Hipótesis</i>	19
V.	METODOLOGÍA	20
	5.1 <i>Ubicación del área de investigación</i>	20
	5.2 <i>Evaluación de microclima</i>	21
	5.2.1 <i>Ubicación de sensores</i>	22
	5.3 <i>Planeación de estrategias.</i>	24
	5.4 <i>Análisis de datos</i>	25
VI.	ANALISIS DE RESULTADOS	27
	5.1 <i>Caracterización de sensores.</i>	26
	5.2 <i>Análisis estadístico</i>	29
	5.2.1 <i>Análisis de temperatura</i>	29
	5.2.2 <i>Análisis de déficit de presión de vapor</i>	34
	5.2.3 <i>Análisis del comportamiento de humedad relativa y CO₂.</i>	35
VII.	DISCUSIONES	37
VIII.	CONCLUSIONES	39
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
2.1	<i>Nivel tecnológico de invernaderos en México SAGARPA (2009).</i>	4
5.1	<i>Estrategias climáticas a implementar en el invernadero experimental.</i>	25

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
5.1	<i>Ubicación geográfica del experimento en el estado de Querétaro, a) municipio de El Marqués, b) Poblado de Amazcala.</i>	20
5.2	<i>Invernadero experimental (ie-2) de 432 m².</i>	21
5.3	<i>Sensores a utilizar. a) datalogger watchdog serie 1000, b) sensor de temperatura, c) monitor de CO₂.</i>	22
5.4	<i>Distribución de sensores dentro del invernadero. Los círculos marcados como negro y rojo son los dataloggers y los marcados con verde y rojo son los sensores que están conectados al datalogger, las flechas indican que sensor de temperatura está conectado al datalogger a) vista frontal de sensores de diferencial de altura (efecto invernadero) colocados en el centro de cada nave. b) sensores colocados a través de la ventana cenital tomando como referencia el centro de la cenital. c) vista aérea de sensores colocados a altura de planta 1.2m del suelo.</i>	23
6.1	<i>Estufa de temperatura controlada, ubicada en el laboratorio de peces del campus Amazcala.</i>	27
6.2	<i>Caracterización del sensor de temperatura TMPB1 sobre TMPA1.</i>	28

6.3	<i>Caracterización del sensor de humedad relativa HMD2 sobre HMD1.</i>	28
6.4	<i>Diferencial de temperatura del promedio de 12 am a 7 am entre las diferentes estrategias en las diferentes partes del invernadero.</i>	30
6.5	<i>Diferencial de temperatura del promedio de 7 am a 11 am entre las diferentes estrategias en las diferentes partes del invernadero.</i>	31
6.6	<i>Diferencial de temperatura del promedio de 11 am a 3 pm entre las diferentes estrategias en las diferentes partes del invernadero.</i>	32
6.7	<i>Diferencial de temperatura del promedio de 3 pm a 7 pm entre las diferentes estrategias en las diferentes partes del invernadero.</i>	33
6.8	<i>Diferencial de temperatura del promedio de 7 pm a 12 am entre las diferentes estrategias en las diferentes partes del invernadero.</i>	34
6.9	<i>Déficit de presión de vapor de los diferentes puntos del invernadero con las diferentes estrategias.</i>	35
6.10	<i>Comportamiento promedio día de HR de las estrategias.</i>	36
6.11	<i>Comportamiento promedio día de CO₂ de las estrategias.</i>	36

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura protegida es aquella que se realiza bajo estructuras construidas con la finalidad de evitar las restricciones que el medio impone al desarrollo de las plantas cultivables. Así, mediante el empleo de diversas estructuras y técnicas se reducen al mínimo algunas de las condiciones restrictivas del clima exterior sobre los vegetales, a la mano de una buena nutrición vegetal y un mantenimiento adecuado a la planta, contribuyen en el propósito de que el sistema resulte económicamente rentable (García et al., 1999).

Sin embargo se sabe que en México según la SEMARNAT (2008), las zonas muy áridas, áridas, semiáridas y subhúmedas secas ocupan aproximadamente 128 millones de hectáreas, es decir, más de la mitad del territorio nacional, involucrando casi a todos los estados de la República Mexicana incluyendo el estado de Querétaro. Estas zonas se caracterizan por presentar temperaturas extremas, altas en el día, bajas en la noche y baja humedad relativa.

Aunado a lo anterior, tenemos los efectos del cambio climático. El calentamiento global que experimenta actualmente el planeta que se debe básicamente al incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), donde el CO² es el que mayor contribuye a este fenómeno (IPCC, 2007). Y de la misma manera registro de baja temperatura de forma precipitada. Lo que propicia que cada vez sea más impredecible el comportamiento climático, obligándonos a que la producción a cielo abierto sea cambiada por producción bajo invernadero.

Es por ella que en estas regiones es difícil mantener las condiciones adecuadas en el interior de invernaderos para el desarrollo de cultivos agrícolas, por lo tanto es necesario implementar estrategias de climatización mejorando la eficiencia de la ventilación que ayuden directamente a corregir temperatura y humedad relativa en el interior del invernadero, y que permitan mejorar la eficiencia del uso de controles de clima

que propicien el buen desarrollo de los cultivos en condiciones climáticas favorables dentro del invernadero.

También sabemos que entre 70 y 80% de la energía consumida en invernaderos corresponde a la calefacción y enfriamiento. De ahí que es importante poner atención en estos sistemas y en todas las cosas asociadas a él, incluyendo el mantenimiento (Moreno. 2012). Por ende el análisis y estudio de estrategias climáticas en invernaderos puede mejorar las condiciones para la eficiencia del control de temperatura y humedad relativa reduciendo los gastos en consumo de energía, conservando o disipando calor, dando opciones a sistemas de automatización, por ejemplo controles con métodos como el control difuso basados en sistemas no lineales de control complejo (Teitel. 2007) o redes neuronales que pueden mitigar gastos energéticos, reduciendo al mínimo el uso de calefacción o refrigeración.

La agricultura es una de las actividades económicas más importantes del país, por ende es necesario que instituciones educativas, como la UAQ, desarrollen proyectos que contribuyan a mejorar la calidad y cantidad de las cosechas, tomando en cuenta que en el estado se dispone de poca agua para riego agrícola y el clima es extremo. Y es así como la UAQ toma como alternativa la agricultura protegida.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia económica de los invernaderos en México.

La horticultura bajo invernadero es quizás la actividad agrícola en la que se va implantando con mayor rapidez la informática y control automático. En la búsqueda continua de aumentar la rentabilidad, bien sea a través de un mayor rendimiento de los cultivos o bien buscando un aprovechamiento más eficiente de la energía empleada o, finalmente, por una mejora del rendimiento del trabajo aplicado en todo el proceso de la producción, los dos primeros aspectos son los que dependen de un mejor control de clima del invernadero.

Los invernaderos se presentan como una alternativa para aprovechar el uso del agua y proteger los cultivos de los cambios bruscos de temperatura y de condiciones adversas como el viento, la lluvia, las plagas, los animales y la contaminación. En ellos se crean condiciones artificiales de microclima que favorecen al desarrollo del cultivo en cualquier temporada, como niveles óptimos de radiación solar, de temperatura, de humedad de aire y de suelo, produciendo así cultivos con mayor rendimiento que con la agricultura tradicional (Castañeda, 2002).

La agricultura protegida es aquella que se realiza bajo estructuras construidas con la finalidad de evitar las restricciones que el medio impone al desarrollo de las plantas cultivadas. Así, mediante el empleo de diversas estructuras y técnicas se reducen al mínimo algunas de las condiciones restrictivas del clima sobre los vegetales.

La superficie de invernaderos en México ha incrementado en forma exponencial ya que en el año 2000 había apenas unas mil Ha y hoy día SAGARPA (2011) habla de 9 mil 500 Ha, mientras que el censo agropecuario realizado por el INEGI (2010) es de 12 mil 500 Ha.

2.1.1 Nivel tecnológico.

En México construir invernaderos no es una decisión fácil, además se dispone de diferentes categorías o niveles de tecnología, que van desde estructuras con bajas tecnologías que cuenta con sistemas simples como ventanas laterales y cubiertas de malla, hasta invernaderos de alta tecnología con diversos sistemas de control climático, sin embargo estos en muchas ocasiones son mal controlados.

Los tipos de invernaderos según su tecnología van a depender principalmente del grado de inversión y de la característica climática de la zona. Informes de SAGARPA (2009), en nuestro país existen diferentes tecnologías (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1 Nivel tecnológico de invernaderos en México SAGARPA (2009).

	Cubierta	Ambiente del follaje	Ambiente de la raíz	Método de cultivo	Rend. Esperado Kg m ² por año	Inversión \$ m ² por año
Bajo	Capa simple de polietileno	Ventilación natural, sin calefacción	Tezontle, suelo, riego por goteo con control manual	Alambre media altura	10 a 20	275 a 350
Medio	Capa doble de polietileno	Calefacción, ventilación natural mas sistema de refrigeración	Suelo o hidroponía, riego por goteo con control.	Cultivo de alambre elevado, fertirrigación computarizada	20 a 50	350 a 1100
Alto	Vidrio, PE, o policarbonato	CO ₂ , mallas, ventilación forzada, calefacción y refrigeración	Hidroponía, riego por goteo con control automático.	Cultivo de alambre elevado, computarizado	50 a 75	1100 a 2200

Según Canchola (2010), el nivel tecnológico promedio estimado en nuestro país es de 40%, si se considera un paquete tecnológico completo con refrigeración, recirculación de agua, ventilación automática, calefacción, pantallas térmicas para ahorro de energía, sensores, control automatización, sustratos y cultivos en hidroponía.

En México según SAGARPA (2011) los proyectos de agricultura protegida de alto valor tecnológico (5%) están en Jalisco y Sonora. Le siguen invernaderos de mediano costo (25%) en el Bajío, y de bajo costo (70%) ubicados principalmente en los estados de Baja California y Sinaloa.

2.2 Factores que influyen la producción bajo invernadero

En la producción hortícola intervienen muchas variables que participan en procesos físicos y biológicos y por lo tanto el número de factores que es necesario regular en un invernadero es grande, temperaturas del aire y sustrato, humedad, CO₂, luz, pH, conductividad eléctrica, etc. Existen además interacciones entre muchas de estas variables y regular su combinación óptima no es posible sino con la ayuda de sistemas más capaces y complejos, con posibilidad de llevar algoritmos de control que integran o relacionan varias variables climáticas y de usar modelos que faciliten la predicción del comportamiento del sistema ante las diversas condiciones posibles, con lo cual la regulación del clima se puede hacer con mayor precisión y estabilidad, que hasta hace poco no se había generalizado en este sector. Sin embargo, el clima dentro de los invernaderos depende en gran medida de las condiciones climáticas del exterior. Por lo tanto, para el desarrollo adecuado de un cultivo, es necesario implementar estrategias de control que tengan en cuenta variables como: temperatura del aire, contenido de humedad del aire y la concentración de CO₂ declarado por Castañeda y Miranda (2006).

Las características climáticas como son la temperatura, humedad relativa, radiación solar y concentración de CO₂ de una zona, deben de ser analizadas con las necesidades de las plantas que se intentan cultivar bajo invernadero.

2.2.1 Temperatura.

Estudios realizadas por Lorenzo (1998) la temperatura es un factor determinante de la actividad metabólica y del crecimiento y desarrollo de los vegetales. El clima generado bajo las estructuras del cultivo, sin control activo, en general está lejos del óptimo biológico de las especies que se cultivan en su interior durante la mayor parte de los ciclos productivos. La distribución biogeografía original de las hortalizas comestibles como el tomate, pimiento, pepino, berenjena, calabaza y la judía tienen lugar en latitudes subtropicales, generalmente asociados a regímenes térmicos poco variable y temperaturas mínimas superiores a 12°C, limite considerado como el mínimo debajo del cual estas especies ralentizan el crecimiento y presentan síntomas de deterioro, por tanto la ausencia de control térmico cuando la temperatura se sitúa por debajo de estos niveles impide la programación de las cosechas y se generan amplias variaciones en la cantidad y calidad de la producción, al mismo tiempo, los cambios en la actividad metabólica a veces bruscos, pueden inducir el envejecimiento precoz de las plantas y por tanto reducción de su potencial productivo.

Las altas temperaturas también producen desordenes fisiológicos que afectan a la reducción de cuajado y maduración prematura de los frutos de tomate y pimiento (AVRDC, 1990). La obtención de frutos de tomate compactos exige que la temperatura no exceda de los 30°C, por otra parte la maduración desigual caracterizada por la presencia de zonas verdes sobre la pared del fruto y de zonas suberosas oscuras bajo la piel, y se asocia a una falta de luminosidad contrastando con una temperatura excesiva (FAO, 1988).

2.2.2 Radiación.

La radiación incidente condiciona las características agroclimáticas de cada zona. Este factor ha proporcionado el desplazamiento parcial de las zonas productivas hacia latitudes cuya integral de radiación permite la utilización de estructuras de protección sencillas que incorporan cubiertas de plástico. La cantidad de energía luminosa

interceptada por el cultivo y la eficiencia de la conversión de la luz interceptada en la materia seca. El primero depende de la radiación incidente sobre el dosel vegetal y de la distribución y disposición angular de las hojas o estructura del dosel y el segundo está relacionado con el valor que adoptan los parámetros climáticos como son la intensidad de radiación, temperatura, déficit de presión de vapor, concentración de CO₂ en la atmosfera del invernadero, y con estado hídrico y nutricional del cultivo (Castellanos, 2004).

Según Alpi (1999) la luz actúa sobre el crecimiento y el desarrollo de las plantas como fuente energética para la asimilación fotosintética del CO₂, así como fuente primaria de calor y estímulo para la regulación del desarrollo.

La luz que utilizan las plantas a través del proceso de la fotosíntesis en las plantas es Radiación fotosintética activa, o luz PAR. También recibe el nombre de Luz Cuántica, ya que se mide en unidades de moles que impactan en un área determinada en un tiempo dado. Aunque la luz PAR tiene un rango de 400 a 700 nm, la región más brillante para el ojo humano es la de menor efecto en las plantas. Al medir la Luz Cuántica podemos saber si nuestras plantas están recibiendo suficiente cantidad de luz útil, descrito por trabajos de Reed (1993).

2.2.3 Humedad relativa.

Castilla (2005) comenta que la humedad ambiental no interviene en la fotosíntesis. Su papel es indirecto a través de su influencia en la apertura estomática. En condiciones adecuadas de suministro hídrico (riegos no limitantes) y en ausencia de problemas de salinidad, la fotosíntesis no es afectada por una humedad ambiental baja. Puede ocurrir que, en condiciones de muy alta demanda evaporativa coincidentes con baja humedad o con dificultades de suministro hídrico desde las raíces, haya limitación de fotosíntesis, pero ello sería debido a un insuficiente suministro hídrico que induciría el cierre estomático por el estado hídrico foliar.

Según VAISALA (2013) la humedad relativa muy alta favorece la propagación de los hongos, provoca enfermedades en las plantas y también daños en las estructuras de los invernaderos. Los ambientes muy secos disminuyen el ritmo de crecimiento de las plantas. La humedad relativa óptima depende del tipo de planta que se cultive si bien el rango típico oscila entre el 50 y el 70 %.

2.2.4 Dióxido de carbono (CO₂).

El dióxido de carbono se encuentra en el aire que respiramos en una concentración del 0.03% al 0.04% (300 a 400 ppm) aproximadamente, y las plantas lo usan junto con el agua y la luz del sol o la artificial para que, a través de la fotosíntesis, fabrique glucosa y oxígeno (éste último como subproducto), que es la fuente de energía de las plantas.

En invernadero es un recinto semicerrado en el que la actividad fotosintética de las plantas da lugar a un régimen fluctuante de CO₂. Estudios llevados a cabo por Alonso (2011) en los invernaderos mediterráneos han cuantificado que durante el 60% del periodo de iluminación, la concentración de CO₂ dentro del invernadero, es inferior a la exterior. Se han registrado reducciones de la concentración de CO₂ del 55% y del 47% en cultivos con el dosel vegetal desarrollado en ciclos de primavera y de otoño respectivamente. Es posible añadirlo en cultivos de interior, donde se necesita una aireación forzada para mover el aire en la atmósfera interna y para que el CO₂, que es más pesado que el aire, pueda ser absorbido por los estomas de las hojas, con objeto de evitar que las plantas se estanquen en su desarrollo y disminuyan o paralicen las rutas biosintéticas.

El aumento de la concentración de CO₂ representa un incremento de la fuente fotosintética y esto ha suscitado el interés en analizar este efecto sobre el crecimiento de la fuerza de sumidero. Alonso (2011) ha estudiado el enriquecimiento carbónico en el cultivo de pimiento con una densidad de 5 y 7,5 tallos m⁻², el incremento de la producción comercial respecto a los cultivos de referencia ha sido 17 y 20 % respectivamente.

2.3 Técnicas de climatización en invernadero.

Según López (2000) El metabolismo está profundamente afectado por los cambios de la temperatura medioambiental, y es complicado conocer la incidencia de la temperatura sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos desde un punto de vista global, dado que intervienen diferentes procesos (división celular, expansión, asimilación de carbono, respiración, distribución de asimilados entre otros) y cada uno de ellos tiene un determinado rango óptimo de temperatura, característico de la especie que se considera, de su fase de desarrollo y de las condiciones previas de crecimiento.

2.3.1 Métodos de calentamiento.

Según Prenger y Ling (2006) los invernaderos son calentados pasivamente a menudo, a través de la energía solar en la forma de luz del sol que entra a través de las ventanas y se mantiene atrapada en el edificio. Sin embargo, algunos invernaderos, incluyendo aquellos usados en el invierno, requieren fuentes extra y métodos de calefacción para permanecer productivos y calientes. Aunque los sistemas centrales de calefacción para invernaderos son costosos, existen unos sistemas más baratos que mantienen bajo el precio de calentar al invernadero.

Según utilicen una o varias formas en que el calor se puede transferir, podemos clasificar los sistemas de calefacción en convección, conducción y radiación.

2.3.1.1 Calefacción de tipo convectivo.

Son sistemas en los que el elemento conductor del calor es el aire. Debido a su poca inercia, proporcionan un aumento rápido de temperatura del aire, enfriándose de igual forma al dejar de actuar. Generan importantes gradientes térmicos y pérdidas de calor al ir localizados normalmente sobre el cultivo mediante tubos perforados cerca de las plantas con el propósito de mejorar la eficiencia del sistema.

Entre los sistemas convectivos los más utilizados son: generadores de aire caliente de combustión indirecta y generadores de aire caliente de combustión directa (López, 2000).

2.3.1.2 Calefacción por conducción.

Según Feuilloley y Baille (1992) estos sistemas están diseñados para proporcionar una temperatura adecuada en la zona radicular. Desde un punto de vista físico, uno de los objetivos de la calefacción del suelo es utilizar, indirectamente, la superficie de intercambio con el aire que ofrece el suelo del invernadero, ya que ésta es superior a la de los sistemas de calefacción aéreos. Desde una caldera central se aporta calor al suelo a través de tuberías enterradas, circulando el agua a temperatura inferior a 40°C, siendo la distribución del calor uniforme y proporcionando mayor eficiencia que los sistemas por aire caliente. El elevado coste inicial y la dificultad para realizar labores en el suelo han limitado el desarrollo de estos sistemas.

En cultivos fuera de suelo, debido a su baja inercia térmica, la temperatura en la zona radicular se aproxima a la temperatura del aire, pudiendo en periodos fríos limitar el desarrollo de los cultivos. La fácil localización de los cambiadores de calor, bajo los sustratos o sobre los mismos, ha permitido su expansión en estos sistemas de cultivo.

2.3.1.3 Calefacción por convección y radiación.

La transferencia de calor se realiza a través de tuberías aéreas o dispuestas sobre el medio de cultivo, por donde circula agua caliente, pudiendo trabajar a alta (hasta 90°C) o baja temperatura (entre 30°C - 50°C) en función del material utilizado (metal o plástico). En alta temperatura, la utilización de las tuberías metálicas como raíles, permite la incorporación de carros para prácticas culturales y aplicación de productos fitosanitarios, encaminados hacia una mayor eficiencia en el trabajo.

Estos sistemas modifican la temperatura del aire, al calentarse por convección al contacto con los tubos, y la de los objetos (suelo, planta, cubierta del invernadero, etc.) que se encuentran a su alrededor por intercambio radiactivo. La distribución del calor es más uniforme que en los sistemas por aire, al situar las tuberías cerca del cultivo y mantener unos gradientes térmicos bajos. En Almería hay instalados sistemas tanto a alta como a baja temperatura, siendo su número reducido por los mayores costes iniciales de la instalación (López, 2000).

2.3.2 Métodos de enfriamiento.

En el desarrollo de esta experimentación se llevara a cabo en épocas del año muy calurosas, verano y otoño, por lo tanto nos enfocaremos como evitar el sobre calentamiento en el interior del invernadero y llevar a cabo la aplicación de métodos de ventilación o enfriamiento del mismo.

Sin duda el recubrimiento con el material de cubierta y laterales del invernadero implica una gran reducción del viento respecto al exterior y esta condición lleva a cabo el efecto invernadero y sobre todo por las altas temperaturas que ya se tienen en el exterior.

Lo que describe Cervantes (2002) de la ventilación de los invernaderos que se suele realizar, o bien mediante el uso de aperturas localizadas en el techo, conocidas como ventanas cenitales o en los laterales del invernadero, que permiten la renovación del aire, o bien mediante el uso de ventiladores de diferentes caudales. La mejor forma de clasificar las ventilaciones es basándose en la forma en que se realiza la renovación del aire. La ventilación pasiva es aquella que se utilizan aperturas de ventanas en el invernadero, y el viento y las diferencias de presión van renovando el aire. Por el contrario, la ventilación activa es aquella que actúa sobre el movimiento del aire dentro del invernadero, mediante el uso de ventiladores.

2.3.2.1 Ventilación natural

La ventilación es normalmente el primer paso para refrigerar un invernadero, pero por lo general no es suficiente para extraer el exceso de energía durante los días más calurosos en verano descrito por Day y colaboradores (1999). Además adecuar la ventilación natural del invernadero es uno de los objetivos primordiales a considerar en el manejo del clima del cultivo protegido dado que afecta a la temperatura del aire, suelo y/o sustrato, al régimen higrométrico del aire y a la concentración de CO₂ de la atmosfera del invernadero.

Estudios realizados anteriormente por Montero y colaboradores (2006) nos dicen que para todos los modelos de ventilación, la tasa de intercambio de aire aumenta linealmente con la velocidad del viento exterior. Puede comprobarse que al aumentar el tamaño de ventanas aumenta la ventilación.

Estudios más recientes de Mashonjowa (2012) concluyen que las condiciones climáticas dentro de un invernadero con ventilación natural depende directamente de la intensidad de la radiación solar, el material de la cubierta, el ambiente temperatura del aire exterior, el coeficiente global de transferencia de calor, y la velocidad del viento externo.

2.3.2.2 Evapotranspiración de cultivo

Cuando el dosel vegetal está desarrollado y se mantiene en buenas condiciones hídricas la transpiración del cultivo puede disipar el 55% de la energía en el invernadero (Medrano, 1997), por tanto el aumento de la densidad de plantación o del índice de área, foliar en los periodos estivales se muestra como una estrategia muy adecuada para mejorar el clima del invernadero.

2.3.2.3 Sistemas pasivos o estáticos

Según Castilla (2005) son los basados en la aplicación de un porcentaje fijo de reducción de transmisión de luz sobre el cultivo, con independencia de la variación de la intensidad de radiación durante el ciclo diario. El inconveniente común de estos sistemas radica en la reducción innecesaria de luz y por tanto del mal aprovechamiento de la radiación durante las primeras horas de la mañana, las últimas de la tarde y durante días nublados, cuando dentro de las estructuras de cultivo prevalecen buenas condiciones térmicas e higrométricas.

2.3.2.4 Ventilación forzada o sistemas activos

La ventilación forzada o dinámica consiste en para inyectar o extraer aire del invernadero se emplean ventiladores tipo helicoidal, que proporcionan grandes caudales a poca presión. Estos ventiladores están hechos para trabajar a poca velocidad de rotación, pues si se fuerza su velocidad son muy ruidosos y consumen mucha energía. Los invernaderos impermeables a los insectos necesitan ventilación dinámica. En este caso la ventilación debe ser, preferentemente, por inyección desde el exterior funcionando a sobrepresión. Las tomas de aire deben evitar el acceso de insectos (Castilla, 2005).

2.4 Estrategias climáticas

Según Castañeda (2002) las estrategias climáticas consisten en el estudio del comportamiento de las variables climáticas dentro de los invernaderos que se realizan apoyados en las herramientas de modelación en el que se incluyen las variables físicas involucradas para analizar la dinámica y comportamiento en el invernadero para su mejor operación.

Para llevar a cabo buenas estrategias según Salazar (2012) se debe considerar las temperaturas superiores a los 30-35 °C que afectan al fructificación por mal desarrollo

de óvulos, el desarrollo de la planta en general, y del sistema radicular en particular. Temperaturas inferiores a 12-15 °C también originan problemas en el desarrollo de la planta. La humedad relativa óptima oscila entre el 60 y 80 %. Humedades relativas muy elevadas favorecen el desarrollo de enfermedades del follaje y el agrietamiento del fruto y dificultan la fecundación, debido a que el polen se compacta, abortando parte de las flores. También una humedad relativa baja dificulta la fijación del polen al estigma de la flor.

2.5 Déficit de presión de vapor como indicador de estrés en plantas.

El Déficit de Presión del Vapor (DPV) es una manera útil de medir el clima de un invernadero. DPV puede utilizarse para evaluar la amenaza de enfermedades, el potencial de condensación y las necesidades de un cultivo bajo invernadero. Un paso importante en el manejo y control de enfermedades es la prevención de las condiciones que propician las enfermedades. Así pues, la prevención de condensación es importante, ya que los patógenos de invernaderos con frecuencia requieren una lámina de agua en la planta para desarrollarse y afectarle. DPV puede ayudar a identificar las condiciones en las cuales la condensación tiene posibilidad de ocurrir.

La extracción de humedad en el interior del invernadero se efectúa a través de la deshumidificación, un proceso que ajusta el equilibrio de agua en el aire y en las superficies del invernadero. DPV es la diferencia (déficit) entre la cantidad de agua en el aire (en forma de vapor) y la cantidad de humedad que puede acomodar cuando está saturado de agua (vapor). DPV funciona como un práctico indicador del potencial de condensación al cuantificar cuán cerca está el aire en el invernadero de su punto de saturación. El aire está saturado cuando alcanza su máxima capacidad de retener agua en cualquier grado de temperatura (punto de condensación). Al agregar humedad al aire más allá del punto de condensación se produce una deposición de agua líquida en algún lugar del sistema hídrico. Un DPV más alto significa que el aire tiene mayor capacidad de retener agua, estimulando así la transferencia del vapor de agua (transpiración) al aire en esta condición de baja humedad. DPV más bajo, por otro lado, conlleva un nivel

de saturación del aire completa o casi completa, de manera que el aire no puede aceptar humedad de la hoja en esta condición de alta humedad, (Prenger y Ling, 2005).

Según algunos estudios por Lorenzo (2012) es habitual pasar en un mismo día desde el punto de rocío a una humedad relativa del 30 % o de un déficit de presión de vapor de 0.2 kPa durante la noche a valores superiores a 3 kPa al mediodía solar. Las situaciones extremas que originan elevado déficit de presión de vapor entre las hojas y el aire suelen presentarse los días de alta insolación, especialmente al inicio del cultivo y pueden alcanzarse DPV próximos a 5 kPa, sucede cuando el índice de área foliar del cultivo es bajo y por tanto también su capacidad de disipar el calor a través de la transpiración.

Según los estudios realizados por Prenger y Ling (2005) muestran que los patógenos fúngicos sobreviven por debajo de 0.063 psi DPV (<0.43 kPa). Además, la infección de enfermedades en una planta resulta en mayor daño por debajo de 0.030 psi (.20 kPa). Entonces, el clima de un invernadero debe mantenerse más alto que 0.030 psi (0.20 kPa), para prevenir enfermedades y daño del cultivo.

Por Körner y colaboradores (2003) se reportan valores de referencia del DPV entre 0.3–1.0 kPa que ayudan a mantener los cultivos sin problemas de enfermedad y con una adecuada transpiración de las plantas. En Sánchez y Rebolledo (2001) se reporta un rango de temperatura adecuado para el cultivo de jitomate en invernadero que debe estar en 16–24 °C; sin embargo, las perturbaciones climáticas no lineales no siempre permiten mantener estos valores de temperatura en el rango de interés como es la radiación solar. También estudios realizados por Salazar y colaboradores (2011) reportaron temperaturas entre los 20 y 30°C, con humedades relativas dentro del 60 y 80% como zona de confort para el cultivo de jitomate que coinciden con un valor de DPV entre 0.3kPa y 1kPa.

Las siguientes fórmulas pueden ser utilizadas para calcular DPV directamente, o a través de una hoja de cálculo.

1) Mide la temperatura y humedad relativa dentro del invernadero. Si es posible, mide también la temperatura dentro de la planta o follaje de la planta.

2a) Establece la presión de vapor de saturación del aire ($p_{v_{sat}}$) en psi:

$$p_{v_{sat}} = e(A/T + B + CT + DT^2 + ET^3 + F \ln T)$$

Con:

$$A = -1.044\ 039\ 7 \times 10^4$$

$$B = -1.129\ 465\ 0 \times 10^1$$

$$C = -2.702\ 235\ 5 \times 10^{-2}$$

$$D = -1.289\ 036\ 0 \times 10^{-5}$$

$$E = -2.478\ 068\ 1 \times 10^{-9}$$

$$F = -6.545\ 967\ 3$$

T – temperatura en el aire °R,

$$°R = °F + 459.67$$

3) Calcula la presión de vapor en el aire ($p_{v_{aire}}$) en psi, en la humedad relativa.

$$p_{v_{aire}} = p_{v_{sat}} \times HR / 100$$

Con:

HR = humedad relativa (%) del aire en invernadero

$p_{v_{sat}}$ = presión de vapor de saturación del aire (psi)

4) Calcula la diferencia, DPV, en psi.

$$DPV = p_{V_{sat}} - p_{V_{aire}}$$

$p_{V_{sat}}$ – $p_{V_{sat}}$ de la mata si se puede medir; si no, utiliza $p_{V_{sat}}$ del aire

Sustituyendo tenemos como resultado la siguiente ecuación (Rosenberg et al., 1983):

$$DPV = 0.61078 \exp\left(\frac{17.269 \cdot Ta}{Ta + 237.3}\right) \cdot \left(1 - \frac{HR}{100}\right)$$

Donde:

DPV= Déficit de presión de vapor (kPa)

Ta = Temperatura del aire (°C)

HR = Humedad relativa (%)

III. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

3.1 Problemática

El crecimiento y desarrollo de los cultivos dependen en mayor medida de los factores ambientales en el interior del invernadero, de tal forma que una desviación de los valores ideales de temperatura y humedad relativa afectara los rendimientos del cultivo. En zonas como Amazcala del Márquez, Querétaro, las temperaturas diurnas sobrepasan los 30 grados centígrados en épocas de verano, lo que propicia que dentro de los invernaderos se alcancen temperaturas superiores a los 40 grados centígrados y humedades relativas por debajo del 20%, aunado a que no se tienen controles de clima basados en una correcta estrategias climáticas sino en programación por tiempos, que resultan inadecuados o bien mal caracterizados, por lo que los rendimientos son afectados por el estrés ocasionado directamente por las variables de microclima.

En México según la SEMARNAT (2008), las zonas muy áridas, áridas, semiáridas y subhúmedas secas ocupan aproximadamente 128 millones de hectáreas, es decir, más de la mitad del país, involucrando casi a todos los estados de México incluyendo el estado de Querétaro. Además en el mundo día a día el cambio climático es cada vez más impredecible lo que nos obliga a que la producción a cielo abierto sea cambiada por producción bajo invernadero y estar al tanto de esos cambios.

3.2 Justificación

Se necesitan implementar estrategias climáticas en invernaderos que permitan mejorar la eficiencia del uso de controles de clima que permitan el buen desarrollo de los cultivos en condiciones climáticas favorables. Trabajando con un mejor manejo de los invernaderos a un bajo costo mejorando la eficiencia de la ventilación que ayudarían directamente a corregir temperatura y humedad relativa en el interior de invernaderos. Será un gran paso para alcanzar la autosuficiencia alimenticia que México necesita y elevar el nivel de calidad de vida de los campesinos.

IV. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

4.1 Objetivo General:

Determinar estrategias de control climático basadas en manejo de ventilación natural para mejorar las condiciones microclimáticas dentro del invernadero.

4.2 Objetivos particulares:

- *Diseñar estrategias de control climático para un invernadero mediante la manipulación de apertura y cierres de ventanas laterales y cenitales.*
- *Comparar estrategias que nos permitan mejorar la temperatura y humedad relativa dentro del invernadero con el fin que sirva como propuesta para el desarrollo de controles climáticos en el invernadero.*

4.3 Hipótesis:

El uso de estrategias climáticas basadas en manejo de la ventilación puede mantener la temperatura y humedad relativa con valores cercanos a los requeridos por un cultivo de tomate en invernadero.

V. METODOLOGÍA

5.1 Ubicación del área de investigación.

El experimento se desarrolló en el Campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro, localizado en el poblado de Amazcala perteneciente al municipio del Marqués, Querétaro, que colinda al oeste con el municipio de Querétaro, al norte colinda con el estado de Guanajuato, al sur con el municipio de Huimilpan y Pedro Escobedo y al este con el municipio de Colon (figura 5.1).

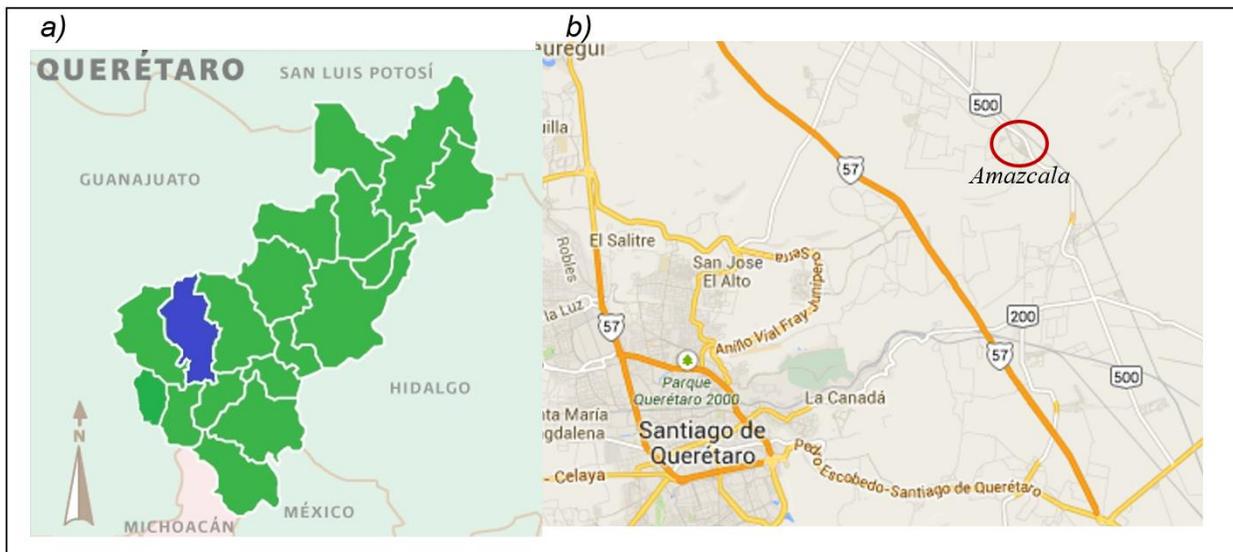


Figura 5.1 Ubicación geográfica del experimento en el estado de Querétaro, a) municipio de El Marqués, b) Poblado de Amazcala.

El experimento se realizó en un invernadero con un área de trabajo de 432 m² (18 m de ancho y 24 m de largo), orientado de norte a sur, conformado por dos naves, cada uno de 9m de ancho, una altura de 4m a la canaleta y de la canaleta a la parte más alta 2.9m. Cuenta con ventanas laterales con dimensiones de 16 m de largo y 2.8 m de alto y ventana cenital en cada nave con salida de aire asía el oeste, todas las ventanas están cubiertas con malla antiáfidos y la cubierta del invernadero de plástico de 720 galgas, actualmente está con cultivo en cosecha de tomate bola y berenjena.



Figura 5.2 Invernadero experimental (ie-2) de 432 m².

5.2 Evaluación de microclima.

Las variables que se computaron y analizaron fueron temperatura del aire y humedad relativa del interior y exterior del invernadero, así como la cantidad de CO₂ en el interior del invernadero.

Se utilizaron seis dispositivos Datalogger WatchDog Serie 1650 (Micro Station) con un rango de operación, para la variable temperatura, de -40°C a 50°C, y una precisión de 0.6°C e intervalos de humedad relativa de 0 a 100%, con una precisión del 3%. Estos data loggers estiman el valor de la humedad absoluta, asumiendo una presión atmosférica de 1 atmósfera, condición que se cumple en localidades que se encuentran al nivel del mar.

Se colocaron diez sensores externos de temperatura de la marca spectrum compatibles con los sistemas Watchdog serie 1000 los cuales contaban con sensor de temperatura y humedad relativa internos. Todos colocados de forma estratégica para obtener una mejor representación y toma de datos de las variables a medir. Para la medición de CO₂ un sensor monitor compatible con los Watchdog serie 1000 marca spectrum.



Figura 5.3 Sensores a utilizar. a) datalogger watchdog serie 1000, b) sensor de temperatura, c) monitor de CO₂.

5.2.1 Ubicación de sensores

Para llevar a cabo la evaluación microclimática de los invernaderos se seleccionaron cinco sectores en su interior, resultando así los siguientes tratamientos: ventana derecha que colinda al oeste (Vent der), centro del invernadero (Cent), ventana izquierda que colinda al este (Vent izq), cenital derecha cenital de la nave que colinda al oeste (Cen der) y cenital izquierda de la nave que colinda con el este (Cen izq). En cada uno de los tratamientos se colocaron tres sensores (tres repeticiones) a excepción de la parte central donde fueron cuatro sensores (cuatro repeticiones), con el propósito de medir las variables climáticas de temperatura y humedad relativa, tal como en la figura 5.4, donde se puede apreciar la ubicación exacta de cada sensor dentro del invernadero todos colocados con el objetivo de abarcar la mayor área posible. En la figura a) los sensores fueron colocados con el propósito de observar el comportamiento de la temperatura y humedad a diferentes alturas al centro del invernadero, la figura b) nos muestra el comportamiento de parámetros a lo largo de las ventanas cenitales, y en la figura c) podemos observar la temperatura y humedad relativa a través de todo un plano a la altura de planta aproximadamente 1.2m del suelo. Para proceder a la toma de datos (figura 5.4). Además Se registró las variables climáticas del exterior con un equipo de meteorología ubicado en el campus Amazcala de la UAQ.

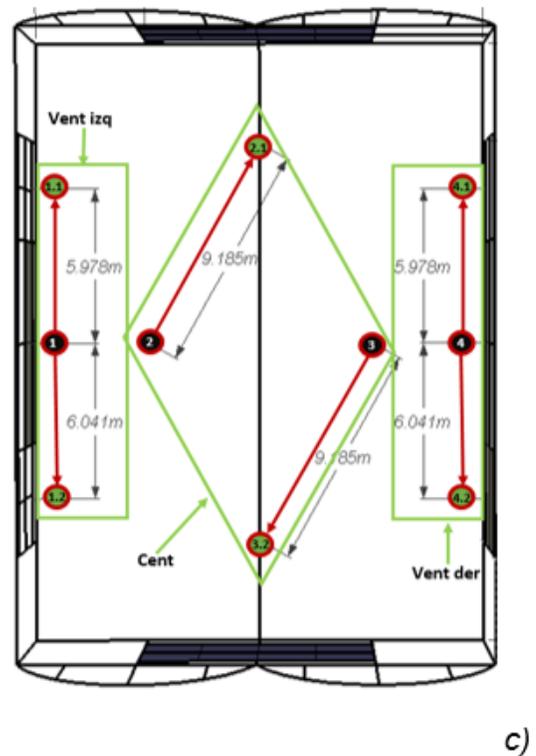
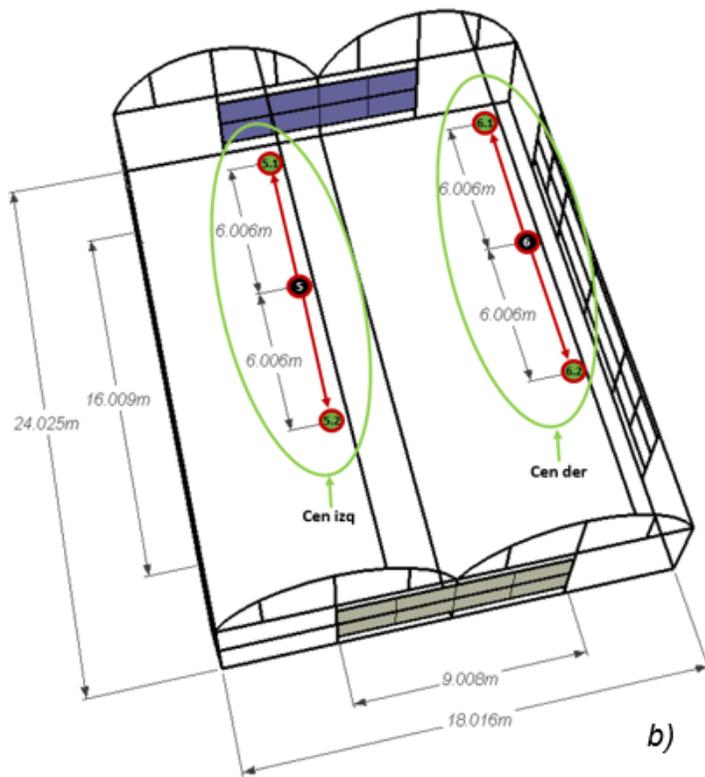
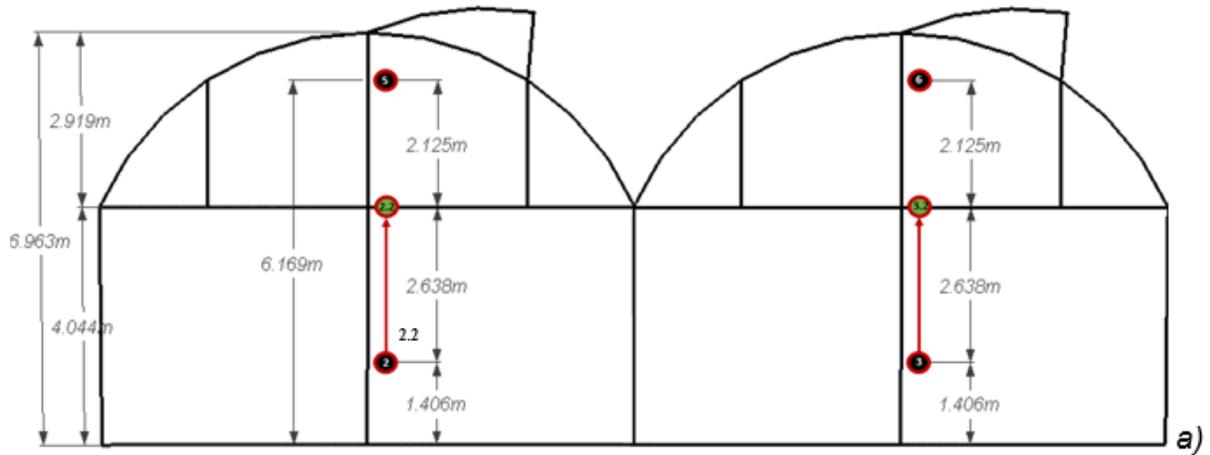


Figura 5.4 Distribución de sensores dentro del invernadero. Los círculos marcados como negro y rojo son los dataloggers y los marcados con verde y rojo son los sensores que están conectados al datalogger, las flechas indican que sensor de temperatura está conectado al datalogger a) vista frontal de sensores de diferencial de altura (efecto invernadero) colocados en el centro de cada nave. b) sensores colocados a través de la

ventana cenital tomando como referencia el centro de la cenital. c) vista aérea de sensores colocados a altura de planta 1.2m del suelo.

5.3 Planeación de estrategias.

. En el invernadero donde se realizó el estudio es un invernadero experimental donde se trabaja con jitomate variedad bola, la cual para su desarrollo ideal espera tener una temperatura que oscila entre 20 y 30°C durante el día y entre 1 y 17°C durante la noche. Temperaturas superiores a los 30-35°C afectan al fructificación por mal desarrollo de óvulos, el desarrollo de la planta en general, y del sistema radicular en particular. Temperaturas inferiores a 12-15°C también originan problemas en el desarrollo de la planta. La humedad relativa óptima oscila entre el 60 y 80%. Humedades relativas muy elevadas favorecen el desarrollo de enfermedades del follaje y el agrietamiento del fruto y dificultan la fecundación, debido a que el polen se compacta, abortando parte de las flores.

Los estadios climáticos cuando se llevó a cabo la experimentación fueron otoño e invierno, donde las temperaturas diurnas en la región de Querétaro son elevadas y las nocturnas bajas, por lo que nos interesó eliminar calor por el día y conservar calor por la noche, así que la temperatura e intensidad luminosa son nuestras variables. Por lo que las estrategias estuvieron principalmente en función de la temperatura interna del invernadero la cual sirvió como control para la apertura-cierre de las ventanas que fue de 18°C, con el fin de que la planta se mantenga en una temperatura lo más cercana a la ideal, lo más prolongado posible.

Otra consideración que se tomó en la apertura de las ventanas fue que se abrieron gradualmente un 33% cada 10 minutos con la finalidad de evitar un choque térmico a las plantas por las condiciones climáticas que se presentaban de temperaturas bajas por las mañanas. Este manejo estuvo de acuerdo con las prácticas comerciales de la región.

Cuadro 5.1. Estrategias climáticas a implementar en el invernadero experimental.

<i>Est 1</i>	<i>Apertura de todas las ventanas (gradualmente un 33% cada 10 min).</i>	<i>Apertura en temperatura al centro del invernadero de 18°C y cierre a temperatura de 25°C.</i>
<i>Est 2</i>	<i>Apertura de solo ventanas Cenitales (gradualmente de 33% cada 10 min).</i>	<i>Apertura en temperatura al centro del invernadero de 18°C y cierre a temperatura de 25°C.</i>
<i>Est 3</i>	<i>Apertura de solo ventanas laterales (gradualmente un 33% cada 10 min).</i>	<i>Apertura en temperatura al centro del invernadero de 18°C y cierre a temperatura de 25°C.</i>
<i>Est 4</i>	<i>Apertura solo ventana lateral oeste o derecha (gradualmente un 33% cada 10 min) y ventana cenital.</i>	<i>Apertura en temperatura al centro del invernadero de 18°C y cierre a temperatura de 25°C.</i>
<i>Est 5</i>	<i>Apertura solo de ventana lateral este o izquierda (gradualmente un 33% cada 10 min) y ventana lateral.</i>	<i>Apertura en temperatura al centro del invernadero de 18°C y cierre a temperatura de 25°C.</i>
<i>Est 6</i>	<i>Apertura de ventana cenital izquierda y lateral derecha, posteriormente a la 1 pm se cerraron estas y se abrieron cenital derecha y lateral izquierda.</i>	<i>Apertura de cenitales en temperatura al centro del invernadero de 18°C y apertura de laterales a una temperatura de 23°C y cierre de las contrarias a temperatura de 25°C.</i>

5.4 Análisis de datos.

La medición de las variables climáticas para cada estrategia se programó para registrarse cada 5 min, las 24 horas del día y durante 4 días seguidos (cuatro repeticiones) con cada una de las estrategias. Para su análisis, primero se promediaron los datos registrados cada 5 min, en las tres repeticiones de cada sector y en el caso del centro con sus cuatro repeticiones. Posteriormente se promediaron las mediciones de

temperatura de las 12:00 am a las 7:00 am, y de ahí en adelante se promediaron cada 4 horas hasta llegar a las 7:00 pm, con un total de 5 promedios a analizar, que son las horas donde más incide radiación y donde nos interesa más el comportamiento de energía en el interior del invernadero. Una vez dispuestos los datos de la anterior forma los se analizaron estadísticamente mediante una comparación de medias y una prueba de Turkey, utilizando el paquete estadístico OriginPro versión 8 para cada variable con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$.

También se estimó el déficit de presión de vapor (DPV), por medio de la ecuación de Rosenberg (1983), con la temperatura y humedad relativa sensadas de 6 horas puntuales en el día (7:00 am, 11:00 am, 1:00 pm, 3:00 pm, 5:00 pm y 7:00 pm) y se promediaron las cuatro repeticiones con cada estrategia, e igual que con la temperatura se realizó una comparación de medias de las estrategias y se realizó una prueba de Turkey con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$.

Posteriormente se analizó el comportamiento promedio de humedad relativa y CO_2 de cada estrategia.

VI. ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 Caracterización de sensores.

Todos los sensores fueron colocados en una estufa donde las temperaturas no oscilaran, con el propósito de mantener los sensores en el mismo rango de temperatura que fue aproximadamente entre los 35°C y humedad del 30%, y poder canalizar posibles errores que pudiera haber de fábrica y eliminarlo a los datos tomados en el invernadero.



Figura 6.1 Estufa de temperatura controlada, ubicada en el laboratorio de peces del campus Amazcala.

También se utilizó la herramienta línea de tendencias lineal de Windows office, con el propósito de predecir el valor de “y” (temperatura de sensor en el invernadero) tomando como referencia el valor de “x” (sensor propuesto como referencia para todos los sensores en el invernadero) y así eliminar lo mayor posible las variaciones que pueda a ver entre sensores y no repercutírsele a el verdadero cambio climático que se pueda presentar en el interior del invernadero.

Para todos los sensores se modelo una ecuación de regresión lineal y se tomó como referencia el sensor TMPA1, que es el que presentaba un comportamiento más lineal contra un termómetro de mercurio. Y para el sensado de humedad relativa se tomó

como referencia el sensor del datalogger 1. En la figura 6.2 se muestra el comportamiento de la tendencia lineal del sensor TMPB1 sobre TMPA1.

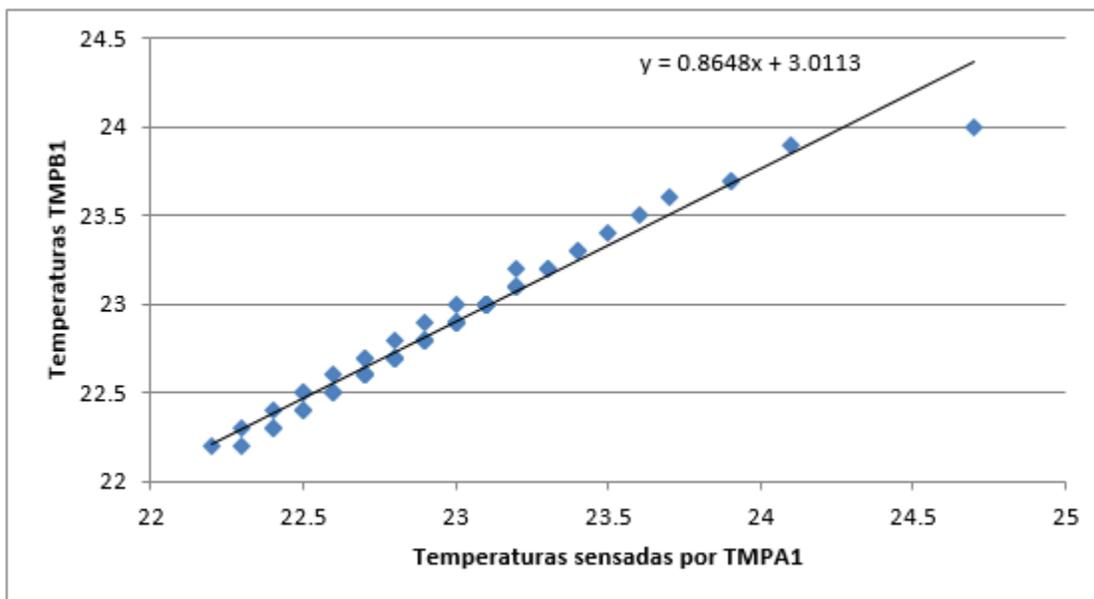


Figura 6.2 Caracterización del sensor de temperatura TMPB1 sobre TMPA1.

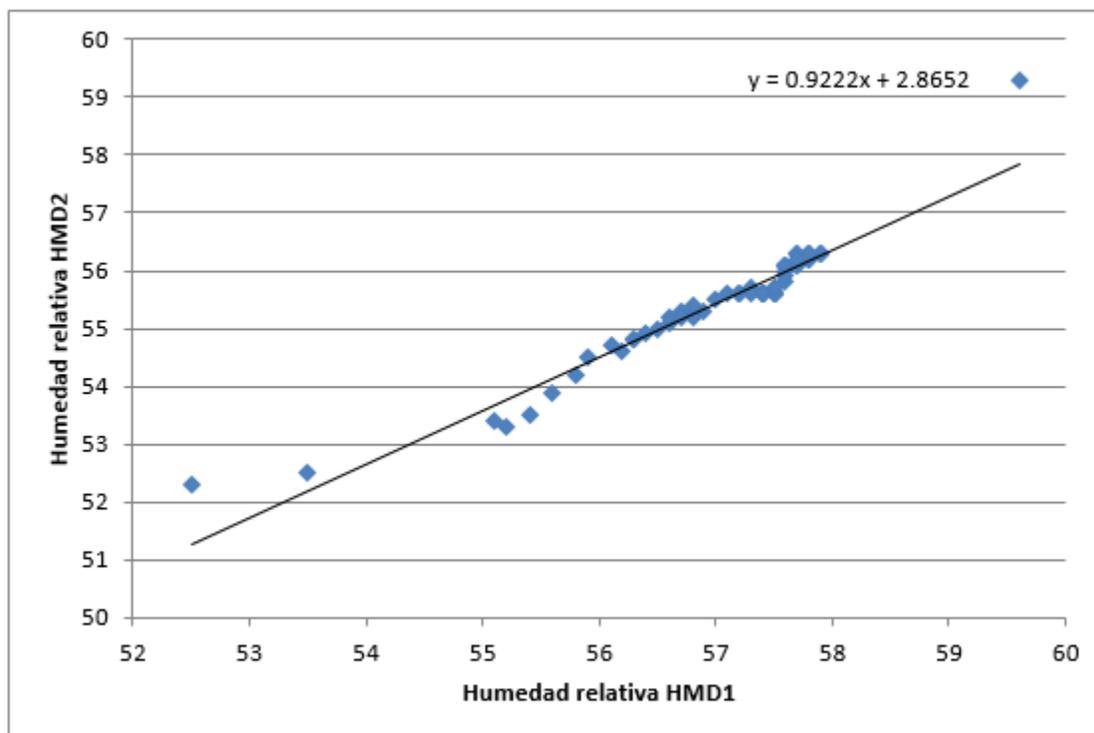


Figura 6.3 Caracterización del sensor de humedad relativa HMD2 sobre HMD1.

6.2 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se consideró tres análisis:

- *El primer análisis fue la comparación entre las medias de los promedios de temperaturas computadas de las 8:00 am a las 8:00 pm en las diferentes áreas del interior del invernadero (Ven izq, Ven der, Cent, Cen izq y Cen der) menos el promedio de la temperatura exterior de la mismas horas, durante los 4 días con cada estrategia.*
- *En el segundo análisis, se realizó un estudio de comparación de medias del déficit de presión de vapor con los datos tomados de temperatura y humedad relativa a diferentes horas del día.*
- *Se realizó un análisis del comportamiento en el interior del invernadero de CO₂ y humedad relativa promedios.*

6.2.1 Análisis de temperatura.

En el primer análisis es respecto a una comparación entre las medias de los promedios de temperaturas computadas durante el día (7 am, 11 am, 1 pm, 3 pm, 5 pm y 7 pm) en las diferentes áreas del interior del invernadero, además se puede agregar que en estas comparaciones ya se contaba con la ecuación de caracterización y un diferencial de temperaturas (exterior contra interior).

En dicho análisis se observó que si existe diferencia estadística significativa, en el análisis de variancia de las temperaturas entre estrategias en los diferentes puntos se observa que la probabilidad del valor F es lo suficientemente pequeño como para que se encuentre una diferencia significativa con un valor de significancia $p \leq 0.05$ entre algunas de las diferentes estrategias en algunas de las diferentes partes del invernadero (figuras 6.4 a 6.8).

En la gráfica 6.4 se plasma las medias de la diferencia de temperatura promedio de las 12 am a las 7 am, comparadas entre estrategias en los diferentes puntos del invernadero y se encontraron diferencias estadísticamente significantes entre las estrategias 3 y 6 en todas las partes del invernadero, siendo la estrategia 3 la que más conserva energía calorífica durante esas horas nocturnas en la cual se mantenía abiertas las ventanas laterales pero con las cenitales cerradas, dicha acción ayudaron a acumular calor durante el día y mantenerlo durante más tiempo durante la noche, se puede observar diferenciales temperaturas negativas, las cuales nos indican que la temperatura del invernadero es menor que la del exterior, estas horas de la madrugada son las más críticas en cuanto a temperaturas bajas donde se registraron temperaturas en el interior del invernadero de hasta -1.7°C , también se puede observar a simple vista que donde más conservación de temperatura se tiene en el centro del invernadero.

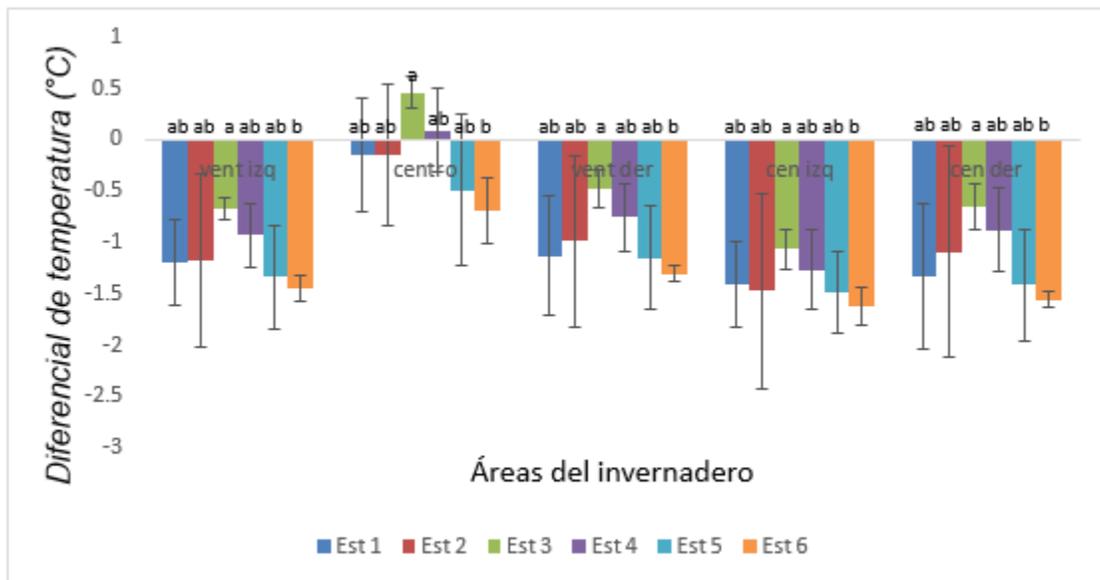


Figura 6.4 Diferencial de temperatura del promedio de 12 am a 7 am entre las diferentes estrategias en las diferentes partes del invernadero.

El siguiente análisis de la figura 6.5 se realizó con las mismas condiciones pero del promedio del diferencial de temperaturas de las 7 am a las 11 am, donde se observó diferencia significativa solo en la ventana derecha del invernadero en la estrategia 6 con

las estrategias 2 y 3 teniendo estas dos últimas una media y desviación estándar parecidas demostrando la estrategia 6 como la menos calurosa siendo más eficiente a esa hora que las dos anteriores.

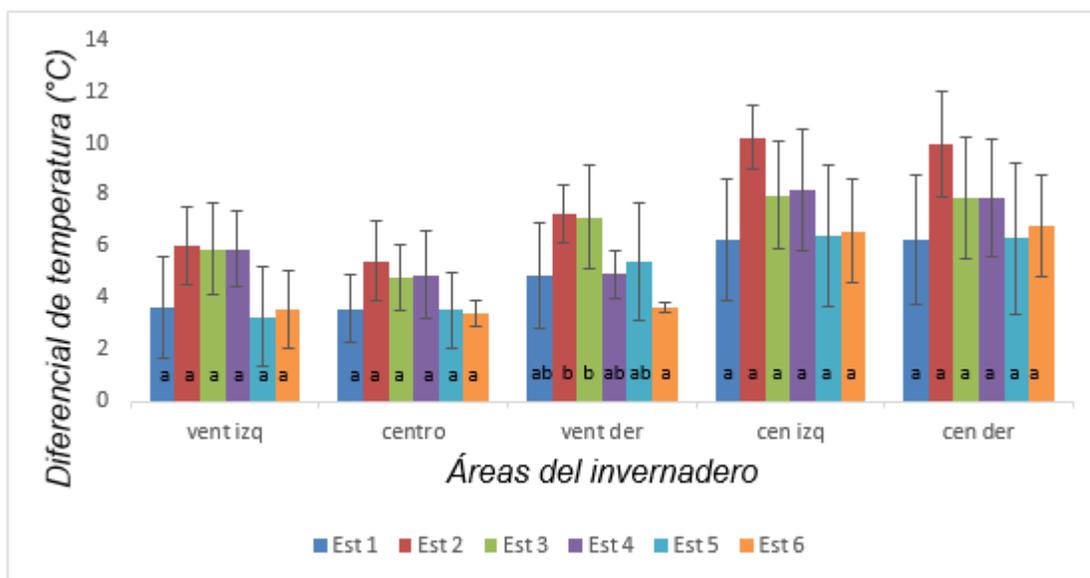


Figura 6.5 Diferencial de temperatura del promedio de 7 am a 11 am entre las diferentes estrategias en las diferentes partes del invernadero.

El siguiente análisis fue de las 11 am a las 3 pm mostrado por la figura 6.6 donde se canalizaron diferencias significativas en todas las ventanas del invernadero a excepción del centro. En la ventana izquierda hubo diferencia entre la estrategia 3 con la 5 y 6 teniendo estas una media y desviación muy parecida entre ellas conservando menos calor, donde se jugó con cenitales y alguna de las ventanas laterales, en cambio la 3 solo se abrió las laterales sin apertura de cenital. En cambio la ventana derecha se encontró diferencia significativa entre la estrategia 4 con la 3 y 5 estas dos últimas teniendo una conservación de calor más alta, haciendo que la estrategia 4 sea más eficiente, puesto que estaba abierta la ventana de ese lado con cenital. Al observar el análisis en la ventana cenital izquierda se observa que solo la estrategia 2 es diferente a todas las demás teniendo el índice de conservación de calor más alto. Lo mismo ocurrió en cenital derecha con un comportamiento estadísticamente igual que la izquierda, esto coincide con que en esta estrategia se mantuvieron cerradas las ventanas cenitales sin

embargo la temperatura que nos interesa es la que está a altura de planta, podemos decir que la temperatura de la estrategia 2 es estadísticamente igual que la temperatura de la estrategia 4 que es la que presento un comportamiento más eficiente conservando un menor diferencial de temperatura. Otra observación importante fue en el análisis de las 11 am a 3 pm, es que son las horas donde más conservación de energía calorífica se tiene en el interior del invernadero en todas las áreas con diferenciales de temperatura de 10°C a altura de planta y de hasta casi los 20°C en cenitales.

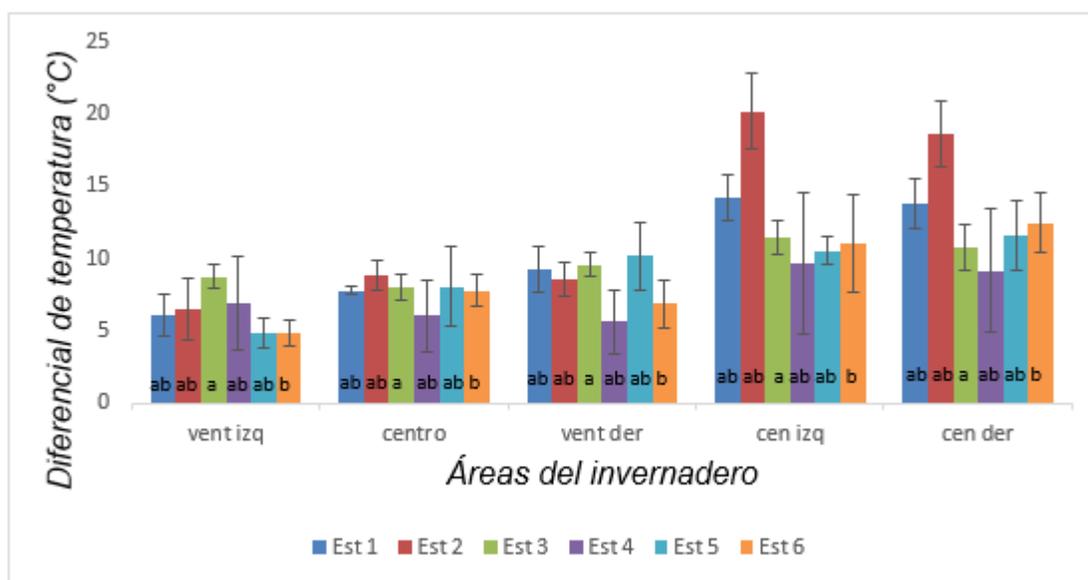


Figura 6.6 Diferencial de temperatura del promedio de 11 am a 3 pm entre las diferentes estrategias en las diferentes partes del invernadero.

El análisis realizado de las 3 pm a las 7 pm mostro diferencias significativas en todas las áreas del invernadero con algunas de las estrategias mostradas en la figura 6.7. En la ventana izquierda se encontró estadísticamente diferencia entre la estrategia 3 con la 2 y 4 donde estas dos son menos calurosas. En el centro se observó diferencia en la estrategia 6 con 2 y 4 siendo estas dos últimas las más frías, este mismo comportamiento se vio en la ventana derecha. Mientras que en ambas ventanas cenitales se observó que hay diferencia estadística entre la estrategia 6 y 4 siendo la 4 la más fría. En todas las áreas del invernadero la estrategia 4 es la más eficiente en estas horas

coincidiendo con que en esta estrategia se mantuvo abierta la ventana izquierda y la orientación solar.

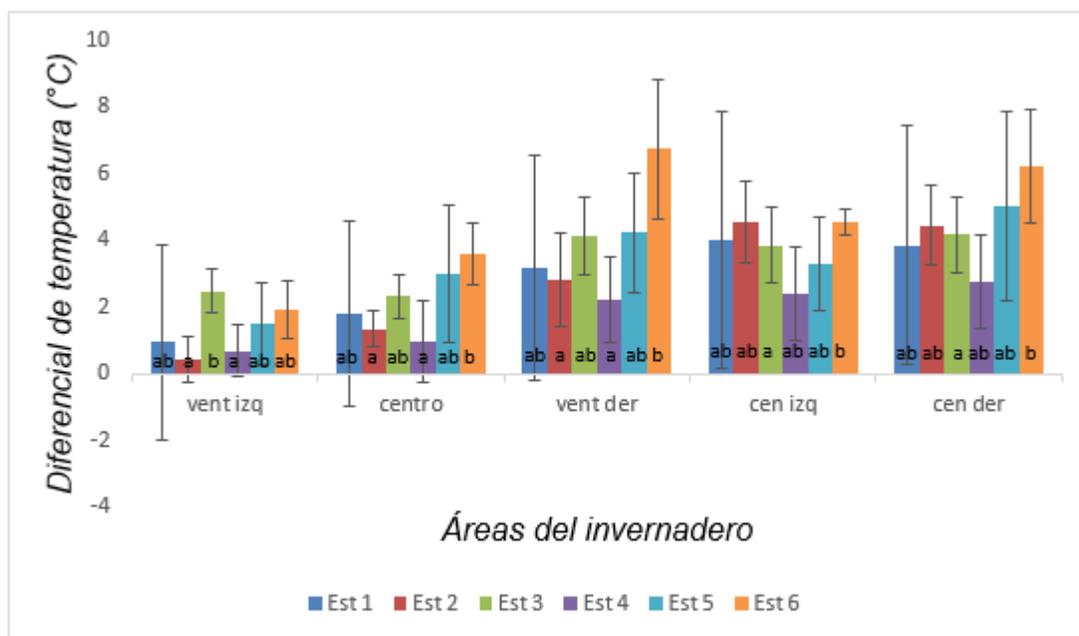


Figura 6.7 Diferencial de temperatura del promedio de 3 pm a 7 pm entre las diferentes estrategias en las diferentes partes del invernadero.

En el último de los análisis de temperatura realizada de las 7 pm a las 12 am mostrado por la figura 6.8, demuestra en todas las áreas del invernadero no se encontraron diferencias estadísticamente significativas, solo en el centro se encontró diferencia entre la estrategia 3 y 2 siendo la 3 la que conservo más calor. Cabe mencionar que estas son las horas donde se encuentra un diferencial de temperatura más alto con diferenciales de hasta -2.5°C , lo cual nos quiere decir que son las horas donde hay un cambio térmico más rápido.

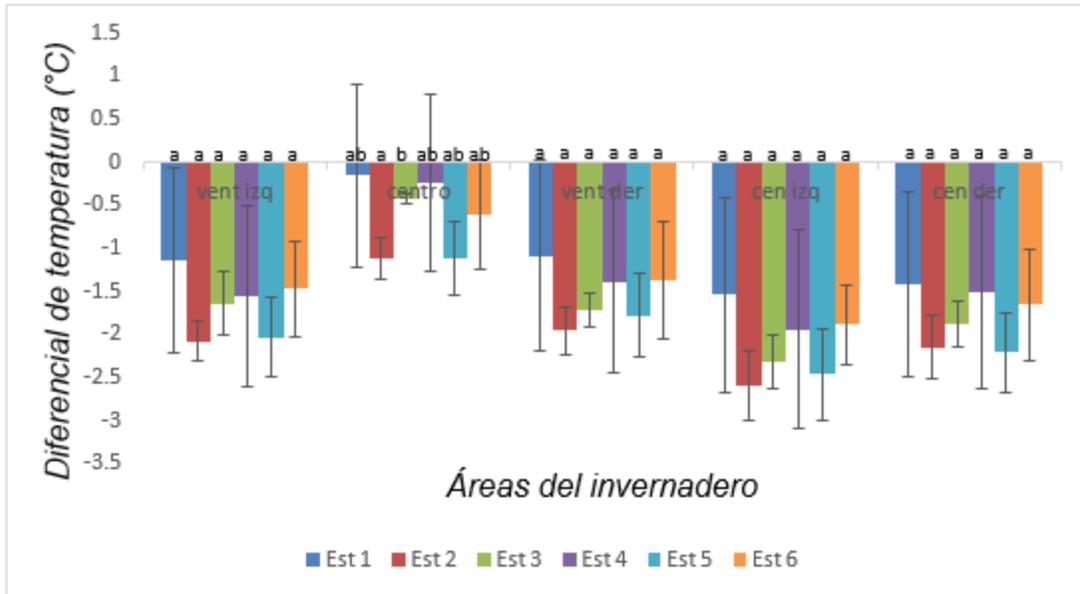


Figura 6.8 Diferencial de temperatura del promedio de 7 pm a 12 am entre las diferentes estrategias en las diferentes partes del invernadero.

5.2.2 Análisis de déficit de presión de vapor

Para el segundo análisis se realizó un estudio del déficit de presión de vapor. Donde se realizó un análisis de comparación de medias del déficit de presión de vapor calculado con los promedios de temperaturas y humedades relativas censadas a altura de planta entre las diferentes estrategias, y realizado a diferentes horas.

Tras realizar el análisis del déficit de presión de vapor se observó que no se encontraron diferencias estadísticas significantes entre las estrategias en ninguna de las horas donde se realizó el análisis. Sin embargo tras analizar la gráfica podemos observar que el aumento de temperatura y la disminución de humedad relativa son directamente proporcional al incremento del DPV donde se observa que a partir de las 11 am esta fuera del DPV ideal para jitomate que está dentro de 0.3kPa a 1kPa. Sin embargo no se encontró una estrategia que se considere mejor estadísticamente para mantener este rango de DPV.

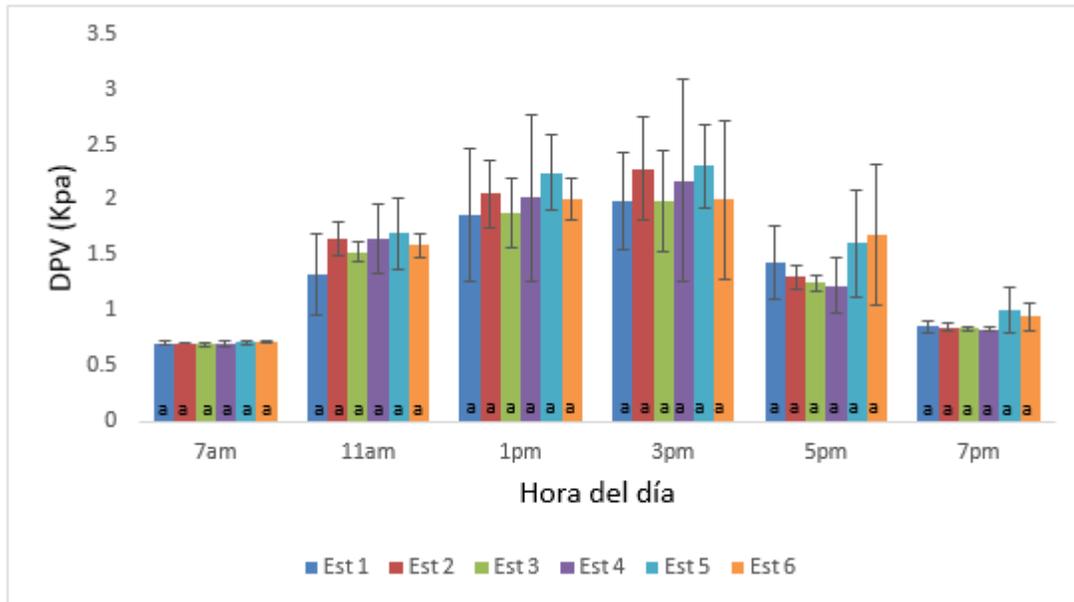


Figura 6.9 Déficit de presión de vapor de los diferentes puntos del invernadero con las diferentes estrategias.

5.2.3 Análisis del comportamiento de humedad relativa y CO₂.

El comportamiento de los resultados para la variable humedad absoluta (Figura 6.10), muestran que fue mayor en las estrategia 1, 2 y 3, y menor en las estrategias 4, 5 y 6. Esta variación refuerza la teoría de que una mayor acumulación de energía en las estrategias 1, 2 y 3 actuará sobre la evapotranspiración del cultivo y como consecuencia se tendrá un mayor índice de humedad absoluta en este sector. Sin embargo que las altas velocidades del viento y la reducida área efectiva de ventilación no sean suficientes para evacuar la humedad absoluta excesiva del interior del invernadero.

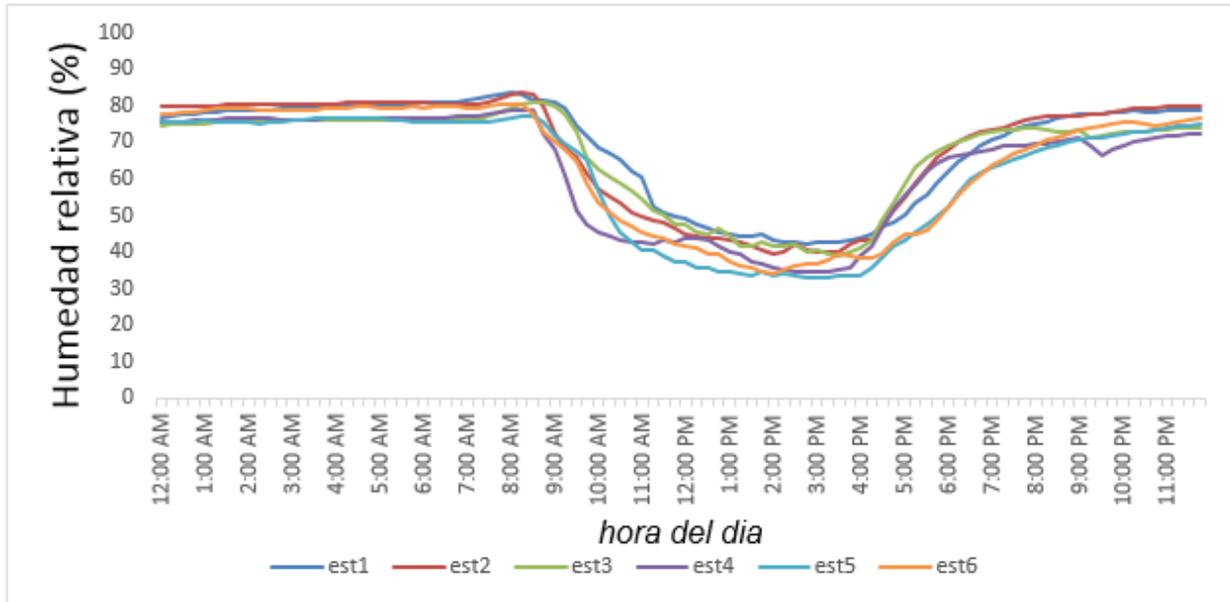


Figura 6.10 Comportamiento promedio día de HR de las estrategias.

Y al observar el comportamiento de CO_2 se puede canalizar que las estrategias que mejor conservan la concentración son la estrategia 2 en la cual se manejaron ventanas cenitales abiertas y laterales cerradas, seguido por la estrategia 3 en la cual se mantuvieron abiertas las laterales con cenital cerrada. Comprobando la teoría que cuando mayor sea el área de ventilación, menor será la concentración de CO_2 .

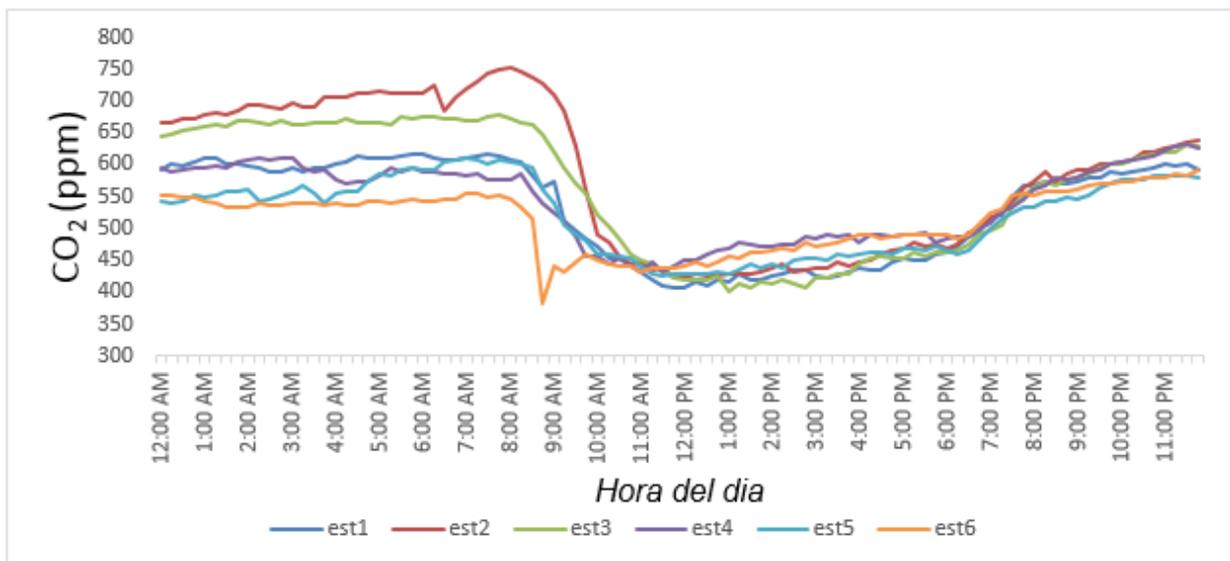


Figura 6.11 Comportamiento promedio día de CO_2 de las estrategias.

VII. DISCUSIONES

En cuanto a temperatura la mejor estrategia para conservarla para horas nocturnas o días fríos, es la estrategia 3. La cual consiste en mantener solo las ventanas laterales abiertas, lo que para el clima de la temporada donde se llevó acabo el experimento (oct – dic), cerrar las ventanas cenitales antes de lo propuesto en este experimento mejoraría las condiciones nocturnas del interior con una temperatura más alta. Mientras que durante las primeras horas del día (de 7am a 11am) se expresaron mejor las estrategias donde había mayor área de ventilación y juego de ventanas variado como alguna ventana lateral y una cenital como es el caso de la estrategia 6, 4 y 5 donde tienen una ventana lateral abierta y las cenitales, al igual que la 1 que es la que tiene todo abierto. A horas más avanzadas del día donde la intensidad luminosa es la máxima y el diferencial de temperatura es el más alto de entre las 11am a las 3 pm la estrategia que es mejor estadísticamente, es la 4 seguida por la 6 que permanecen con la ventana derecha abierta y cenitales abiertas, en el caso de la 6 solo la cenital izquierda. Al observar las últimas horas de luz del día, resulta ser mejor las estrategias con apertura al lado derecho y solo apertura de ventanas cenitales como son las estrategias 4 y 2. Una observación que hay que resaltar, es que a pesar de que la estrategia 1 es donde se mantiene el invernadero con todas sus ventanas abiertas no se comportó como la más eficiente sin embargo se mantuvo estadísticamente igual para las que resultaron mejores.

Pudimos observar que en cuanto a los promedios día de humedad relativa y la concentración de CO₂ hubo ciertas coincidencias teniendo mayor incidencia de ambas de las 7 am y una disminución casi a mínima a las 10 am con las mismas estrategias 2 y 3 donde coinciden las de menor área de ventilación, o una mayor conservación del aire durante las últimas horas del día, sin embargo durante las horas de más incidencia luminosa de 12 pm a 7pm las estrategias que mantienen un mayor concentración de CO₂ son la estrategia 4 y 6 las cuales mantienen la ventana derecha y cenital abierta, las cual

demuestran tener una mejor ventilación que las demás ya que ayudan a mantener una mejor concentración de CO₂ en el interior del invernadero.

En cuanto al DPV no se encontró diferencia estadística entre estas estrategias en estas condiciones de clima. Sin embargo pudimos confirmar que el incremento en temperatura y reducción en la humedad relativa es directamente proporcional al DPV y que en temperaturas y humedades que se tenían a horas como las 7am a 9am y 7pm son buenas para tener un DPV ideal para el cultivo de jitomate por lo tanto es necesario llegar a algo similar a esas condiciones.

Por lo anterior la mejores estrategias fueron la 4, 5 y 6 las cuales solo mantenían ventanas cenitales y una ventana lateral abiertas. Donde 5 y 6 se mantuvo la ventana izquierda abierta y cenitales, las cuales fueron mejores de 7am a 11am, y de 11am a 7pm fueron mejor la 4 y 6 las cuales mantuvieron abiertas las cenitales y la ventana lateral derecha. Y para cualquier estrategia se debería cerrar con anticipación las ventanas laterales ya que la estrategia 2 (ventanas laterales cerradas) se expresó mejor en las últimas horas del día obteniendo una mejor concentración de CO₂ y humedad relativa.

VIII. CONCLUSIONES

Tras la búsqueda de la mejor estrategia básica de control del microclima en el invernadero en estudio es necesario combinar algunas de las estrategias dependiendo de la necesidad, ya sea por temperatura, humedad relativa o CO₂, dentro lo cual también depende de la hora del día, ya que algunas se expresan bien a ciertas horas del día y a otras no fueron las mejores.

Es muy importante comentar que estos análisis y discusiones del mismo son específicamente para la estación donde se realizó el experimento, y es por ello que es necesario llevar acabo el experimento por lo menos un año seguido para someter las estrategias a diferentes condiciones climáticas exteriores (en las cuatro estaciones del año, así como diferentes condiciones, nublados, lluvias, heladas y días muy calurosos) y además hacer combinaciones entre ellas.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- *Alonso, F. J. 2011. Efecto del enriquecimiento carbónico sobre la bioproductividad y la absorción hídrica y mineral del cultivo de pimiento. Tesis Doctoral. Universidad de Almería. pp. 179.*
- *Alpi A., Tognoni F. 1999. Cultivo en invernadero. Ediciones Mudi-Prensa. España.*
- *Arellano G. M. A. 2006. Estudio del microclima en dos subtipos de invernaderos Almería, Agricultura Técnica en México, vol. 32, núm. 2, mayo-agosto, 2006, pp. 225-234, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México.*
- *Ávila J. L.; “acondicionamiento de un invernadero con tecnología alterna para elevar su productividad”. Tesis de maestría en ciencias. Universidad Autónoma de Querétaro, Qro., Mexico (2012).*
- *Bot G P A 1983 Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Ph.D. Dissertation, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands, pp. 240.*
- *Canchola D.L.M. 2010. Nivel tecnológico en invernaderos de México. Ago 2010.*
- *Castañeda Rodrigo, 2002. “Elementos de instrumentación y control para la simulación del balance de energía en un invernadero”. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, Qro., México.*
- *Castilla Nicolás, 2005. Invernaderos de plástico, Tecnología y manejo. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.*

- *E. Mashonjowa, F. Ronsse, J.R. Molford, J.G. Pieters, 2012. “Modeling the thermal performance of a naturally ventilated greenhouse in Zimbabwe a dynamic greenhouse climate model” University of Zimbabwe, department of physics, faculty of science. Harare, Zimbabwe.*
- *Feuilleley. P; Baille, A. 1992. Principios generales para el uso de agua caliente para calefacción de los invernaderos. Técnicas de información. CEMAGREF, 87:1-8.*
- *Javier Z. Castellanos, 2004. Manual de producción hortícola en invernadero segunda edición, por INTAGRI. Celaya, Gto. México.*
- *Körner O., Challa H., 2003. Process–Based Humidity Control Regime for Greenhouse Crops. Comp. and Electr. in Agric., 39:173–192.*
- *López J.C; Lorenzo P; Medrano M.C; Sánchez-Guerrero M.C; Pérez J; Puerto H.M; y Arco M; 2000. Caja rural de Almería, Plaza de Barcelona 5, Almería.*
- *Lorenzo, P. 1998. Los determinantes microclimáticos de la horticultura intensiva en el sur mediterráneo. En; Tecnología de invernaderos II. Curso superior de especialización. Eds.: J. Pérez, I.M. cuadrado. DGIFA, FIAPA y Caja Rural de Almeria; 25-44.*
- *Lorenzo, P. Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Escobar, I. y García, M. 1997. Incorporación de sistemas de calefacción en la horticultura bajo plástico del sur mediterráneo. Actas de horticultura, 17:371-378.*
- *Lorenzo, P. 2012. “El cultivo en invernadero y su relación con el clima” en Cuadernos de estudios agroalimentarios, por IFAPA, CEA03, Pag. 23-44.*

- *Meir Teitel, 2007; Institute of Agricultural Engineering, Agricultural Research Organization, the Volcani Center, P.O. Box 6, Bet Dagan 50250, Israel The effect of screened openings on greenhouse microclimate.*
- *Montero J I; Muñoz P; Antón A 1996 Discharge coefficients of greenhouse windows with insect-proof screens. Acta Horticulturae, 443: 71-77.*
- *Montero J.I. 2006. Evaporative cooling in greenhouses; effect on microclimate, water use efficiency and plant response. ISHS Int. Symp. Cooling. Almeria. Acta Horticulturae (in print.).*
- *N. Katsoulas; T. Bartzanas; T. Boulard; M. Mermier; C. Kittas, 2006. "Effect of vent openings and insect screens on greenhouse ventilation". Department of agriculture crops production and rural environment, school of agriculture science, university of Thessaly. Sophia Antipolis, France.*
- *P. F. Martinez, D. Roca, R. Suay, X. blasco, J. M. Herrero y C. Ramos, 2002. "Avances en el control de los factores del clima para el cultivo en invernadero" Del Instituto Valenciano de Investigación de Ingeniería y la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.*
- *Pérez Parra, J. 2002. Ventilación Natural de invernaderos tipo parral. Tesis doctoral. Universidad de Córdoba.*
- *Prenger J. J.; Ling P. P.; 2005. "Greenhouse Condensation Control: Understanding and Using Vapor Pressure Deficit (VPD)", Ohio State University Extension Fact Sheet, Food, Agricultural and Biological Engineering, USA.*

- *Prenger J. J.; Ling P. P.; 2006. "Greenhouse Condensation Control: Keeping plants warm with thermal screens", Ohio State University Extension Fact Sheet, Food, Agricultural and Biological Engineering, USA.*
- *Rosenberg, N. J.; Blad, B. L. and Verma, S. B. 1983. Microclimate: The biological environment. 2nd. ed. John Wiley and Sons. USA. 495 p.*
- *Salazar M. R; Cruz M. P; Rojano A. A; 2012. "Eficiencia en el uso de la energía en invernaderos mexicanos". Universidad Autónoma de Chapingo, Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.*
- *Sánchez Del Castillo F., Rebolledo E.R.E., 2001. Hidroponía. Edit. Univ. Autónoma de Chapingo.*