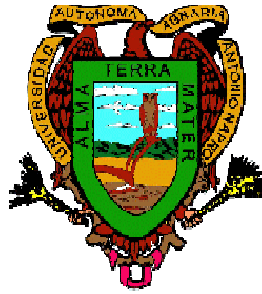


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA**

**“ANTONIO NARRO”**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**



**Efecto de la Ventilación Natural y Velocidad del Viento en la  
Temperatura y Humedad Relativa en el Interior de un Invernadero.**

**Por:**

**SERGIO RODRÍGUEZ BARBOSA**

**TESIS**

**Presentada como Requisito Parcial para**

**Obtener el título de:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México**

**Diciembre del 2010.**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

"ANTONIO NARRO"

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Efecto de la Ventilación Natural y Velocidad del Viento en la Temperatura y Humedad Relativa en el Interior de un Invernadero.

Realizado por:

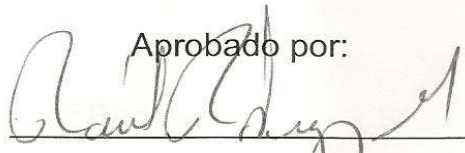
SERGIO RODRÍGUEZ BARBOSA

Que somete a Consideración del H. Jurado Examinador como Requisito Parcial

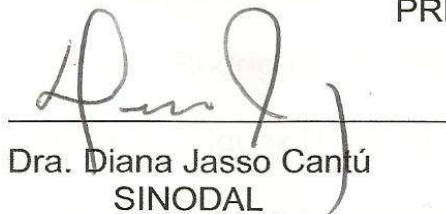
para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

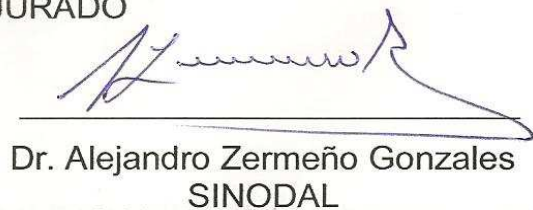
Aprobado por:



Dr. Raúl Rodríguez García  
PRESIDENTE DEL JURADO



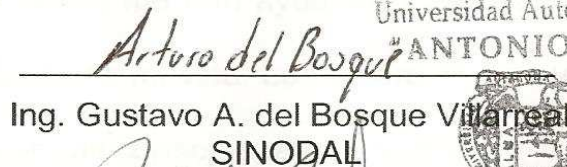
Dra. Diana Jasso Cantú  
SINODAL



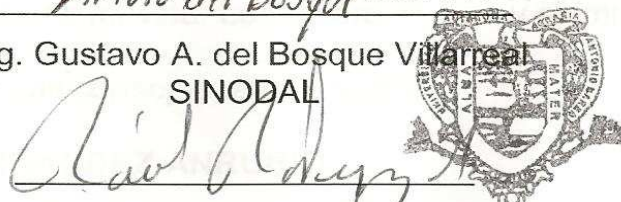
Dr. Alejandro Zermeño Gonzales  
SINODAL

Universidad Autónoma Agraria

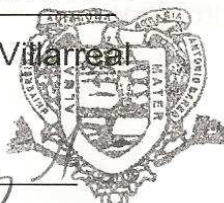
"ANTONIO NARRO"



Ing. Gustavo A. del Bosque Villameal  
SINODAL



Dr. Raúl Rodríguez García  
COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Diciembre 2010



## **DEDICATORIAS**

### **A MIS PADRES**

Bernardo Rodríguez Becerra y María del Refugio Barbosa Pérez Quiero empezar dándoles las gracias por haberme heredado el tesoro mas grande que se le puede dar a un hijo: AMOR.

Mami: No se como agradecerte todo lo que has hecho por nosotros, te admiro por ser como eres la mejor madre del mundo. Tú con tus consejos y comprensión has sabido guiarme. Gracias mami por confiar en mi y por todos esos momentos bellos que hemos compartido, y por todo eso te amo.

Papi: Tú has sido un ejemplo para mí, luchas día a día para salir adelante, tú tienes un gran tesoro que somos nosotros tus hijos y nosotros te tenemos a ti, gracias por confiar en mí y apoyarme para salir adelante, por tu comprensión y paciencia te amo.

### **A MIS HERMANOS**

María del Rosario Rodríguez Barbosa.

Miguel Ángel Rodríguez Barbosa.

Humberto Rodríguez Barbosa.

Gabriel Rodríguez Barbosa.

Quienes de alguna manera me han ayudado y motivado a salir adelante y por que son parte importante en mi vida. Los quiero mucho y siempre los llevare en mi corazón, gracias por sus consejos, apoyo y amor.

### **A ALMA YANETH HERNANDEZ ANRUBIO**

Gracias flaquita por todo tu apoyo, cariño y comprensión, tú me enseñaste muchas cosas buenas y contigo pase muchos momentos bellos y siempre

estuviste conmigo en las buenas y en las malas, por eso y mas te adoro  
flaquita.

### **A MIS TIOS**

Aurora Barbosa Pérez.

David Barbosa Pérez.

Rogelio Barbosa Pérez.

Arturo Barbosa Pérez.

Reynaldo Barbosa Pérez.

Verónica Barbosa Pérez.

Florentina Rodríguez Becerra.

Gracias tíos por toda su confianza y apoyo que me brindaron durante el tiempo  
que estuve preparándome los quiero.

### **A MIS ABUELOS**

Petra Becerra.

David Barbosa.

Antonia Pérez.

Gracias por sus consejos, comprensión y apoyo que me brindaron para salir  
adelante se los agradezco mucho los quiero.

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A DIOS NUESTRO SEÑOR**

Por que gracias a el he podido ser y construir lo que ahora soy, por darme salud y guiarme por el mejor camino en todo momento, pero sobre todo darme la fe de creer en el.

### **A MI ALMA TERRA MATER**

Por haber permitido que me formara y creciera profesionalmente y durante todo este tiempo compartir y conocer otras personas que nunca olvidare, estaré eternamente agradecido.

Al **Dr. Raúl Rodríguez García** por brindarme la confianza que necesitaba en los momentos difíciles y guiarme por el buen camino del conocimiento para enfrentarme sin miedo a nada a cualquier reto que se me presentara, ya que la vida es un reto con muchos obstáculos que superar para poder alcanzar el éxito.

Al **Ing. Arturo del bosque** por brindarme su apoyo incondicional para la elaboración de esta tesis y por su confianza en todo momento.

A los maestros Raúl Rodríguez García, Gregorio Briones, Manuela Bolívar Duarte, Alejandro Zermeño Gonzales, Oscar Lemus, Sergio Garza Vara, y al personal del departamento de Riego y Drenaje que sin su comprensión, sus conocimientos y consejos, no sería posible para la culminación de mi formación, así como ver los sueños realizados.

### **A MIS COMPAÑEROS DE ESPECIALIDAD**

Juan Vargas, Oscar Becerra, Salvador Avendaño, Dilmar Adain, Octavio, Gilberto, Leonardo Lucas, Lucio Zantizo, Irmin isai, Pedro Bernabé, Iván,

Mariano, Antonio, Doris Domínguez. Dios guié su camino en donde quiera que estén.

### **A MIS AMIGOS**

Miguel Ángel, José Luz, Oscar, José Trinidad (chino), Jorge (pong), Juan José (Juanjo), Juan Vargas (pechuga), Refugio (cuco), Isai Saúl (toto), José Inés (la pequeña), Roberto (el pájaro), Luis Enrique (chivito), Ricardo (chava), José Alberto (burrito), Miguel (Sigala), Francisco (Paco), Jesús Omar (bodoque).

Con quienes compartí; alegrías, tristezas y decepciones en aquellos momentos difíciles en mi vida. Le doy gracias a dios, por haberlos cruzado en mi camino ya que juntos superamos los obstáculos y retos que el destino puso para mí y para ellos. Mil gracias.

## INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIAS -----	i
AGRADECIMIENTOS -----	iii
INDICE DE CONTENIDO -----	v
INDICE DE TABLAS -----	vii
INDICE DE FIGURAS -----	vii
INDICE DE GRAFICAS -----	viii
INTRODUCCIÓN -----	1
OBJETIVO -----	3
REVISIÓN DE LITERATURA -----	4
Invernaderos -----	4
Antecedentes de la Producción bajo Invernadero-----	4
Los Cultivos Protegidos en México-----	5
Tipos de Invernaderos-----	7
Parámetros Climáticos-----	10
Temperatura-----	10
Humedad Relativa-----	11
Radiación Luminosa-----	12
Concentración de CO <sub>2</sub> -----	13
Climatización de Invernaderos -----	13
Climatización en Periodos Fríos-----	14
Calefacción-----	14
Sistemas de Calefacción por Convección-----	14

Sistemas de Calefacción por Conducción-----	16
Sistemas de Calefacción por Convección y Radiación-----	17
Control de Altas Temperaturas-----	18
Sistemas de Sombreo-----	18
Encalado-----	18
Mallas de Sombreo-----	19
Cortinas Móviles-----	19
Ventilación -----	20
Ventilación Natural-----	22
Ventilación Mecánica-----	24
Ventilación Mecánica Simple-----	24
Ventilación Mecánica Húmeda-----	25
Nebulización (fog) -----	27
El Riego de Cubierta -----	27
Modelos para la Gestión Climática de Invernaderos -----	28
Definición y tipos de Modelos -----	29
MATERIALES Y METODOS -----	30
RESULTADOS Y DISCUSIÓN -----	35
CONCLUSIONES -----	43
BIBLIOGRAFIA -----	44



## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1.- Exigencias de temperatura para distintas especies.-----	11
Tabla 2.2.- Humedad Relativa Optima para algunos Cultivos. -----	12

## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1.- Crecimiento de la industria de los invernaderos en México.-----	6
Figura 2.2.- Algunos tipos de invernaderos de cubierta curva: semicircular (A), semielíptica (B), en arco gótico u ojiva (C), asimétrica (D), moncapilla adosada (E) y túnel simple (F).-----	8
Figura 2.3.- Esquemas de algunos tipos de invernaderos de cubierta recta: multicapilla simétrico(A), multicapilla asimétrico (B) y moncapilla simple (C) y moncapilla adosado (D).-----	9
Figura 2.4.- Distribución del calor mediante mangas perforadas de polietileno para un sistema de combustión indirecto.-----	15
Figura 2.5.- Sistema de combustión directa (cañón).-----	15
Figura 2.6.- Calefacción enterrada en suelo.-----	16
Figura 2.7.- Sistema por agua caliente en tubería de hierro.-----	17
Figura 2.8.- Pantalla de sombreado móvil exterior al invernadero.-----	20
Figura 2.9.- Ventilación natural.-----	23
Figura 2.10.- Ventilación cenital y lateral.-----	23
Figura 2.11.- Ventilación mecánica simple en naves anchas.-----	24
Figura 2.12.- Ventilación mecánica simple en naves estrechas.-----	25
Figura 2.13.- Ventilación mecánica húmeda por depresión.-----	26
Figura 2.14.- Ventilación mecánica húmeda por sobrepresión.-----	26

Figura 2.14.- Riego de cubierta.----- 28

## INDICE DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1.- Renovaciones de aire por hora con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación cenital. -----	35
Grafica 2.- Renovaciones de aire por hora con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación cenital y lateral. -----	36
Grafica 3.- Renovaciones de aire por hora con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación lateral. -----	36
Grafica 4.- Incremento de temperatura ( $\Delta T$ ) en el interior del invernadero con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación cenital. -----	37
Grafica 5.- Incremento de temperatura ( $\Delta T$ ) en el interior del invernadero con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación lateral. -----	38
Grafica 6.- Incremento de temperatura ( $\Delta T$ ) en el interior del invernadero con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación cenital y lateral. -----	38
Grafica 7.- Humedad relativa en el interior del invernadero con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación cenital. -----	40
Grafica 8.- Humedad relativa en el interior del invernadero con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación lateral. -----	41
Grafica 9.- Humedad relativa en el interior del invernadero con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación cenital y lateral. -----	41

## I. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos de la utilización de invernaderos en la agricultura, es la de obtener elevados rendimientos bajo una agricultura intensiva en clima controlado, esto último permite cultivar plantas en lugares y épocas del año donde las condiciones climáticas imposibilitan o limitan su desarrollo, además de obtener producciones de alto valor añadido (Díaz *et al.*, 2001 y Villele, 1983). El factor determinante más relevante de la actividad hortícola en invernadero es el clima (Castilla, 2005). Los altos rendimientos que se obtienen bajo estas estructuras se debe en gran parte a que el clima durante el día y la noche se controla bajo umbrales óptimos de temperatura y humedad relativa o umbrales máximos y mínimos que eviten daño a las plantas (López *et al.*, 2000).

El control del clima según Alpi y Tognoni (2001) va más allá del enfoque de ingeniería, de la regulación de la temperatura o de otros parámetros ambientales (luz, humedad, etc.), sino bajo un aspecto mucho más amplio en donde se le da mayor importancia al rendimiento general del sistema agrícola, De acuerdo al enfoque dado por Leal (2006), un uso eficiente de invernaderos es aquel que considera operarlo con un mínimo de energía, para ello se requiere la aplicación de técnicas de control automático, que a su vez requieren el manejar modelos matemáticos capaces de describir las interacciones entre las diferentes variables que determinan su microclima .

Modelos que se basan en leyes físicas permiten examinar los procesos responsables de la transferencia de energía y masa (Castañeda *et al.*, 2007). Los intercambios energéticos entre el interior del invernadero y el clima exterior son complejos a causa de los numerosos factores que intervienen, y además a que dichos factores están relacionados entre sí, y a su vez hacen intervenir los diferentes tipos de transferencia de calor: radiación térmica, conducción y convección (Matallana y Montero, 2001).

La ventilación natural es un proceso fundamental que influye en el clima interior de un invernadero (Bailey, 1995; Kittas y col., 1995; Boular y col., 1996; Mistriotis y col., 1997). En el caso de edificaciones, la ventilación contribuye fuertemente en los procesos de intercambio de masa y energía con el ambiente exterior y, en consecuencia, un buen diseño de los sistemas de ventilación puede mejorar tanto el control climático como el uso de la energía (de Jong y Bot. 1992<sup>a</sup>; ASHRAE, 1993; Mistriotis y col., 1997).

El presente trabajo utiliza el modelo basado en las investigaciones desarrolladas previamente por Boulard y Baille (1993), Sbita *et al.* (1998), Sbita *et al.* (1999) y Bouzo *et al.* (2006), para la estimación de la temperatura y la humedad relativa dentro de un invernadero con ventilación natural tipo cenital y tipo lateral.

## **OBJETIVO**

Evaluar la influencia de la ventilación natural tipo cenital y lateral en la temperatura y humedad relativa al interior de un invernadero.

### **Objetivo particular:**

Simular la temperatura y humedad relativa en el interior de un invernadero con ventilación natural con tres porcentajes de apertura y diferente velocidad del viento.

Utilizar la información como una herramienta de apoyo para una propuesta de diseño y planeación del control del clima en invernaderos.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### **Invernaderos**

Un invernadero es una estructura o construcción cubierta y abrigada artificialmente con plástico u otros materiales, en cuyo interior es posible regular manual o automáticamente las condiciones medio ambientales para garantizar el desarrollo óptimo de una o varias especies cultivadas (Riaño, 1992).

Barquero (2001), considera que un invernadero es una edificación arquitectónica cuyo objetivo principal es proteger y prolongar el período de cultivo y cosecha de hortalizas débiles, frutales y plantas ornamentales de condiciones ambientales adversas (fuertes lluvias, vientos, temperaturas extremas, plagas y enfermedades). De acuerdo a la norma AFNOR V 57001 de la Comunidad Económica Europea, es un "Recurso agrícola destinado al cultivo y a la protección de las plantas explotadas, cuyas dimensiones permiten a un hombre trabajar cómodamente en su interior" durante el desarrollo de la planta.

Los cultivos bajo invernaderos son considerados un sistema de producción intensiva que requiere en forma permanente de habilidades del productor para controlar y manejar los diferentes ciclos, la cosecha y la manipulación de la planta (Lizama *et al.* 1984).

### **Antecedentes de la producción bajo invernadero**

En los últimos años el desarrollo de la industria de plásticos ha tomado gran auge en el sector agrícola, especialmente en los cultivos protegidos. En el contexto mundial esta industria ha revolucionado la producción vegetal, ha permitido convertir tierras aparentemente improductivas en modernas

explotaciones agrícolas, por lo que se han incrementado las superficies de hortalizas producidas en invernaderos (Barquero, 2001).

Por ejemplo, la provincia de Almería en España pasó de una agricultura de subsistencia a contar con una gran concentración de invernaderos que la caracterizan como un modelo de desarrollo agrícola en muchas partes del mundo (López, 1999).

En Centroamérica, la producción bajo techo de forma intensiva y tecnificada se desarrolló aproximadamente en 1990, dada la necesidad de contrarrestar los fenómenos ambientales que afectan a la mayoría de hortalizas. Los invernaderos han sido utilizados con el objetivo de cultivar hortalizas bajo condiciones controladas (Barquero, 2001).

Durante la última mitad del siglo XX la horticultura dedicada a la producción en invernaderos avanzó, pasando de regulación manual muy empírica de la temperatura, ventilación, nutrición, riego y fertilización, hasta un avanzado modelo de procesos físicos y fisiológicos para el control permanente de estos factores. Lo cual ha permitido que la producción en invernadero tenga un alto nivel de calidad y productividad (Barquero, 2001).

### **Los cultivos protegidos en México**

La agricultura a cielo abierto está experimentando un cambio radical hacia la agricultura protegida, bajo invernadero. En el 2004 la Asociación Mexicana de Productores de Hortalizas en Invernadero reportaba un total de 3000 hectáreas de invernaderos en todo el territorio nacional. En el 2008 operaban en México 6000 hectáreas de invernadero [El Siglo de Torreón, 06 de febrero de 2008]. De 1999 a esta fecha la cantidad de invernaderos ha

aumentado en un seiscientos por ciento. El crecimiento de esta industria en nuestro país se vislumbra exponencial en un futuro no muy lejano (Figura 2.1).

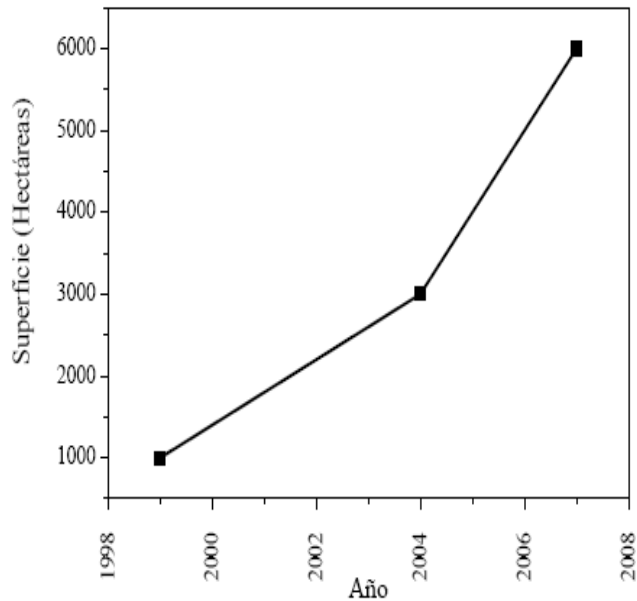


Figura 2.1 Crecimiento de la industria de los invernaderos en México.  
Fuente: Amphi 2004; El siglo de Torreón, 06 febrero de 2008.

Finalmente, una parte considerable de los invernaderos no se encuentran operando o se encuentran operando parcialmente por problemas financieros y/o técnicos. Los problemas financieros se refieren principalmente a la dificultad de comercializar de los productos y los problemas técnicos tienen que ver con la producción y la construcción de los invernaderos. Es importante hacer notar que quienes presentan estas dificultades son principalmente los pequeños productores, aquellos que tienen extensiones menores a media hectárea (SEDEA, 2007).



Durante los próximos años se espera que México sea una de las regiones donde más se desarrollen los cultivos en invernadero, debido a varios factores: Estados Unidos demanda más hortalizas frescas; el (TLCAN) facilita el movimiento de hortalizas hacia esa nación, las diversas condiciones ambientales en territorio mexicano permiten producir estos cultivos. Pero es necesario estar utilizando dispositivos en los cuales se aceleren los procesos para que la producción sea en un menor tiempo y la calidad sea óptima, este esquema permite producir a bajo costo (Ramírez, 2007).

### **Tipos de invernaderos**

Hay diversas clasificaciones de los tipos de invernaderos. Atendiendo a su forma arquitectónica cabe distinguir dos formas básicas Invernadero unimodular o monocapilla, constituido por un invernadero aislado de otras estructuras.

Invernadero multimodular o multicapilla, lo forman una serie de invernaderos unidos, en disposición de módulos paralelos asociados. Los tipos multicapilla permiten un mejor aprovechamiento del suelo, siendo además más baratos de construir y de climatizar, al tener menor relación entre superficie de cerramiento y superficie de suelo (Castilla, 2005).

Atendiendo a la geometría de cubierta hay numerosas variantes (Figura 2.2). Las cubiertas de sección curva adoptan forma semicircular, semielíptica o de ojiva (arco gótico) entre otras.

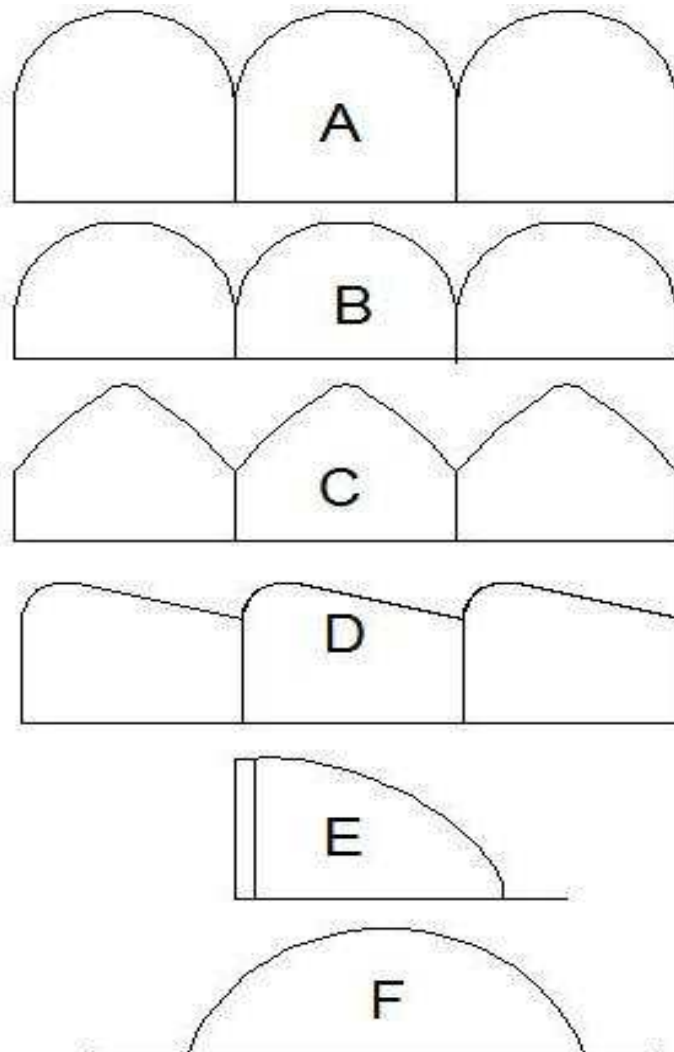


Figura 2.2 Algunos tipos de invernaderos de cubierta curva: semicircular (A), semielíptica (B), en arco gótico u ojiva (C), asimétrica (D), monocapilla adosada (E) y túnel simple (F).

En caso de cubiertas rectas (Figura 2.3), la cubierta a dos aguas puede ser simétrica o asimétrica, con diversidad de angulaciones, según la latitud y condiciones locales. Las paredes laterales, en invernaderos monocapilla o monotúnel, pueden ser verticales o ligeramente inclinadas, siendo estas últimas más ventajosas por su mayor transmisividad de luz (Castilla, 2005).

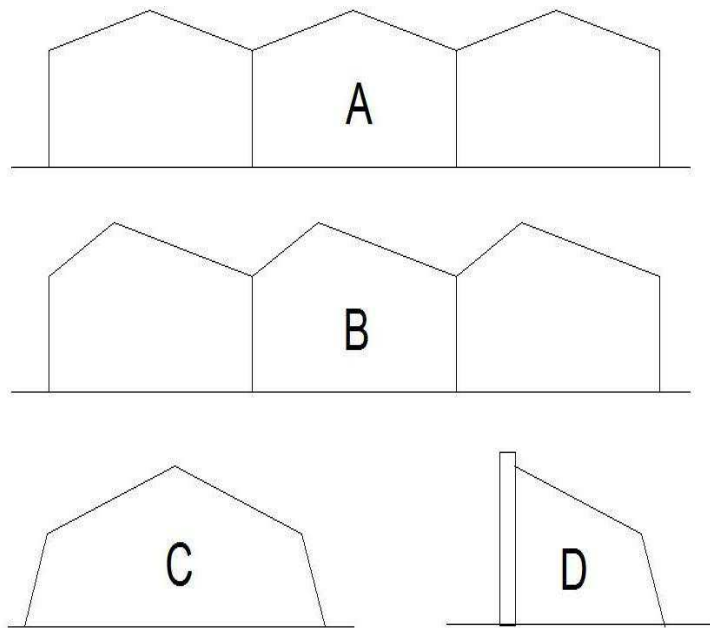
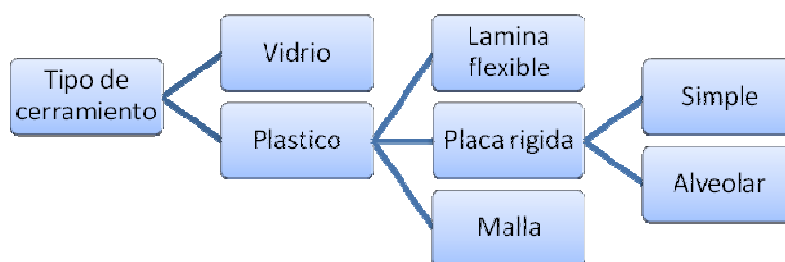


Figura 2.3 Esquemas de algunos tipos de invernaderos de cubierta recta: multicapilla simétrico(A), multicapilla asimétrico (B) y monocapilla simple (C) y monocapilla adosado (D).

Según el tipo de cerramiento cabe distinguir invernaderos de:



Aunque hoy día es menos empleada la clasificación de invernaderos atendiendo al régimen térmico: invernadero frío (5-8°C), invernadero templado (12-15°C) e invernadero caliente (20-25 °C).

## **Parámetros climáticos**

Las principales variables climáticas envueltas en el proceso de producción vegetal son: la temperatura, la humedad relativa, la radiación luminosa y la concentración de CO<sub>2</sub> (Baptista *et al.*, 1999). La presencia de esos factores dentro de ciertos límites mínimos y máximos, proporcionan condiciones propicias para el desenvolvimiento de la planta, en cuanto fuera de esos límites, el desenvolvimiento es perjudicial, pudiendo llevar a la misma muerte de la planta.

## **Temperatura**

El metabolismo de las plantas y la tasa de las reacciones metabólicas se ven afectados por la temperatura, llegando a duplicarse la tasa de crecimiento para muchos cultivos al incrementar la temperatura 10° C (Day y Bailey, 1999). Tanto temperaturas extremas bajas como altas, afectan al buen desarrollo de los cultivos (Hanan *et al.*, 1988), produciendo la desnaturalización de enzimas y otras proteínas.

Las temperaturas por debajo o por arriba de un determinado umbral no sólo imposibilitan que los cultivos cubran sus objetivos de producción sino que pueden ser letales para los mismos (Díaz *et al.*, 2001).

-Temperatura mínima letal. Aquella por debajo de la cual se producen daños en la planta.

-Temperatura máxima letal. Aquella por arriba de la cual se producen daños en la planta.

-Temperaturas máximas y mínimas biológicas. Indican valores, por encima o por debajo respectivamente del cual, no es posible que la planta alcance una determinada fase vegetativa, como floración, fructificación, etc.

-Temperaturas nocturnas y diurnas. Indican los valores aconsejados para un correcto desarrollo de la planta.

	<b>TOMATE</b>	<b>PIMIENTO</b>	<b>BERENJENA</b>	<b>PEPINO</b>	<b>MELÓN</b>	<b>SANDÍA</b>
<b>T<sup>a</sup> mínima letal</b>	0-2	(-1)	0	(-1)	0-1	0
<b>T<sup>a</sup> mínima biológica</b>	10-12	10-12	10-12	10-12	13-15	11-13
<b>T<sup>a</sup> óptima</b>	13-16	16-18	17-22	18-18	18-21	17-20
<b>T<sup>a</sup> máxima biológica</b>	21-27	23-27	22-27	20-25	25-30	23-28
<b>T<sup>a</sup> máxima letal</b>	33-38	33-35	43-53	31-35	33-37	33-37

Tabla 2.1. Exigencias de temperatura para distintas especies (Infoagro 2009).

### **Humedad relativa**

La relación entre la humedad del aire o la presión de agua del aire y el crecimiento de los cultivos es muy compleja. Humedades entre 0,2 y 1,0 Kpa de déficit de presión de vapor (DVP), tienen pequeños efectos sobre la fisiología y desarrollo de cultivos agrícolas, y juegan un rol importante en la ocurrencia de enfermedades. Por ejemplo, las esporas de muchos hongos requieren de agua

libre para germinar; una alta humedad relativa al interior del invernadero promueve la condensación sobre el cultivo. (Calla et al., 1995)

<u>PRODUCTO</u>	<u>HUMEDAD</u>
Tomate y pimiento	50-60%
Berenjena	50-60
Melón y acelga	60-70
Judías	60-75
Lechuga	60-80
Sandía	65-75
Guisantes	65-75
Calabacín y apio	65-80
Fresones	70-80
Pepino	70-90

Tabla 2.2 Humedad relativa optima para algunos cultivos.

### **Radiación luminosa**

De acuerdo a Alpi y Tognoni (1999) este elemento del clima, la luz, debe relacionársele con su intensidad y duración, puesto que estas, junto con el fotoperiodo son en gran parte las que determinan el resultado de los cultivos en los invernaderos.

La importancia del papel que juega la luz en la producción hortícola está fuera de duda. Los invernaderos deben conectar el máximo de radiación solar durante todo el día en invierno y durante el resto del año deben aprovechar la radiación de la mañana y de la tarde, para lograr un balance térmico favorable y activar la fotosíntesis al transmitir parte del espectro visible (FAO, 2002).

Mortensen (1987) afirma que la calidad de los cultivos se ve muy influenciada por el efecto que produce la luz sobre los mismos. La luz afecta el crecimiento y la morfogénesis de las plantas.

### **Concentración de CO<sub>2</sub>**

El carbono es un nutriente esencial de los vegetales. Existen estudios que demuestran que alrededor del 40 % de la planta seca se compone de carbono. La planta obtiene el carbono presente en el CO<sub>2</sub> atmosférico a través de la fotosíntesis. La concentración ideal del CO<sub>2</sub> depende de los requerimientos, pero para todos existe un punto óptimo. La mayoría de cultivos requieren de concentraciones de CO<sub>2</sub> entre 1000-1500 ppm (partes por millón). Existiendo algunas especies que responden de manera positiva a concentraciones de hasta 1800 ppm (Berninger, 1989).

### **Climatización de invernaderos**

En el interior del invernadero, la radiación, temperatura y composición de la atmósfera son modificadas generando un microclima distinto al local. Las modificaciones dependen esencialmente de la naturaleza y propiedades del material de cerramiento, de las condiciones de renovación de aire, de la forma, dimensiones y orientación del invernadero, de la cubierta vegetal presente y de las posibilidades de evaporación del suelo y de la cubierta (Berninger, 1989).

El invernadero se concibe para proteger al cultivo de los efectos adversos del medio y genera un microclima diferente del existente en el interior (Díaz *et al.*, 2001).

## **Climatización en periodos fríos**

### **Calefacción**

La calefacción del invernadero se puede efectuar por dos medios: a través de la atmósfera o a través del suelo, o bien a través de ambos elementos. El aire tiene inercia térmica débil y, por lo tanto, el calor se difunde en su masa casi exclusivamente por convección, la cual puede ser activada artificialmente; por el contrario, el suelo tiene una gran inercia y el calor se transmite por conducción (Alpi y Tognoni, 1999).

#### **Sistemas de calefacción por convección:**

Son sistemas en los que el elemento conductor del calor es el aire. Debido a su poca inercia, proporcionan un aumento rápido de la 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 (González-Real et al. 1983).

##### **a) Generadores de aire caliente de combustión indirecta**

Mediante un cambiador de calor, se separan los gases de combustión expulsándolos al exterior, introduciendo únicamente aire caliente al invernadero. Dado que parte del calor es expulsado con los gases de combustión, el rendimiento de estas máquinas suele estar entre el 80% - 90%.





Figura 2.4: Distribución del calor mediante mangas perforadas de polietileno para un sistema de combustión indirecto.

#### **b) Generadores de aire caliente de combustión directa**

Tanto el aire caliente como los gases de combustión son incorporados al invernadero. El combustible a utilizar debe de contener el menor número de elementos tóxicos, siendo el propano y el gas natural los más recomendados.



Figura 2.5: Sistema de combustión directa (cañón).

Es importante controlar los niveles de los gases de combustión para evitar problemas a personas y plantas. El rendimiento de la máquina se considera del 100 % al introducir también el calor que acompaña a los gases de combustión.

### Sistemas de calefacción por conducción

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, siendo ésta superior a la de los sistemas de calefacción aéreos (Feuilleley y Baille, 1992).

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. El elevado costo inicial y la dificultad para realizar labores en el suelo (al ir enterradas las tuberías a menos de 50 cm) han limitado el desarrollo de estos sistemas.

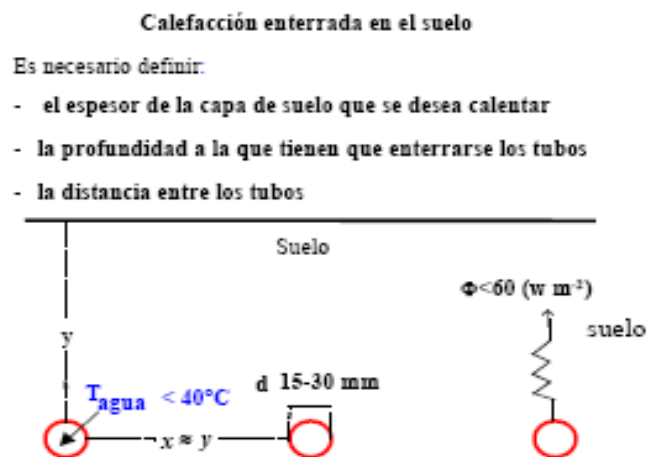


Figura 2.6: Calefacción enterrada en suelo (González-Real et al. 1983).

### **Sistemas de 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).



Figura 2.7: Sistema por agua caliente en tubería de hierro

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.

Los sistemas de calefacción por agua caliente permiten distribuir el calor de forma uniforme, siendo más eficientes que los sistemas por aire. No

obstante, mediante tuberías perforadas, que aproximan el calor a la planta, los sistemas de calefacción por aire de combustión indirecta han mostrado una eficiencia similar a los sistemas por agua caliente a baja temperatura (Lorenzo et al., 1997).

## **Control de altas temperaturas**

### **Sistemas de sombreo**

El sombreo es la técnica de enfriamiento más usada en la práctica, pero no está libre de problemas. Uno de ellos es que gran número de productos no son selectivos. La reducción de temperatura se logra a base de cortar más de lo conveniente el porcentaje de radiación fotoactiva, mientras que el infrarrojo corto llega en exceso a los cultivos. En otros casos la reducción de la radiación no causa descenso térmico, por ejemplo cuando se utilizan pantallas de ahorro de energía durante el verano con el objetivo de sombrear, ya que dichas pantallas pueden reducir mucho la renovación de aire (Matallana y Montero, 2001).

Se pueden dividir los distintos sistemas de sombreo en dos grupos:

1. *Sistemas estáticos*. Son aquellos que una vez instalados sombrean al invernadero de una manera constante, sin posibilidad de graduación o control. Como ejemplo se encuentra el encalado o blanqueo de las paredes y mallas de sombreo.

### **Encalado**

El blanqueo de las paredes a base de carbonato cálcico o de cal apagada es el sistema de sombreo más extendido en la horticultura protegida. En zonas de poca lluvia se prefiere el carbonato cálcico porque es más fácil de

eliminar por lavado. En zonas más húmedas es preciso usar soluciones de cal apagada.

### **Mallas de sombreo**

La gama de mallas con distinto porcentaje de transmisión, reflexión y porosidad al aire es muy amplia. Existen también materiales aluminizados que presentan la ventaja de reflejar parte de la radiación solar. Si la capacidad de reflexión no cambia con el uso del material (desarrollo de algas, suciedad, etc.), las mallas aluminizadas son las mejores para climas cálidos. La mayoría de las redes de sombreo son poco selectivas, es decir, reducen tanto la transmisión de radiación fotoactiva como la del infrarrojo corto. Sería deseable reducir al máximo la radiación infrarroja dejando pasar la fotoactiva hacia las plantas.

**2. *Sistemas dinámicos.*** Son aquellos que permiten un control más o menos perfecto de la radiación solar en función de las necesidades climáticas de invernadero. Como ejemplo de este sistema se encuentran las cortinas móviles.

### **Cortinas móviles**

El uso de mallas de sombreo fijas tiene un claro inconveniente: durante las primeras horas del día y las últimas de la tarde, así como durante días nublados, el sombreo es excesivo y la fotosíntesis neta queda reducida, pues la radiación en el invernadero queda por debajo del punto de saturación lumínica. Si se cuenta con un mecanismo que arrastre la pantalla y extienda o cierre en función de los niveles de luz se puede lograr un uso mucho más eficiente de la radiación disponible.

El equipo de arrastre de la cortina tiene como elementos básicos un eje de giro motorizado, unos cables de acero que se enrollan en el eje y desplazan

la pantalla, un conjunto de poleas y un sensor de radiación fotoactiva para el control del desplazamiento de la ventana (figura 2.8).



Figura 2.8: Pantalla de sombreo móvil exterior al invernadero (Pilar Lorenzo, CIFA, Almería).

## Ventilación

La ventilación tiene un efecto directo en el intercambio de masa y energía con el ambiente exterior. En consecuencia, un buen diseño de los sistemas de ventilación puede mejorar tanto el control climático como el uso de la energía (de Jong y Bot, 1992a; ASHRAE, 1993; Mistriotis y col., 1997) lo que influye de un modo determinante en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Bot, 1993; Castilla, 1994; Kittas y col., 1995; Boulard y col., 1996; Mistriotis y col., 1997).

Baptista *et al.*, (1999) comentan que la ventilación es una de las herramientas más importantes para controlar el clima del invernadero. De manera general, durante la época fría la ventilación debe remover el exceso de

humedad, mientras que en la época de calor su principal utilización es la de evitar las altas temperaturas.

La ventilación afecta en primer lugar a la temperatura interna. Todos los invernaderos necesitan evacuar el exceso de calor que se produce en los momentos de alta insolación. Para ello debe haber suficiente intercambio de aire para limitar la subida de temperatura, debe mezclarse con homogeneidad el aire entrante con el aire interno y debe generarse un buen movimiento del aire interior para favorecer el intercambio de calor y masa entre las plantas y el aire del invernadero (Bailey, 2000)

En segundo lugar, la falta de ventilación incide también negativamente en la composición del aire interior, principalmente al producirse déficits en la concentración de CO<sub>2</sub> (Lorenzo y col., 1990; Lorenzo, 1994). Ello se debe a que la entrada de aire externo es la principal fuente de CO<sub>2</sub> de los cultivos en aquellos invernaderos que no cuentan con enriquecimiento carbónico, como son la mayoría de los situados en zonas cálidas.

El tercer factor climático que queda afectado por la ventilación es la humedad. La falta de ventilación, sobre todo en los meses fríos, provoca excesos de humedad, favoreciendo la condensación en la cara interior de las cubiertas y el goteo sobre el cultivo. Esto se traduce en una disminución en la transmisión de radiación solar (Jaffrin y Makhlonf, 1990) con la consecuente pérdida de producción.

Dos son los sistemas de ventilación que pueden adoptarse: Ventilación Natural y Ventilación Mecánica o cooling system (Sistema de enfriamiento).

## **Ventilación natural**

Durante la última década el estudio de la ventilación natural de los invernaderos ha sido la materia a la que se le ha dedicado mayor esfuerzo de investigación en la tecnología de invernaderos (Boulard, 1993; Papadakis y col., 1996; Boulard y Draoui, 1995; Boulard y col., 1996; Kitas y col., 1995 y 1996; etc.).

La ventilación natural se define como la acción de dos fuerzas principales: la acción del viento que resulta en un campo de presiones sobre las ventilas causando el movimiento de la masa del aire de un punto de mayor presión a otro de menor presión; la acción de la temperatura que resulta en una distribución vertical de presiones debido al cambio de densidad de la masa del aire (Boulard *et al.*, 1996).

La ventilación natural es el método más utilizado, económico y práctico para garantizar unas condiciones microclimáticas óptimas durante el periodo estival e invernal (Papadakis y col., 1996; Boulard y Draoui, 1995; Montero y col., 1996).



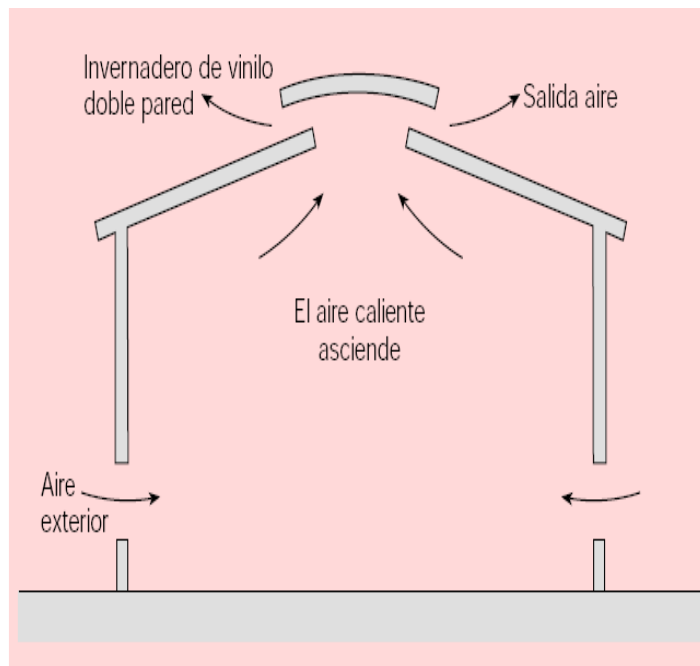


Figura 2.9: Ventilación natural.

Las ventanas pueden ser cenitales si se disponen en la techumbre o laterales si están colocadas sobre las paredes laterales del invernadero.

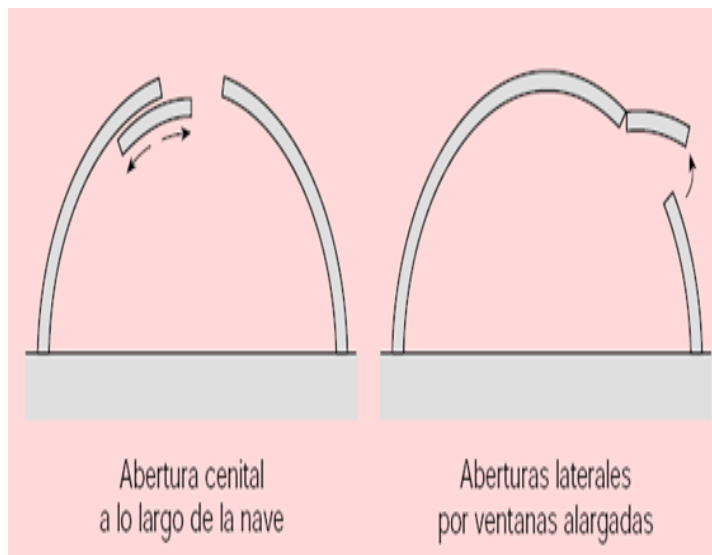


Figura 2.10: Ventilación cenital y lateral.

## Ventilación mecánica

El uso de ventiladores permite un control más preciso de la temperatura del invernadero que el que puede lograrse con la ventilación natural o pasiva.

La ventilación mecánica consiste en renovar el aire con la instalación de ventiladores electromecánicos colocados en la cubierta o bien en la parte alta de un lateral de la nave, dependiendo de la anchura de la misma. Las entradas de aire exterior se disponen por la parte baja de la pared opuesta a la de los ventiladores o por ambas si la descarga es central.

## Ventilación mecánica simple

Designamos como "simple" el hecho de vehicular aire del exterior, con su temperatura y humedad y descargarlo, después de barrer el interior, evacuando humedad, gases y carga de calor hacia el exterior (figuras 2.11 y 2.12).

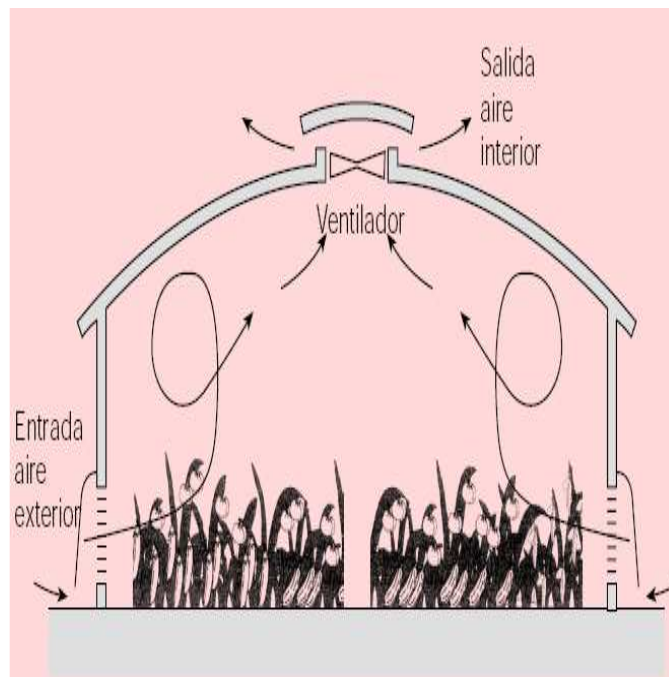


Figura 2.11: Ventilación mecánica simple en naves anchas.

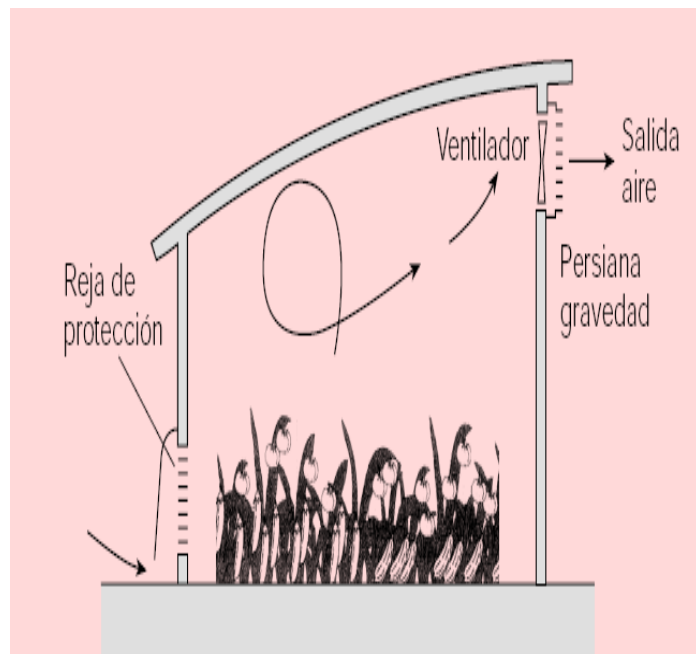


Figura 2.12: Ventilación mecánica simple en naves estrechas.

### Ventilación mecánica húmeda

Este sistema consiste en saturar de humedad el aire de entrada haciéndole atravesar unos paneles de gran superficie contruidos con material fibroso empapado de agua. Unos canales perforados a lo largo de la parte alta de los paneles suministran agua continuamente que los mantiene mojados.

Dos son los sistemas de ventilación mecánica húmeda (Figuras 2.13 y 2.14):

**a) Ventilación mecánica húmeda por depresión:** En este sistema el aire exterior penetra en el invernadero saturado de humedad y con una temperatura más baja.

**b) Ventilación mecánica húmeda por sobrepresión:** En este sistema el aire exterior es impulsado por un ventilador contra los paneles húmedos.

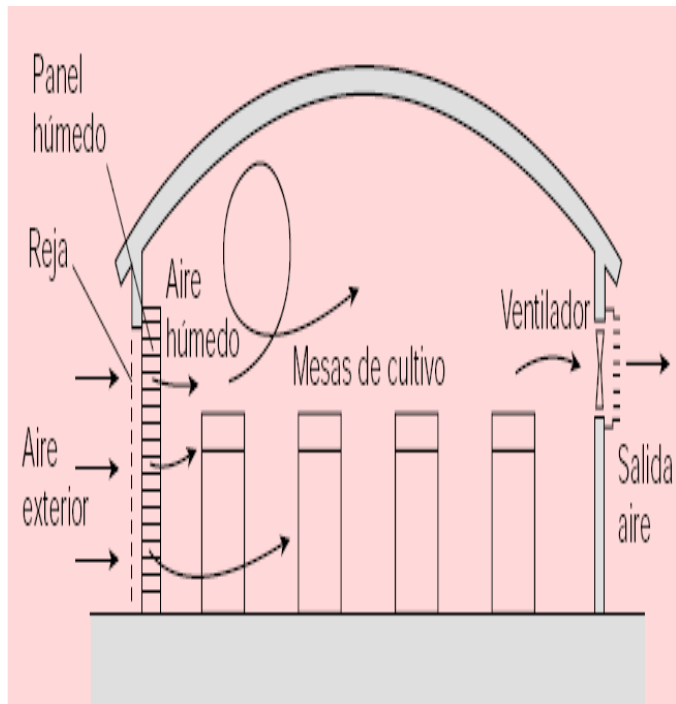


Figura 2.13: Ventilación mecánica húmeda por depresión.

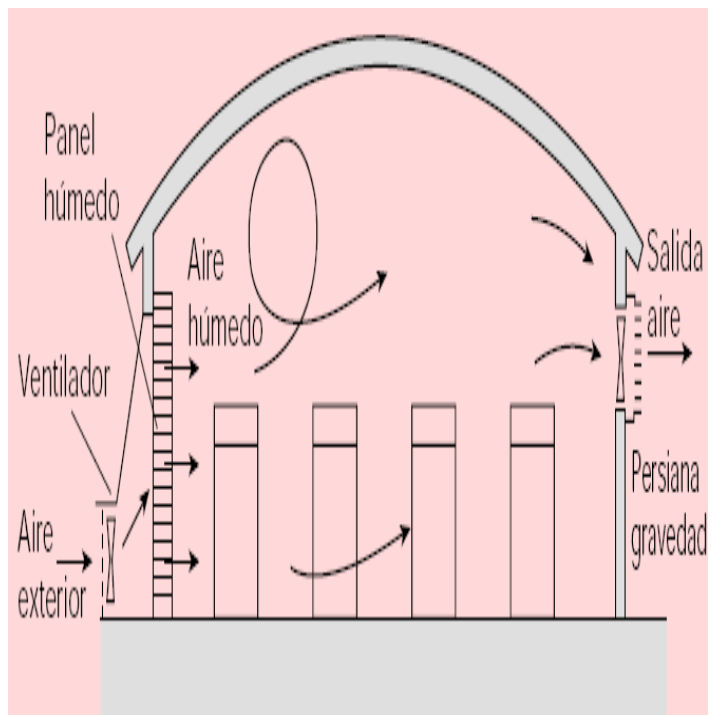


Figura 2.14: Ventilación mecánica húmeda por sobrepresión.

### **Nebulización fina (fog)**

Los sistemas de nebulización tienen por fin crear una niebla para refrigerar el interior del invernadero.

Las gotas deben producirse a cierta altura por encima de las plantas, para que por su tamaño y altura caigan lentamente y se evaporen antes de alcanzar las plantas, absorbiendo energía y reduciendo la temperatura.

El primer efecto de la nebulización de agua es el enfriamiento del aire por evaporación al extraer  $2.45 \times 10^3 \text{ J.g}^{-1}$  de energía calorífica. El aire enfriado (más denso) desciende e induce movimiento conectivo. Si el sistema está bien regulado, el agua no llega a tocar las plantas (Castilla, 2005).

### **El riego de la cubierta**

No parece un método muy adecuado para reducir la temperatura, ya que su reducción no supera a la que se consigue con otras técnicas más sencillas y baratas y, además, tiene el inconveniente del desarrollo de algas y la formación de depósitos sobre la cubierta del invernadero que van a disminuir su transmisividad (Díaz *et al.*, 2000). Este sistema permite reducir la temperatura del invernadero hasta en 3 °C (Breuer *et al.*, 1995) y es solo usual en invernaderos sofisticados.

Este sistema tan sencillo parece dar mejores resultados para calentar que para enfriar el invernaderos (Figura 2.15), como ejemplo, en Italia se logró salvar a los cultivos bajo invernaderos sin calefacción, regando la cubierta cuando la temperatura exterior fue de -8 °C. En estas condiciones se forma una capa de hielo sobre el invernadero que lo aísla del medio exterior (Matallana y Montero, 2001).



Figura 2.14: Riego de cubierta

### **Modelos para gestión climática de invernaderos**

Dentro de los tipos de modelos de clima en invernaderos se pueden mencionar a los modelos de caja negra, los cuales están basados en el análisis de los datos de entrada y salida del proceso, sin embargo, estos por su naturaleza son de un bajo orden y no incorporan ningún conocimiento directo del sistema, por lo que no son adecuados para utilizarse en otras configuraciones o tipos de invernadero (Castañeda *et al.*, 2007). Se encuentran también los modelos basados en principios físicos, estos tienen la ventaja de proporcionar una información más detallada del proceso en cuestión y permiten una mejora de la herramienta desarrollada de manera tal que se pueden utilizar en el diseño de algoritmos de control en distintas estructuras de invernadero (Guzmán *et al.*, 2005).

## **Definición y tipos de modelos**

De acuerdo a Donald (1995) un modelo es una abstracción de la realidad que captura la esencia funcional del sistema, con el detalle suficiente como para que pueda utilizarse en la investigación y la experimentación en lugar del sistema real, con menos riesgo, tiempo y costo.

En invernaderos se pueden distinguir dos grupos de modelos: físicos, que se centran en el microclima del invernadero en función del clima exterior, y los fisiológicos que se centran en la planta y sus relaciones con el microclima del invernadero.

Según Castilla (2005) dentro de los tipos de modelos se pueden mencionar los siguientes:

**a) Modelo estocástico.** Es un conjunto de ecuaciones que relacionan los diversos aspectos, por ejemplo, de pérdidas de calor o de ventilación, este puede considerarse también como un modelo estacionario, y ya que en estos modelos las ecuaciones están basadas en leyes físicas se denominan también mecanicistas.

**b) Modelo dinámico.** Este incorpora la variable tiempo y son necesarios cuando se representa un proceso cuya respuesta es lenta, estos son llamados también modelos heurísticos, el término heurístico hace referencia a los medios empleados en la resolución de los modelos, así, los modelos heurísticos se resuelven por exploración o mediante prueba y error, mientras que los modelos estocásticos se resuelven empleando métodos estadísticos.

### III. MATERIALES Y METODOS

#### Modelo de predicción

La temperatura interna del invernadero es estimada en el modelo a través de la Ecuación 1 (modificada de Boulard y Baille, 1993, para no considerar el efecto de el enfriamiento que resulta de la nebulización de agua), en la que  $\Delta T$  representa la diferencia entre la temperatura interna del invernadero estimada y la temperatura externa real, mientras que el déficit de presión de vapor es estimado con la Ecuación 2, en la que  $\Delta e$  representa la diferencia entre la presión de vapor estimada dentro del invernadero y la presión de vapor externa real.

$$(1) \quad \Delta T = \frac{\left[ \left( \frac{b + K_i}{K_i} \eta G_o \right) - b D_o - a \alpha \tau G_o \right]}{b \delta (T_o) + \frac{(b + K_i)(K_s + K_c)}{K_i}}$$

$$(2) \quad \Delta e = \eta G_o - \Delta T (K_s + K_c) / K_i$$

Estas ecuaciones comprenden otras ecuaciones y parámetros, que pueden dividir en:

#### Datos del clima externo

$G_o$  representa la radiación externa en  $W m^{-2}$

$D_o$  representa el déficit de presión de vapor externo

$T_o$  representa la temperatura externa en  $^{\circ}C$

$V$  representa la velocidad del viento externo en  $m s^{-1}$



$\delta(T_o)$  representa la pendiente de la curva de déficit de presión de vapor externo a la temperatura  $T_o$ . Tiene unidades de  $\text{Pa } ^\circ\text{K}^{-1}$

### Datos de características del invernadero y datos de operación

$\eta$  representa la eficiencia térmica de la radiación solar. Es adimensional. Se utilizó el valor de 0.6

$\tau$  representa la transmitancia global del invernadero, la fracción de radiación externa que incide en el cultivo; adimensional. Se utilizó el valor de 0.5

$K_c$  representa el coeficiente total de pérdida de energía del invernadero; sus unidades son  $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ; este parámetro tiene una relación aproximadamente lineal con la velocidad exterior del viento, por lo que se puede estimar con la ecuación  $K_c = A + BV$ , donde A y B toman, en invernaderos con doble capa, los valores de 6 y 0.5, respectivamente (Bailey y Cotton, 1980).

$K_l$  representa el coeficiente de intercambio de calor latente por ventilación y tiene unidades de  $\text{W m}^{-2} \text{Pa}^{-1}$ . Está determinado por la ecuación

$$K_l = (F_c \rho \lambda V_g N)(3600 S_g)$$

$F_c$  factor de conversión entre el contenido de vapor y la presión de vapor del agua del aire y es igual a  $6.25 \cdot 10^{-6} \text{ kgw kga}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ .

$K_s$  representa el coeficiente de intercambio de calor sensible por ventilación y tiene unidades de  $\text{W m}^{-2} \text{Pa}^{-1}$ . Está determinado por la ecuación

$$K_s = (\rho C_p V_g N)(3600 S_g)$$

$N$  representa la tasa de renovación del viento dentro del invernadero; tiene unidades de  $h^{-1}$ . Se determina por la ecuación  $N = \left(\frac{S_o}{2}\right)(A\sqrt{C_w V})\left(\frac{3600}{h}\right) + N_o$

$S_o$  representa el cociente entre el área total de ventilas abiertas sobre la superficie del invernadero. Es adimensional.

$A\sqrt{C_w}$  representa el coeficiente aerodinámico, toma un valor diferente para cada tipo de ventilación natural y es adimensional.

Aberturas cenitales	Cenitales y laterales	Aberturas laterales
$A\sqrt{C_w} = 0.157 \pm 0.026$	$A\sqrt{C_w} = 0.13 \pm 0.03$	$A\sqrt{C_w} = 0.22 \pm 0.028$
$N_0 = 4.7 \pm 1.5$	$N_0 = 8.9 \pm 2.4$	$N_0 = 1.2 \pm 0.46$
$R^2 = 0.69, n = 18$	$R^2 = 0.73, n = 16$	$R^2 = 0.87, n = 8$

Valores de  $A\sqrt{C_w}$  para la ecuación del cálculo de renovaciones del viento y valores de  $N_0$  cuando las ventilas están al 100% de su apertura y  $V < 1 \text{ ms}^{-1}$  (Sbita et al., 1998).

$S_g$  es la superficie del invernadero, mientras que  $V_g$  es el volumen. Se utilizan valores en  $\text{m}^2$  y  $\text{m}^3$ , respectivamente.

#### Datos sobre el cultivo

$b$  caracteriza la influencia del déficit de vapor sobre la transpiración. Tiene unidades de  $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$  y se deduce con la Ecuación  $b = \frac{1.65 IAF \left( 1 - 0.56 e^{\left( \frac{-n G_p}{13} \right)} \right)}{\gamma}$ .

$a$  caracteriza la influencia de la radiación sobre la transpiración. Es adimensional y se obtiene con la ecuación  $a = 0.154 \ln(1 + 1.1 IAF^{1.13})$ .

$IAF$ , índice de área foliar, adimensional. El valor promedio de este indicador durante el periodo de prueba fue de 3.6.

$\alpha$  representa la absorción de radiación por el cultivo. Se utilizó el valor de 0.95.

#### Constantes físicas

$\gamma$  es la constante psicométrica ( $66 \text{ Pa K}^{-1}$ )

$\rho$  es la densidad del aire ( $1.3 \text{ kg m}^{-3}$ )

$\lambda$  es el calor latente de vaporización del agua ( $2500 \text{ KJ Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

$c_p$  es la capacidad térmica del aire ( $1.012 \times 10^3 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

### **Datos de la prueba y simulación**

Los datos climáticos utilizados en la prueba fueron obtenidos en el año 2009 en el proyecto Adecuación de un modelo físico para el uso eficiente de energía en invernadero el cual se desarrolló en la unidad de producción denominada agroindustrias el Centenario SRP de RL, ubicadas en San Rafael, municipio de Galeana, Nuevo León, en carretera a la hediondilla s/n. Estos datos fueron registrados con una estación meteorológica Davis WeatherLink®, que reporto la temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento durante el periodo de evaluación cada cinco minutos.

El modelo se implementó en el software Stella 9.0.2 y posteriormente se desarrollo la simulación en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

### **Características del invernadero**

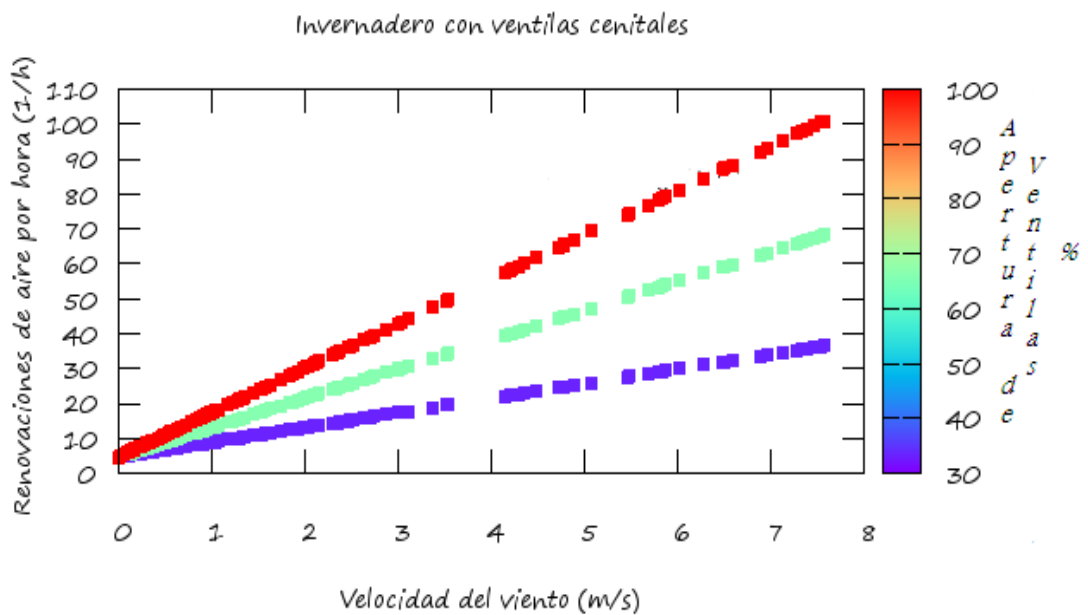
El invernadero en el cual se obtuvieron los datos tiene una superficie de 4 Has, es de tipo multitunel con ventilación natural, para lo cual cuenta con ventilas cenitales a un solo lado de los arcos y ventilas laterales al este y al oeste. Tiene cuatro metros de altura y la longitud del arco es de nueve metros. Cuenta con 22 arcos y dos pasillos. El invernadero carece de equipo para ventilación artificial, excepto por el equipo de calefacción que se utiliza solo en invierno. Para el periodo de investigación no se utilizó calefacción, ni, por lo tanto, ventilación artificial.

Las ventilas cenitales tienen, cada una, una área de  $300 \text{ m}^2$  ( $1.5 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ ), por lo que el área total de ventilas cenitales es de  $300\text{m}^2 \times 22 = 6600\text{m}^2$ . La ventila lateral tiene un área total de  $600\text{m}^2$  ( $3\text{m} \times 200\text{m}$ ).

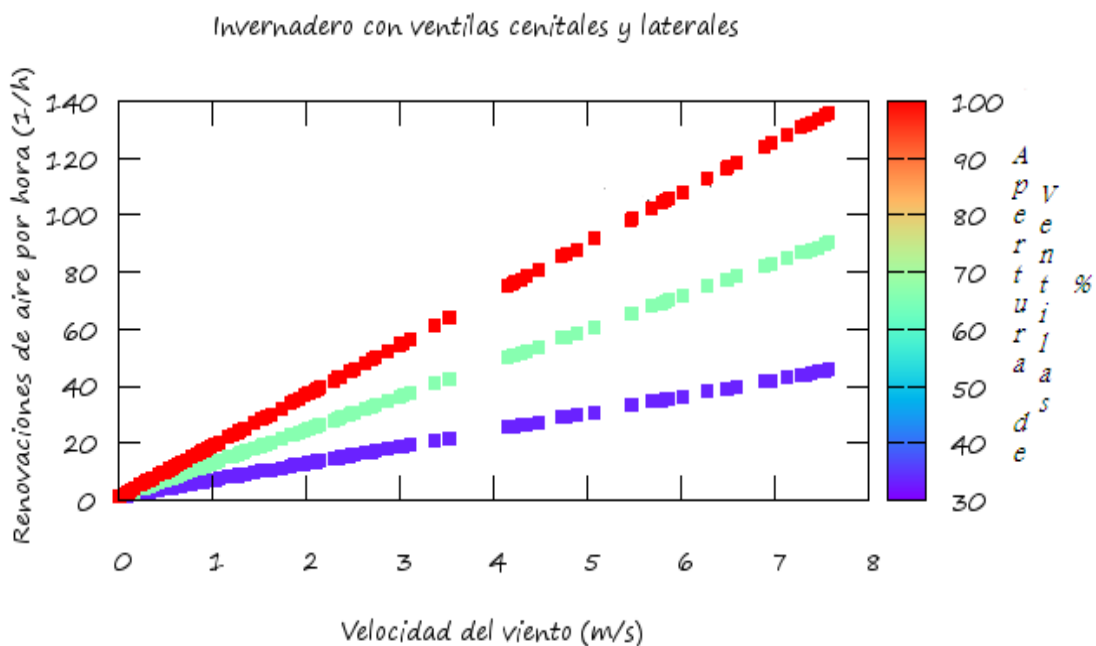
El invernadero, al inicio y fin del periodo reportado, tenía establecido un cultivo de tomate bola en producción, con un índice de área foliar de entre 3.5 y 3.65 y que recibía fertirrigación tres veces por día a través de un sistema de riego por goteo. La densidad de plantas dentro del invernadero era de 1.2 plantas/m<sup>2</sup>.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

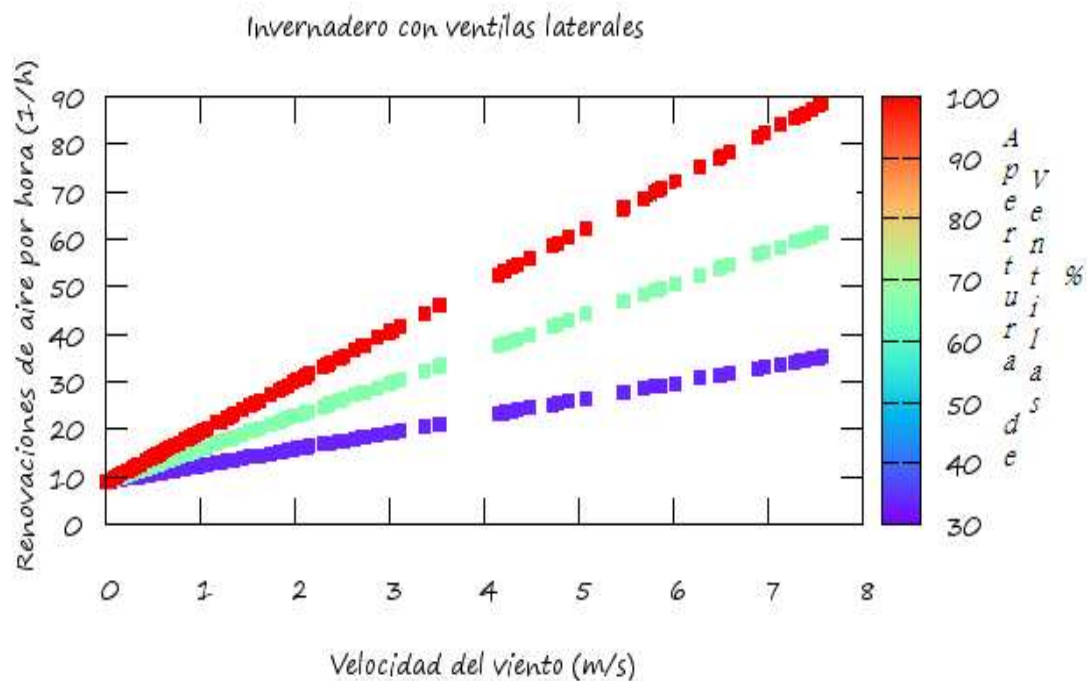
En las graficas 1, 2 y 3 se observa el comportamiento del número de renovaciones de aire por hora (N) con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas. La renovación de aire ocasiona que el invernadero sea enfriado por el aire externo y la humedad relativa disminuida.



**Grafica 1:** Renovaciones de aire por hora con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación cenital.



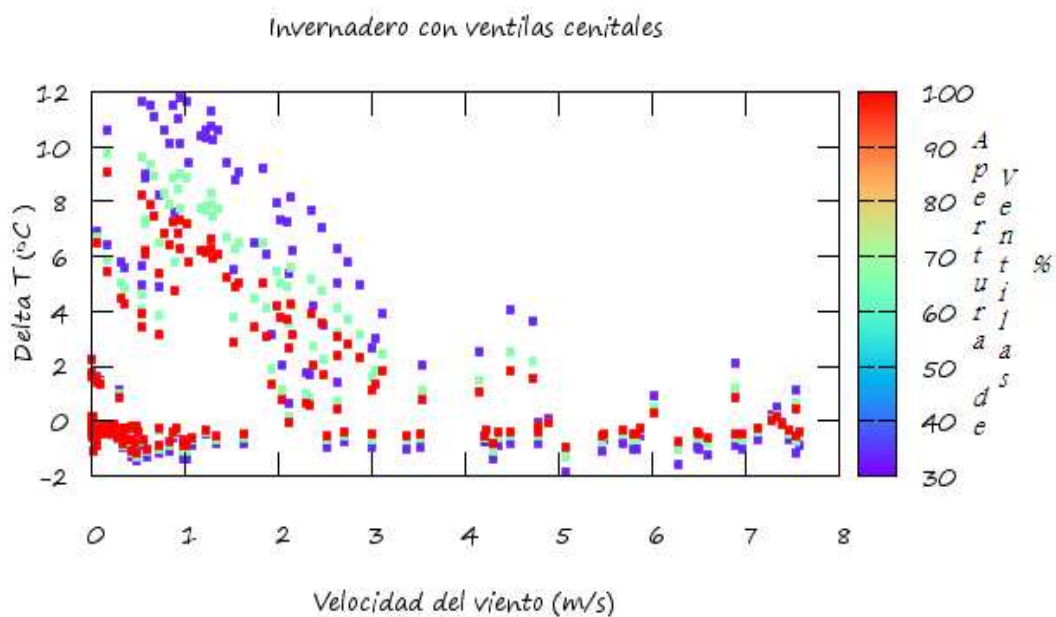
**Grafica 2:** Renovaciones de aire por hora con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación cenital y lateral.



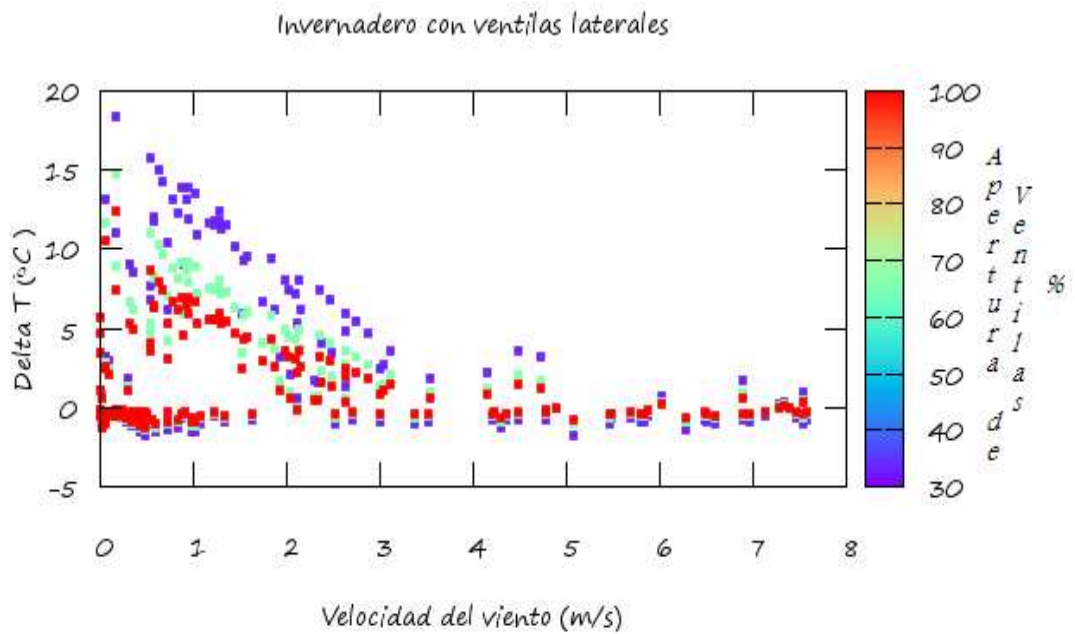
**Grafica 3:** Renovaciones de aire por hora con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación lateral.

En las graficas 1, 2 y 3 se puede observar que el numero de renovaciones de aire (N) aumenta a medida que se abren las ventilas y la velocidad del viento es mayor, N es directamente proporcional a la apertura de ventilas y velocidad del viento, en la grafica 2 observamos claramente que en el invernadero con ventilación combinada se genera un mayor numero de renovaciones de aire en comparación con la ventilación cenital y la ventilación lateral, esto se debe a que el invernadero con ventilación combinada tiene una mayor área de ventilas.

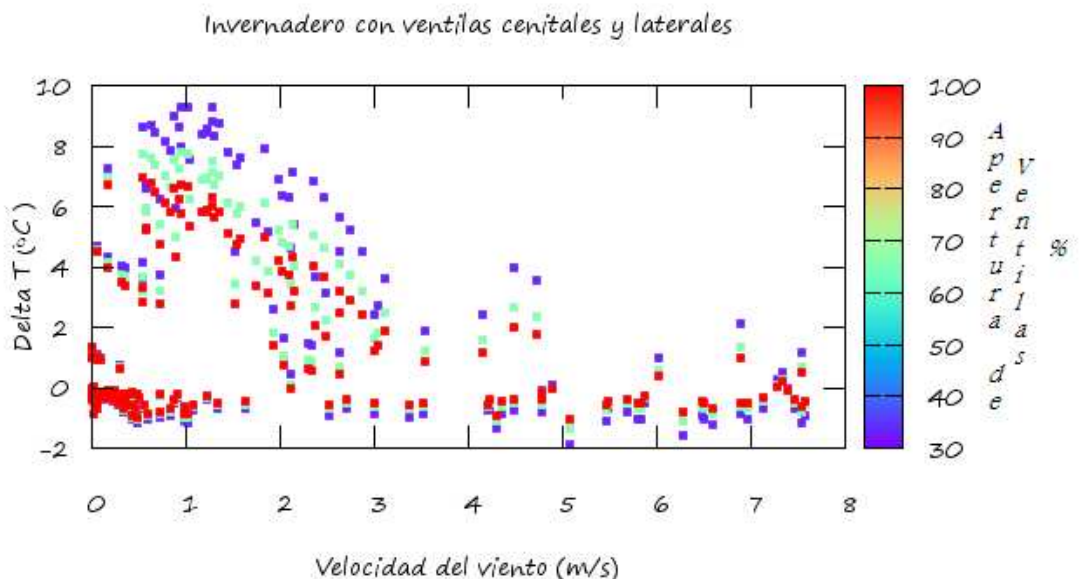
En las graficas 4, 5 y 6 se observa el comportamiento de delta T ( $\Delta T$ ) con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas.



**Grafica 4:** Incremento de temperatura ( $\Delta T$ ) en el interior del invernadero con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación cenital.



**Grafica 5:** Incremento de temperatura ( $\Delta T$ ) en el interior del invernadero con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación lateral.



**Grafica 6:** Incremento de temperatura ( $\Delta T$ ) en el interior del invernadero con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación cenital y lateral.

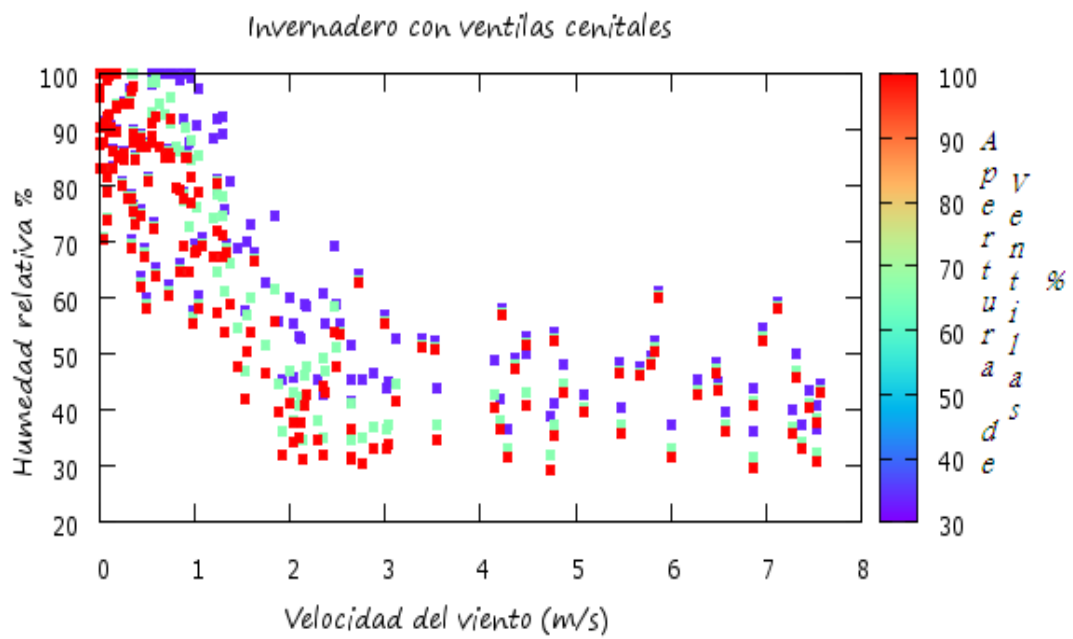


En la grafica 4 se observa que para una apertura del 33% de la ventila cenital y con una velocidad del viento de 1 m/s el incremento de temperatura al interior del invernadero es de 12°C, mientras que para la apertura de un 66% el incremento es de 10°C, y para un 100% de 8°C. Al incrementarse la velocidad del viento de 1 a 3 m/s provoca una fuerte disminuci3n de la temperatura al interior del invernadero, el valor de  $\Delta T$  fluctúa entre 3°C para un 33% de apertura y de 2°C para 100% de apertura. A velocidades mayores o iguales a 4 la temperatura al interior es igual al exterior en las tres aperturas.

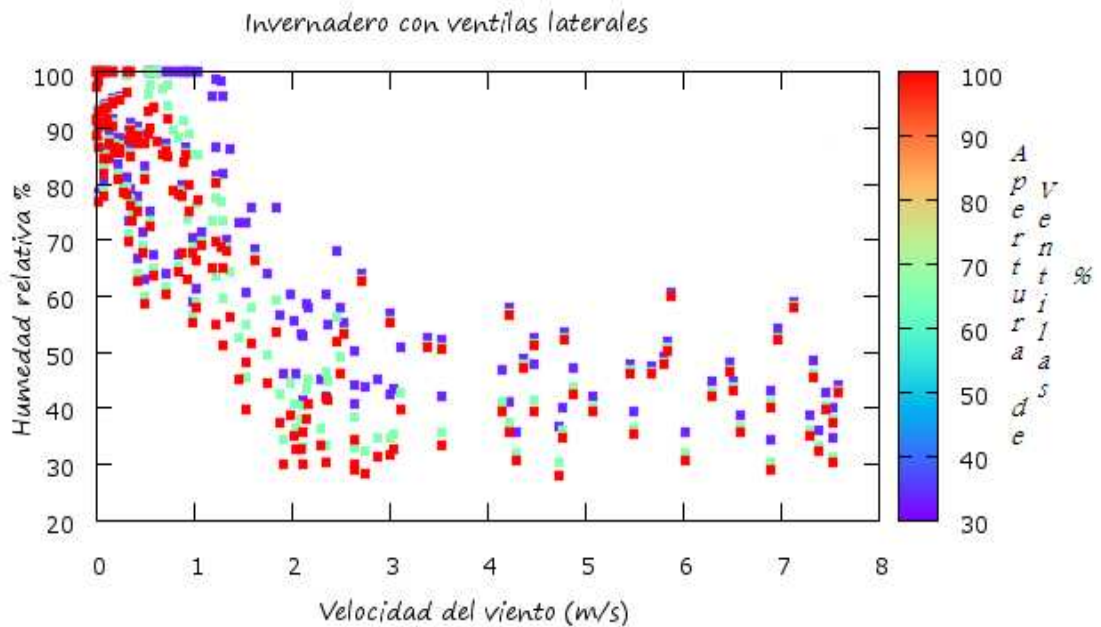
En la grafica 5 se observa que para una apertura del 33% de la ventila cenital y con una velocidad del viento de 1 m/s el incremento de temperatura al interior del invernadero es de 15°C, mientras que para la apertura de un 66% el incremento es de 12°C, y para un 100% de 8°C. Al incrementarse la velocidad del viento de 1 a 3 m/s provoca una fuerte disminuci3n de la temperatura al interior del invernadero, el valor de  $\Delta T$  fluctúa entre 5°C para un 33% de apertura y de 4°C para 100% de apertura. A velocidades mayores o iguales a 4 la temperatura al interior es igual al exterior en las tres aperturas.

En la grafica 6 se observa que para una apertura del 33% de la ventila cenital y con una velocidad del viento de 1 m/s el incremento de temperatura al interior del invernadero es de 9°C, mientras que para la apertura de un 66% el incremento es de 8°C, y para un 100% de 6°C. Al incrementarse la velocidad del viento de 1 a 3 m/s provoca una fuerte disminuci3n de la temperatura al interior del invernadero, el valor de  $\Delta T$  fluctúa entre 2°C para un 33% de apertura y de 1°C para 100% de apertura. A velocidades mayores o iguales a 4 la temperatura al interior es igual al exterior en las tres aperturas.

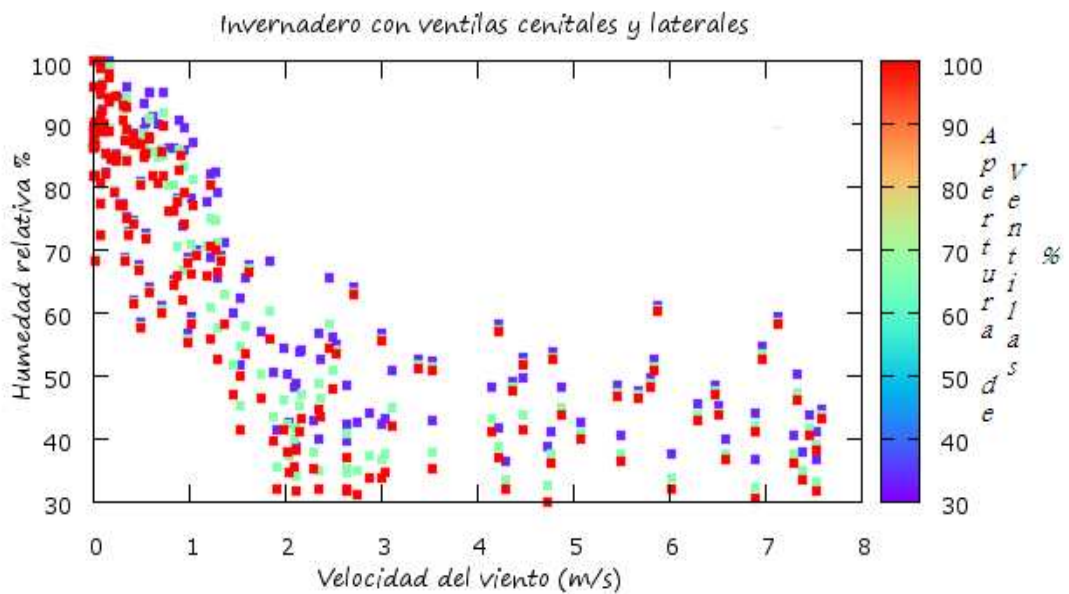
En las graficas 7, 8 y 9 se observa el comportamiento de la humedad relativa con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas.



**Grafica 7:** Humedad relativa en el interior del invernadero con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación cenital.



**Grafica 8:** Humedad relativa en el interior del invernadero con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación lateral.



**Grafica 9:** Humedad relativa en el interior del invernadero con respecto a la velocidad del viento y apertura de ventilas al 33, 66 y 100% en un invernadero con ventilación cenital y lateral.

En la grafica 7 se observa que para una apertura del 33% de la ventila cenital y con una velocidad del viento de 1 m/s la humedad relativa al interior del invernadero es de 90%, mientras que para la apertura de un 66% la humedad es de 85%, y para un 100% la humedad es de 80%. Al incrementarse la velocidad del viento de 1 a 3 m/s provoca una fuerte disminuci3n de la humedad al interior del invernadero, el valor de HR fluctúa entre 50% para un 33% de apertura y de 35% para 100% de apertura. A velocidades mayores o iguales a 4 m/s la humedad relativa al interior es igual al exterior en las tres aperturas.

En la grafica 8 se observa que para una apertura del 33% de la ventila cenital y con una velocidad del viento de 1 m/s la humedad relativa al interior del invernadero es de 100%, mientras que para la apertura de un 66% la humedad es de 90%, y para un 100% la humedad es de 85%. Al incrementarse la velocidad del viento de 1 a 3 m/s provoca una fuerte disminuci3n de la humedad al interior del invernadero, el valor de HR fluctúa entre 40% para un 33% de apertura y de 35% para 100% de apertura. A velocidades mayores o iguales a 4 m/s la humedad relativa al interior es igual al exterior en las tres aperturas.

En la grafica 9 se observa que para una apertura del 33% de la ventila cenital y con una velocidad del viento de 1 m/s la humedad relativa al interior del invernadero es de 85%, mientras que para la apertura de un 66% la humedad es de 80%, y para un 100% la humedad es de 75%. Al incrementarse la velocidad del viento de 1 a 3 m/s provoca una fuerte disminuci3n de la humedad al interior del invernadero, el valor de HR fluctúa entre 40% para un 33% de apertura y de 35% para 100% de apertura. A velocidades mayores o iguales a 4 m/s la humedad relativa al interior es igual al exterior en las tres aperturas.

## **V. CONCLUSIONES**

El invernadero que presenta un mejor enfriamiento en el interior, es aquel que tiene una ventilación combinada, es decir; el que tiene ventilas cenitales y laterales.

Cuando la velocidad del viento es mayor o igual que 4 m/s, el viento no presenta ningún efecto en la temperatura y humedad relativa en el interior de un invernadero, es decir; tanto la temperatura como la humedad relativa dentro del invernadero son iguales a las exteriores.

## VI. BIBLIOGRAFIA

- Alpi, A. y Tognoni, F. 1999. Cultivo en invernadero. Ed. Mundi-Prensa. 3ª edición. 345 p.
- ASHRAE 1993 Infiltration and ventilation. ASHRAE Handbook of Fundamentals. American Society of Heating Refrigerating and Air conditioning Engineers. Atlanta GA, E.UU.
- Asociación Mexicana de Productores de Hortalizas bajo Invernadero (AMPHI) (2004).
- Bailey, B. and Cotton, R. 1980. Glasshouse thermal screen: influence of single and double screens on heat loss and crop environment. NJAE Dep Note DNG. No 83. 15 pp.
- Bailey B J 1995 Greenhouse climate control-new challenges. *Acta Horticulturae*, 399: 13-24.
- Bailey B J 2000. Constraints, limitations and achievements in greenhouse natural ventilation. *Acta Horticulturae* 534:21-30
- Baptista F.J. Bailey B.J. Randall J.M. Meneses J.F. (1999). Greenhouse ventilation rate: theory and measurement with tracer gas techniques. *J. Agric. Engng Res.* 72. 363-374.
- Barquero, G. 2001. Producción en ambiente controlado. San José, Costa Rica, Colegio de Ingenieros Agrónomos. p. 2-35
- Bot GPA 1993 Physical Modelling of Greenhouse Climate. The computerized Greenhouse. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Boulard T. Meneses J.F. Mermier M. Papadakis G. (1996). The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agricultural and forest meteorology.* 79. 61-77.

- Boulard and Baille. 1993. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. *Agricultural and Forest Meteorology*. No. 65. 145 – 157 pp.
- Boular T; Draoui B 1995 Natural ventilation of a greenhouse with Continuous roof vents: measurements and data analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research* 61: 27-36.
- Bouzo, C.; Gariglio, N.; Pilatti, R.; Grenón, D.; Favaro, J.; Bouchet, E.; Freyre, C. 2006. Inversim: a simulation model for greenhouse. *Acta Horticulturae* 719: 271-278.
- Breuer, J. J. G. Y Knies, P. 1995. Ventilation and cooling. En: *Greenhouse climate control: An integrated approach*. Wageningen Pers. Netherlands. pp: 179-185.
- Castilla, N. 2005. *Invernaderos de plástico: tecnología y manejo*. Ed. Mundi-Prensa. España. 459 p.
- Castilla N 1994 Greenhouses in the Mediterranean area: Technological level and strategic management. *Acta Horticulturae*, 361: 44-56.
- Castañeda, R.; Ventura, E.; Peniche, R.; Herrera, G. 2007. Análisis y simulación del modelo físico de un invernadero bajo condiciones climáticas de la región central de México. *Agrociencia* 41: 317-335.
- De Jong T; Bot G P A 1992a Air exchange caused by wind effects through (window) openings distributed evenly on a quasi-infinite surface. *Energy and Buildings*, 19: 93-103
- Donald, R. D. 1995. *Dinámica de sistemas aplicada*. Ed. Isdefe. España. 199 p.
- Díaz, T., Espí, E., Fontecha, A., Jiménez, J. Y Salmerán, A. 2001. *Los filmes plásticos en la producción agrícola*. Ed. Mundi-Prensa. 315 p.

- El siglo de Torreón, 06 de febrero de 2008. Nota periodística por Virginia Hernández.
- FAO. 2002. El cultivo protegido en clima mediterráneo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 318 p.
- Feuilloley, P; Baille, A. 1992. Principes généraux d'utilisation des eaux tiédes pour le chauffage des serres. Informations Techniques du CEMAGREF, 87:1-8.
- González-Real, M; Delmon, D; Antonioletti, R; Baille, A; Sappe, G. 1983. Etude comparative de deux systemes de chauffage: aero theme et thermosiphon. Aspects énergétiques et microclimatiques. Revue Horticole, 234: 39-42.
- Guzmán, J. L., Rodríguez, F., Berengel, M. y Dormido, S. 2005. Laboratorio virtual para la enseñanza de control climático de invernaderos. RIAI. 2(2):82-92.
- Hanan J.J. (1998). Greenhouses. Advanced technology for protected horticulture. CRC Press.
- Información Técnica Agrícola (Infoagro) (2009).
- Jaffrin A; Makhlonf S 1990 Mechanism of light transmission through wet polymer films. *Acta Horticulturae*, 281: 11-24.
- Kttas, C., Draoui, B., Boulard, T. (1995). Quantification du taux d'aération d'une serre à ouvrant continu en toiture 1995. *Agricultural and Forest Meteorology* 77: 95-111
- Leal, J. 2006. Efecto de la variación de la densidad del aire en la temperatura bajo condiciones de invernadero. *Ciencia UANL* 9(3): 290-297.
- Lizama, N. 1984. Un tipo de invernadero recomendado para la producción de hortalizas en la zona sur. *IPA Carrillanca*. 3(2). p. 2-6
- López, J. 1999. Aplicaciones de los plásticos en agricultura, CEPLA.p. 1



- López, J.; Lorenzo, P.; Medrano, E.; Sánchez-Guerrero, M. C.; Pérez, J.; Puerto, H. M.; Arco, M. 2000. Calefacción de invernaderos en el Sureste Español. Caja Rural de Almería. Junta de Andalucía. Almería, España. 46p.
- Lorenzo P; Maroto C; Castilla N 1990 CO<sub>2</sub> in plastic greenhouse in Almería (Spain). *Acta Horticulturae*, 268: 165-169.
- Lorenzo P 1994 Intercepción de luz, bioproductividad e intercambio gaseoso durante la ontogenia de un cultivo invernadero de *Cucumis sativus* en Almería. Tesis Doctoral. Departamento de Biología Vegetal. Facultad de Biología. Universidad de Barcelona.
- Lorenzo, P; Sánchez-Guerrero, M.C; Medrano, E; Escobar, I; García, M. 1997. Incorporación de sistemas de calefacción en la horticultura bajo plástico del sur mediterráneo. *Actas de Horticultura*, 17:371-378.
- Matallana, A.; Montero, J. I. 2001. Invernaderos: diseño, construcción y ambientación. Mundi-Prensa. Madrid, España. 209 p.
- Mistriotis A; Bot GPA; Picuno P; Scarascia-Mugnozza G 1997 Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85:217-228.
- Montero J I; Muños P; Antón A 1996 Discharge coefficients of greenhouse windows with insect-proof screens. *Acta Horticulturae*, 443: 71-77.
- Mortensen, L.M. and Strome, E. 1987. Effects of light quality on some greenhouse crops. *Scientia Horticulturae* (33): 27-36
- Papadakis G, Mermier M, Meneses J F, Boulard T 1996 Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63: 219-228.

- Riaño, G. 1992. Diseño arquitectónico y cálculo de climatización de un invernadero. *Forestales*. 3 (5). 40p.
- Sbita, L.; Boulard, T.; Baille, A.; Annabi, M. 1998. A greenhouse climate model including the effects of ventilation and crop transpiration: validation for the South Tunisia conditions. *Acta Horticulturae* 458: 57-64.
- Sbita, L.; Boulard, T.; Mermier, M. 1999. Natural ventilation performance of a greenhouse tunnel in South Tunisia. *Cahiers Options Méditerranéens* 31: 109-118.
- Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Querétaro (SEDEA) (2007).
- Villele, O. 1983. La serre, agent de modification du climat. L'INRA et les cultures sous serre. INRA. París. pp: 21-27.