



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Doctorado en Ingeniería

**TESIS**

Modelación del flujo de aire mediante Dinámica de Fluidos Computacionales en  
invernaderos con ventilación natural.

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Doctorado en Ingeniería

**Presenta:**

M.I. Guillermo Alfonso De la Torre Gea

**Dirigido por:**

Dr. Enrique Rico García

**SINODALES**

Dr. Enrique Rico García

Presidente

Dr. Ramón Guevara Gonzales

Secretario

Dr. Irineo Torres Pacheco

Vocal I

Dr. Genaro Martin Soto Zarazúa

suplente

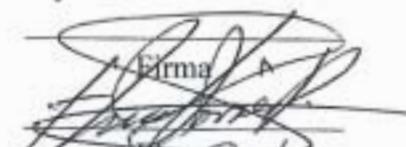
Dr. Irineo López cruz

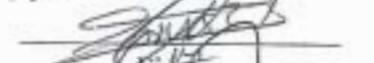
Suplente

  
Aurelio Domínguez González

Director de la Facultad

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Firma

  
Dr. Irineo Torres Pacheco  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Diciembre, 2013

México

## RESUMEN

En los invernaderos con ventilación natural las condiciones climáticas internas son totalmente dependientes del clima exterior, por lo que es necesario realizar ajustes internos a estructuras y prácticas de cultivo, que permitan en conjunto controlar el ambiente interior y compensar los efectos ejercidos por el ambiente exterior. En los últimos años la Dinámica de Fluidos Computacionales ha aumentado exactitud y realismo a los estudios realizados para determinar las condiciones del clima al interior de invernaderos. A pesar de que dichos modelos proporcionan una solución numérica del balance energético, esta técnica toma en cuenta los valores de las variables independientes como incógnitas. Por otra parte, las Redes Bayesianas son técnicas heurísticas que pueden ser de ayuda para describir las relaciones entre las variables que definen las condiciones del clima. El presente trabajo consistió en analizar mediante Redes Bayesianas un modelo de Dinámica de Fluidos Computacionales del flujo de aire, para evaluar la mejor orientación y tamaño del cultivo, relacionando las variables climáticas temperatura, humedad relativa y dióxido de carbono en el espacio del cultivo bajo invernadero. Utilizando las Redes bayesianas aplicadas a un modelo de Dinámica de Fluidos Computacionales es posible determinar las relaciones entre las variables temperatura, humedad, velocidad de flujo de aire y concentración de  $\text{CO}_2$ . Las redes bayesianas mostraron que las mejores condiciones de concentración de  $\text{CO}_2$  y humedad se dan cuando el cultivo se orienta paralelo al flujo de aire, con tutoreo a 3.5 m y 0.5 m de altura de la base.

Palabras clave:  $\text{CO}_2$ , clima, temperatura, CFD, redes bayesianas.

## ABSTRACT

In greenhouses with natural ventilation, internal climatic conditions are dependent on the weather outside, therefore it is necessary to adjust the structures and cultural practices that allow together control the indoor environment and compensate the effects exerted by the external environment. In recent years, Computational Fluid Dynamics has increased accuracy and realism to the studies conducted to determine the weather conditions inside greenhouses. Although these models provide a numerical solution of the energy balance, this technique takes into account the values of the independent variables as unknowns. Moreover, Bayesian networks are heuristic techniques that may be helpful to describe the relationships between the variables that define weather conditions. The present study was to analyze, using Bayesian Networks, a Computational Fluid Dynamics model to the air flow, with the aim of evaluate the best orientation and size of the crop, relating climatic variables in space of the crop. Using Bayesian Networks applied to a Computational Fluid Dynamics model is possible to determine the relationships between the temperature, humidity, air flow rate and CO<sub>2</sub> concentration. Bayesian networks showed that the best conditions of CO<sub>2</sub> concentration and humidity was when the crop is oriented parallel to the air flow , with at 3.5 m in height and 0.5 m from the base.

Key words: CO<sub>2</sub>, climate, temperature, CFD, Bayesian networks.

**A Dios** por guiarme en cada paso que doy en la vida  
**A mis padres** Guillermo De la Torre López y Tirza Gea Nava †  
**A mi esposa** Gabriela García Manzo  
**A mi hija** Renata De la Torre Olvera

### **Agradecimientos**

A todos los profesores que han contribuido con su esfuerzo a mi formación; Dr. Irineo Torres Pacheco, Dr. Irineo López Cruz, Dr. Carlos Fuentes Ruíz, Dr. Mario E. Rodríguez García, Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa, Dra. Rebeca del Rocío Peniche Vera y al Dr. Gilberto Herrera Ruíz.

Al Dr. Enrique Rico García por su apoyo incondicional.

A todas las personas que han contribuido a la realización de este trabajo.  
Al CONACYT por el apoyo brindado durante mis estudios de doctorado.

## INDICE GENERAL

CAPITULO I.	Introducción	1
1.1	Importancia del cultivo bajo invernadero	1
1.2	Ventilación natural en invernaderos	2
1.3	Descripción del problema	3
1.4	Justificación	4
1.5	Hipótesis	5
1.6	Objetivos	5
1.6.1	Objetivo General	5
1.6.2	Objetivos Específicos	5
CAPITULO II.	Revisión bibliográfica	6
2.1	Comportamiento del clima al interior del invernadero	7
2.1.1	Radiación solar	8
2.1.2.	Temperatura	9
2.1.3.	Humedad Relativa	10
2.1.4	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	11
2.2	Relaciones entre las variables	11
2.2.1	Temperatura y Humedad relativa	11
2.2.2	Humedad relativa y el Punto de rocío	12
2.2.3	Temperatura y Presión de aire	12
2.3	Modelos de elemento finito mediante CFD	12
2.3.1	Principios Fundamentales de CFD	13
2.3.1.1	Derivada Sustancial	14
2.3.1.2	Ecuación de continuidad	14
2.3.1.3	Ecuación de momento (forma no conservativa)	15
2.3.1.4	Ecuación de energía (forma no conservativa)	15
2.4	Redes Bayesianas	16
2.4.1	Conceptos teóricos	16
2.4.2	Clasificadores Bayesianos	17

2.5	Estudios realizados en invernaderos mediante CFD	18
2.5.1	Radiación solar y temperatura	19
2.5.2	Temperatura e intercambio de aire	20
2.5.3	Incorporación de cultivos a los modelos CFD	21
2.5.4	Humedad	23
2.5.5	Concentración de Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	24
CAPITULO III. Metodología		25
3.1	Delimitación y caracterización de la zona de estudio	25
3.2	Infraestructura Disponible	25
3.2.1	Invernadero	26
3.2.2	Material biológico	27
3.3	Caracterización del flujo de aire y variables de estado	28
3.3.1	Flujo de aire	28
3.3.2	Variables de estado	29
3.4	Desarrollo del modelo CFD	29
3.4.1	Recursos informáticos	29
3.4.2	Metodología para el desarrollo del modelo CFD	30
3.4.3	Etapas del análisis de CFD	30
3.4.3.1	Cálculos previos	30
3.4.3.2	Configuración del modelo CFD y Solución de las ecuaciones	30
3.4.3.3	Análisis de los resultados	32
3.5	Evaluación de la geometría del espacio de cultivo y su orientación	32
3.6	Análisis mediante Redes Bayesianas	33
CAPITULO IV. Resultados y discusión		33

4.1	Condiciones climáticas al interior del invernadero	33
4.2	Modelos de Redes Bayesianas de las condiciones climáticas al interior del invernadero	34
4.3	Distribución de la probabilidad condicional para ajustar el modelo de Redes Bayesianas	35
4.4	Análisis y discusión de las Redes Bayesianas aplicadas a períodos de tres horas a lo largo de las 24 hrs del día	38
4.5	Modelo de Red Bayesiana de Radiación, Velocidad del flujo de aire y Temperatura a partir del modelo CFD	41
4.6	Relación entre la temperatura y la concentración de CO <sub>2</sub> y humedad a partir del modelo CFD	42
4.7	Bondad de ajuste del modelo CFD	47
4.8	Bondad de ajuste de modelo CFD utilizando Redes Bayesianas	48
4.9	Modelos CFD del espacio del cultivo	50
4.10	Redes Bayesianas aplicadas a los Modelos CFD del espacio de cultivo	59
V.	Conclusión y Futuros Resultados	67
VI.	Referencias Bibliográficas	69

## INDICE DE FIGURAS

Figura	Titulo	Pagina
1.	Gráfica del efecto de la temperatura sobre la asimilación del CO <sub>2</sub> en los cultivo	11
2.	Proporción de las variables estudiadas en modelos CFD	20
3.	Dimensiones de invernadero experimental	26
4.	Invernaderos experimentales le-1 e le-3 ubicado en Amazcala, Querétaro	26
5.	Cultivo de <i>Solanum lycopersicum</i> bajo Invernadero	27
6.	Plano general de las instalaciones en Amazcala	28
7.	Condiciones climáticas de la parte central del Invernadero	34
8.	Red Bayesiana para datos de 36 horas en la parte central del invernadero	35
9.	Comparación de los datos esperados contra los datos observados	37
10.	Red Bayesiana para periodos de tres horas en un día	39
11.	Cálculo de inferencias más importantes sobre el modelo de Red Bayesiana a partir de datos del modelo CFD	41
12.	Resultados del modelo CFD del invernadero experimental	44
13.	Bondad de ajuste del modelo CFD mediante las relaciones entre la humedad y concentración de CO <sub>2</sub> con respecto a la temperatura	48
14.	Cultivo perpendicular al flujo de aire con altura de .15 m.	51
15.	Cultivo perpendicular al flujo de aire con Cultivo paralelo al flujo de aire con altura a la base de .15 m a)	54
16.	Concentración de CO <sub>2</sub> , b) Humedad y c) Temperatura.	55
17.	Cultivo paralelo al flujo de aire con altura a la Base de .5 m a) Concentración de CO <sub>2</sub> , b) Humedad y c) Temperatura.	56
18.	Cultivo paralelo al flujo de aire con altura a la base de .5 m	57
19.	Cálculo de inferencias sobre el modelo de Red Bayesiana a partir de datos del modelo CFD .	61

## INDICE DE TABLAS

Tabla	Titulo	Pagina
1.	Rangos de temperatura óptimos para el aire y sustrato en diversos cultivos hortícolas según Castilla (2007).	9
2.	Resumen de las condiciones de frontera y Valores iniciales del modelo CFD.	31
3.	Distribución de probabilidad condicional entre CO <sub>2</sub> y Temperatura del aire a 3 m.	36
4.	Distribución de probabilidad condicional entre Temperatura del aire a 3 m y Humedad relativa a 1 m.	36
5.	Distribución de probabilidad condicional entre CO <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> a 1m.	36
6.	Comparación de las inferencias entre los datos medidas y los obtenidos a partir del modelo CFD.	45
7.	Coeficientes de correlación entre la concentración de CO <sub>2</sub> y la humedad con respecto a la temperatura.	48
8.	Resumen de las condiciones de frontera y valores iniciales del modelo CFD del espacio del cultivo.	49
9.	Valores de CO <sub>2</sub> , Humedad y Temperatura a diferentes alturas del cultivo y flujos de aire.	52
10.	Valores de CO <sub>2</sub> , Humedad y Temperatura a diferentes alturas del cultivo y flujos de aire.	57

## **CAPITULO I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Importancia del cultivo bajo invernadero**

La producción de cultivos bajo invernadero es una de las técnicas más modernas que se utilizan actualmente en la producción agrícola. La ventaja del sistema de invernadero sobre el método tradicional a cielo abierto, es que, bajo invernadero, se establece una barrera entre el ambiente externo y el cultivo. Esta barrera limita un microclima que permite proteger el cultivo del viento, lluvia, plagas, enfermedades, malezas y animales. Igualmente, esta protección permite al agricultor controlar la temperatura, la cantidad de luz y aplicar efectivamente control químico y biológico para proteger el cultivo (Rico-García, 2008). Motivo por el cual la agricultura bajo invernadero ha ido en constante crecimiento, estimándose que la superficie actual sembrada bajo invernadero es de 15,000 ha en México (AMHPAC, 2010). Por otro lado, el grado de tecnificación de un invernadero se mide en función del grado de dependencia del ambiente interno con las condiciones externas. En México existen invernaderos simples, de poca tecnología, aunque su utilización implica mayores niveles de tecnología que las siembras a campo abierto, así como rendimientos y estructura de costos diferentes (Guantes, 2006).

En México, los productores de hortalizas bajo invernadero enfrentan algunas desventajas respecto de la competencia que implica Canadá, Estados Unidos y otros países desarrollados. Entre ellas destaca el limitado acceso a fuentes de capital y los costos de energía más elevados, en especial en invernaderos de alta y media tecnología. Cabe mencionar que la producción de invernadero en México todavía continúa adaptándose a las tecnologías y lugares más apropiados para producir, esto es aún no está consolidado (Ocaña, 2007).

## 1.2 Ventilación natural en invernaderos

En lo referente al área de control climático, uno de los temas más actuales de investigación en la producción de cultivos bajo invernadero es en torno a los parámetros adecuados de las diferentes variables climáticas para obtener el mejor cultivo posible. El estudio de las condiciones climáticas ha constituido un factor muy importante para obtener un buen rendimiento en los cultivos bajo invernadero. Estudios encaminados a la automatización de invernaderos se han realizado tomando como base los factores climáticos como indicadores clave para el control de las variables que influyen en el desarrollo de los cultivos. Un control estricto en los cambios de temperatura, de la cantidad de luz durante los diferentes estados de crecimiento de la planta, la cantidad de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) en el ambiente, la humedad y otras variables tienen un efecto directo en el crecimiento de la planta, así como en la calidad del fruto (Rico-García, 2008).

De acuerdo con Demrati et al. (2001), la ventilación natural se ha convertido en una parte importante en la estrategia de diseño de instalaciones en situaciones donde la electricidad es escasa o inexistente y el ahorro energético se vuelve muy importante. La ventilación natural es el método de enfriamiento más común en invernaderos de baja tecnología debido a su costo, ya que emplean cubiertas plásticas y malla-sombra que representan el 98% en México.

Al interior del invernadero se lleva a cabo una interrelación de variables que definen el microclima, las cuales forman un sistema de dependencias dinámico y complejo. Dichas variables son: Radiación solar, Temperatura, Humedad relativa y  $\text{CO}_2$ . El estudio del clima al interior del invernadero mediante modelos matemáticos no es reciente, como lo demuestra Kostyuak et al. (1990) citado por Critten y Bailey (2002) quienes determinaron la diferencia de temperatura en la región de intercambio gaseoso en las hojas de las plantas al interior en la parte baja del cultivo, aún así dichos modelos no han sido capaces de dar una solución al incorporar muchas variables al sistema de estudio. Sin embargo en la última

década, con el desarrollo de las herramientas de cálculo computarizado y el aumento en el poder de procesamiento se han desarrollado técnicas más precisas que permiten modelar con mayor exactitud los fenómenos de intercambio de masa y energía al interior de los invernaderos (Norton et al., 2007; Sase et al., 2006; Bournet y Boulard, 2010).

### **1.3 Descripción del problema**

Como se ha observado, las ventajas del cultivo bajo invernadero son bastas; sin embargo uno de los obstáculos para la introducción de esta tecnología en México ha sido el nivel de inversión requerida. Un invernadero holandés cuesta aproximadamente 100 dólares el metro cuadrado y un canadiense 50 dólares, esto incluye el invernadero y un control de riego y temperatura. Este tipo de inversiones se encuentran fuera del alcance de muchos de nuestros productores, por lo que es necesaria la oferta de tecnología a costos menores. Por esta razón, la mayoría de los invernaderos en México son de baja tecnología y emplean ventilación natural, la cual ocasiona gradientes de temperatura que se deben principalmente a la mala circulación del flujo de aire y afectan directamente al rendimiento del cultivo, traduciéndose en rendimientos menores al 50% en comparación con otros países.

De acuerdo con Rico-García (2008), los diseños actuales de invernaderos no permiten una adecuada circulación del aire y por lo tanto es más fácil modificar las prácticas de cultivo que rediseñar la estructura de un invernadero para obtener mejores condiciones del clima al interior. Por lo que es necesario modelar la influencia de la geometría de los cultivos ya que no se ha considerando el espacio horizontal y vertical a detalle, que ocupan las plantas en cualquier diseño de invernadero con ventilación natural (Bournet y Boulard, 2010).

En consecuencia faltan estudios encaminados a comprender los elementos que definen el clima mediante modelos matemáticos, ya que actualmente no

existe un modelo que permita mejorar la ventilación en el interior del invernadero sin modificar su diseño.

#### **1.4 Justificación**

La agricultura bajo invernadero se ha desarrollado en México en la última década. El gobierno mexicano ha incentivado el cultivo bajo invernadero, creando facilidades para la importación de los mismos que incluyen acciones como la exclusión del pago del Impuesto al Valor Agregado (IVA) y la nula tarifa arancelaria. Se prevé que continúe su crecimiento a un ritmo estimado entre el 10 al 15% que equivale a una proporción similar de superficie cubierta actualmente, la cual está conformada por el 55% de recubrimiento plástico y 45% malla sombra; ambos con ventilación natural (Guantes, 2006).

En los invernaderos de baja tecnología las condiciones climáticas internas son totalmente dependientes del clima exterior, por lo que es necesario realizar ajustes internos a estructuras y prácticas de cultivo, que permitan en conjunto controlar el ambiente interior y compensar los efectos ejercidos por el ambiente exterior. Para este tipo de invernaderos de bajo precio y pobre tecnología, es necesario el estudio de las condiciones de ventilación que incorporen técnicas accesibles para mejorar las condiciones climáticas al interior de los mismos (Ocaña, 2007).

Para poder realizar con exactitud un estudio del clima al interior del invernadero, es necesario el empleo de modelos basados en la transferencia de energía, ya que mediante el empleo de modelos analíticos se vuelve complejo el manejo de distintas variables de estado en forma simultánea (Rico-García et. al, 2008). Debido a esto, se requiere utilizar modelos numéricos como la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) que proporciona una solución numérica a partir de un balance de energía de un volumen de control, y que comparado con otros

métodos y tecnologías costosas, permite un eficiente estudio del clima al interior del invernadero.

## **1.5 Hipótesis**

La adecuada orientación, el tamaño y la altura del espacio de los cultivos en invernaderos con ventilación natural modifica positivamente el patrón de flujo de aire y transferencia de calor, mejorando las condiciones climáticas de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub>.

## **1.6 Objetivos**

### **1.6.1 Objetivo General**

Analizar mediante Redes Bayesianas un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) del flujo de aire que permita evaluar la mejor orientación y tamaño del cultivo, relacionando las variables climáticas temperatura, humedad relativa y dióxido de carbono en el espacio del cultivo bajo invernadero, para mejorar las condiciones ambientales al interior de los invernaderos.

### **1.6.2 Objetivos Específicos**

**1.6.2.1** Caracterizar el comportamiento del flujo de aire en el espacio del cultivo en invernadero.

**1.6.1.2** Establecer el comportamiento de las variables: Temperatura, Humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub> al interior de un invernadero mediante Redes Bayesianas.

**1.6.1.3** Desarrollar un modelo numérico mediante CFD acorde a las condiciones climáticas del área de estudio.

**1.6.1.4** Analizar el modelo CFD mediante Redes Bayesianas para mejorar las condiciones ambientales al interior de los invernaderos.

## **CAPITULO II. VENTILACIÓN NATURAL**

La ventilación es considerada como uno de los principales procesos para determinar el microclima de un invernadero (Fernández and Bailey, 1992; Boulard and Baille, 1995; Kittas et al., 1997; Bouchet et al., 2003; Teitel et al., 2005).

La ventilación natural es el resultado de la acción de dos fuerzas naturales: la dinámica debida al viento y la térmica o de flotación (Coelho et al., 2006). La ventilación dinámica se incrementa con el aumento en la velocidad del viento y superficie de ventanas; mientras que la ventilación por efecto de flotabilidad se incrementa con el aumento de las diferencias entre la temperatura del aire interno y externo al invernadero (Katsoulas et al., 2006). El incremento en la superficie de ventana se favorece en invernaderos de mayor altura, los cuales tienen un comportamiento sujeto a fluctuaciones menos bruscas de temperatura en comparación a invernaderos de escaso volumen. La importancia de la superficie de ventanas se hace evidente con la adopción de sistemas de exclusión de insectos. Estos consisten en el uso de mallas de trama fina que impiden el ingreso de insectos al invernadero (Teitel et al., 1998) lo que permite reducir la aplicación de pesticidas; sin embargo al mismo tiempo dificultan la ventilación, intensificando la temperatura interna (Kittas et al., 2002).

Una de las ventajas de utilizar la ventilación natural como método de enfriamiento es la reducción del costo de operación de un invernadero (Baptista et al., 2001). Esto determina que se convierta en uno de los métodos de control del

clima más adecuado bajo las condiciones de producción hortícola de bajos recursos.

El incremento de la temperatura externa en invernaderos con ventilación natural ocasiona que la temperatura interna del mismo supere significativamente su valor óptimo, haciendo esencial la entrada de aire para prevenir daños al cultivo (Rico-García, 2008).

La ventilación en los invernaderos, influye principalmente en las variables: temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub>, lo cual afecta directamente el desarrollo y crecimiento de los cultivos (Coelho et al., 2006). Bajo clima cálido, la temperatura del invernadero suele exceder el umbral máximo biológico ocasionando disminuciones de rendimiento y calidad (Ali et al., 1990). Un deficiente movimiento de aire provoca zonas con diferencias de temperatura y humedad, lo cual impacta en el rendimiento del cultivo. Los principales efectos de la ventilación sobre los factores climáticos son los siguientes:

- a) Reducción de la temperatura del invernadero por diferencia de densidades, desde la base hacia las ventanas cenitales debido al “efecto chimenea”.
- b) La velocidad exterior del viento aumenta la tasa de renovación del aire.
- c) Reducción de la humedad al interior del invernadero.
- d) Reducción del riesgo por enfermedades de las plantas.

Para el manejo correcto de la ventilación natural, se recomienda cerrar las ventanas del invernadero en la noche con la finalidad de obtener una mayor concentración de CO<sub>2</sub> al amanecer, debido a que es cuando las plantas inician la fase lumínica de la fotosíntesis y el CO<sub>2</sub> es su principal sustrato. Cuando, la concentración de CO<sub>2</sub> al interior es menor que en el exterior debido a la fotosíntesis, es el momento adecuado para realizar la ventilación. Si se retrasa la apertura y ventilación del invernadero por la mañana, ocasiona condensación sobre el cultivo facilitando la aparición de enfermedades (Sanz *et al.*, 2001)

## **2.1 Comportamiento del clima al interior del invernadero**

La rentabilidad de los cultivos depende de las buenas condiciones ambientales que les permitan obtener cosechas abundantes, para esto el empleo de los invernaderos tienen como función proporcionar protección a las plantas de las condiciones desfavorables del clima. Al interior del invernadero se lleva a cabo una interrelación de variables que definen el microclima, las cuales forman un sistema de dependencias complejo, dichas variables son: Radiación solar, Temperatura, Humedad relativa y CO<sub>2</sub> (Castilla, 2007).

### **2.1.1 Radiación solar**

La radiación natural producida por el sol es la más importante fuente de energía, la cual varía con la estación y hora del día. Los tres métodos de intercambio de calor, conducción, convección y radiación contribuyen a las propiedades térmicas del invernadero. La conducción ocurre a través de la cubierta y el piso de invernadero. La convección es generada por diferencias de temperatura entre el aire, el suelo, la cubierta, las plantas así como el exterior del invernadero. La convección es el mecanismo más difícil de cuantificar con precisión ya que los intercambios de calor por convección se basan siempre en relaciones empíricas (Critten y Baley, 2002).

En los países con clima cálido e inviernos benignos, el principal problema del uso del invernadero se presenta en el verano, cuando existe una insolación muy alta que provoca elevaciones excesivas en la temperatura, las cuales afectan el desarrollo de los cultivos (Rico-García, 2008).

La radiación solar influye en el desarrollo de las plantas, ya que es un factor imprescindible en el proceso de fotosíntesis, por lo que su métrica se establece con el término de Radiación Fotosintética Activa (PAR). En períodos de elevada intensidad luminosa acompañada de altas temperaturas produce un activo crecimiento vegetativo (Fidaros et al., 2010).

Cuanto mayor sea la luminosidad dentro del invernadero, mayores deben ser las temperaturas y la cantidad de CO<sub>2</sub> para que la PAR sea máxima (Iglesias y Muñoz, 2007).

### 2.1.2. Temperatura

La temperatura al interior del invernadero constituye la variable de mayor peso, ya que interviene de manera directa con el crecimiento y desarrollo de las plantas. Aunque cada cultivo tiene un rango de temperatura óptimo para su desarrollo, podemos definir que en su mayoría se encuentran entre 10 a 25°C; dicho rango se encuentra establecido de acuerdo a los siguientes parámetros: (Nisen et al.,1988).

- a) Temperatura mínima letal, que indica daños irreversibles en los cultivos.
- b) Temperaturas máxima y mínima biológicas, dentro de las cuales los cultivos pueden desarrollar sus etapas o fases vegetativas.
- c) Temperaturas nocturna y diurna que indican el rango óptimo para el desarrollo de cada fase de los cultivos.

En la Tabla 1. Se muestran estos rangos para algunos cultivos hortícolas de las cuales podemos observar variaciones relativamente pequeñas con respecto a las temperaturas observadas en invernaderos poco tecnificados.

**Tabla 1.** Rangos de temperatura óptimos para el aire y sustrato en diversos cultivos hortícolas según Castilla (2007).

Cultivo	Aire (°C)		Sustrato (°C)
	Día	Noche	
Tomate	22 – 26	13 – 16	15 - 20
Pepino	24 – 28	18 – 20	20 – 21
Melón	24 – 30	18 – 21	20 – 22

Judía	21 – 28	16 – 18	15 – 20
Pimiento	22 - 28	16 – 18	15 – 20
Berenjena	22 – 26	15 – 18	15 – 20
Lechuga	15 – 18	10 – 12	10 – 12
Fresa	18 – 22	10 – 13	12 – 15
Clavel	18 – 21	10 – 12	10 – 15
Rosa	20 – 25	14 – 16	15 – 18
Gerbera	20 – 24	13 – 15	18 – 20
Gladiolo	16 – 20	10 – 12	10 - 15

### 2.1.3. Humedad Relativa

La humedad relativa se define como la cantidad de vapor de agua contenida en la atmosfera en relación con la cantidad máxima que dicha atmosfera podría ser capaz de retener a una temperatura dada. Es una variable que se comporta de manera inversamente proporcional a la temperatura, en función que en una masa de aire constante, a mayor temperatura mayor volumen y por tanto mayor capacidad de retención de vapor de agua (Humedad Absoluta) y menor Humedad relativa (Roy y Boulard, 2005).

En los invernaderos se producen gradientes verticales de temperatura y, como la humedad absoluta se distribuye más o menos homogéneamente por todo el invernadero, se producen también gradientes de humedad relativa en altura. En aquellos puntos donde la humedad relativa llega al 100% se produce la condensación (Perales et al.,2003).

Al igual que la temperatura, la humedad relativa tiene un efecto en los cultivos; si la humedad relativa es excesiva las plantas reducen su transpiración y disminuyen su crecimiento además de producir abortos florales por apelmazamiento de polen e incrementar el riesgo de incidencia de enfermedades

por hongos. Por otro lado, si la humedad relativa es demasiado baja provoca un exceso en la transpiración en las hojas de las plantas que conlleva a la deshidratación (Seginer, 2002).

#### 2.1.4 Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

El CO<sub>2</sub> en la atmosfera constituye la materia prima para que se lleve a cabo el proceso de fotosíntesis en los vegetales. Su tasa de contenido normal en la atmosfera es de 300 ppm aunque tasas de entre 1000-2000 ppm bajo condiciones de invernadero tiene una influencia directa sobre la tasa fotosintética y de esta manera sobre la producción y rendimiento de los cultivos. Concentraciones de 3000 ppm resultan toxicas para algunos cultivos (Casanova, 2008). El CO<sub>2</sub> es una variable que se relaciona con la temperatura de manera inversamente proporcional, ya que ha mayor insolación, mayor temperatura y tasa fotosintética, lo cual origina un descenso en la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico (Figura 1).

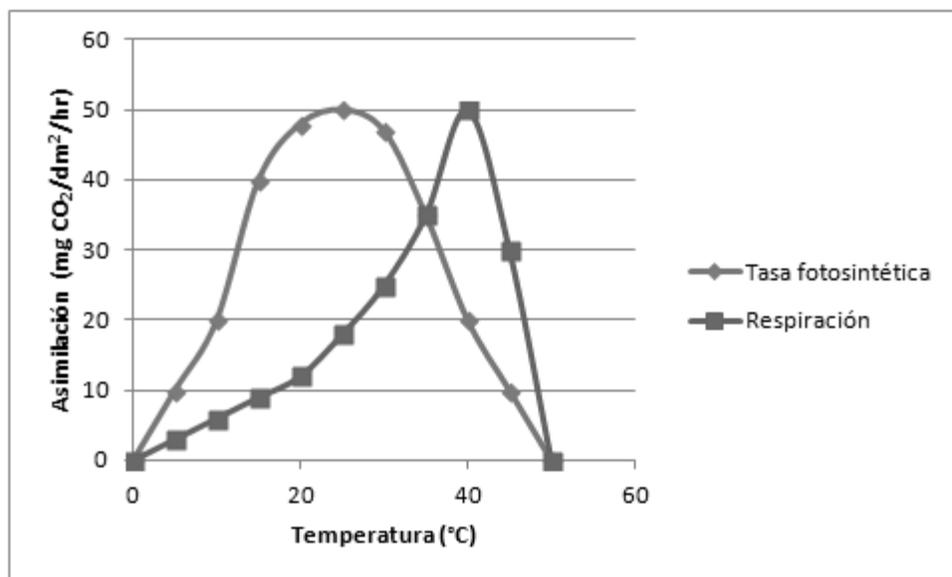


Figura 1. Gráfica del efecto de la temperatura sobre la asimilación del CO<sub>2</sub> en los cultivos (Sun, 2010).

## 2.2 Relaciones entre las variables en los invernaderos

### **2.2.1 Temperatura y Humedad relativa**

La humedad relativa es una medida del contenido de humedad del aire y es un indicador de la evaporación, transpiración y probabilidad de lluvias convectivas. La Humedad relativa del aire depende en gran medida a la temperatura, que cambia considerablemente durante el día. La temperatura del aire y la humedad relativa mantienen una relación muy estrecha con la tensión constante de vapor de agua. Existe una relación lineal inversamente proporcional que se puede demostrar teórica y empíricamente. Esto explica que al aumentar la temperatura, el nivel de saturación del vapor de agua en la atmósfera aumenta (Martínez y Lira, 2008).

### **2.2.2 Humedad relativa y el Punto de rocío**

La Humedad relativa es la relación del vapor de agua del aire en relación a la necesaria para llegar al punto de saturación, expresada en porcentaje. Cuando el aire está saturado, la Humedad relativa es del 100% y se llega al Punto de rocío.

### **2.2.3 Temperatura y Presión de aire**

Estos son dos elementos del clima que varían inversamente el uno al otro cuando la temperatura del aire es mayor y la presión es menor. De forma inversa, cuando el aire es más frío aumenta la presión atmosférica. Así, cuando la temperatura del aire aumenta, el clima tiende a ser inestable y puede producir tormentas de lluvia. Y cuando la temperatura del aire disminuye, el tiempo será más estable y no presentan nubes y los días serán soleados y el ambiente seco (Wash et al., 1990).

## **2.3 Modelos de elemento finito mediante CFD**

Con el fin de realizar un estudio preciso del clima dentro de un invernadero, es necesario el uso de modelos basados en la transferencia de energía (Rico-García et al., 2008). Los modelos matemáticos basados en balances de masa y energía asumen un ambiente de invernadero homogéneo. Estos modelos generan un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias, sin una solución analítica. Sin embargo, un seguimiento más detallado del medio ambiente dentro de los invernaderos refleja una variación en dos y tres dimensiones de las variables climáticas. Recientemente, este problema se ha abordado utilizando las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos. El conjunto de métodos numéricos aplicados a fin de resolver esas ecuaciones se llaman Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). La CFD proporciona una solución numérica de un balance energético de un volumen controlado, que en comparación con otros métodos y tecnologías costosas permite un estudio eficaz del clima dentro del invernadero. Las técnicas de CFD toman en cuenta los valores de las variables independientes como incógnitas principales en un número finito de lugares dentro del dominio, y luego un conjunto de ecuaciones algebraicas se derivan de las ecuaciones fundamentales aplicadas en el dominio, las cuales pueden ser resueltas por algoritmos preestablecidos.

La Dinámica de Fluidos Computacional es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran flujo de fluidos, con el empleo de computadoras que realizan millones de cálculos para simular la interacción de líquidos y gases con superficies definidas por las condiciones de contorno. En estudios recientes del modelado de flujo de aire con CFD se ha profundizado para probar su eficacia en las relaciones de los factores climáticos, encontrándose que la temperatura al interior es heterogénea y que presenta un gradiente vertical con distribución en función del tipo de movimiento de aire exterior. Estos estudios han permitido realizar mejoras en el diseño de invernaderos para reducir la temperatura al interior del mismo (Norton et al., 2007).

### 2.3.1 Principios Fundamentales de CFD

La dinámica computacional de fluidos está basada en las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos (continuidad, momento y energía). Las ecuaciones obtenidas directamente del volumen o elemento fijo en el espacio se conocen como “forma de conservación”. Las ecuaciones obtenidas directamente del volumen o elemento moviéndose con el fluido se les conoce como “forma de no conservación” (Anderson, 1995).

#### 2.3.1.1 Derivada Sustancial

La derivada sustancial es físicamente la tasa de cambio, de cualquier sustancia que se mueve con un elemento de fluido. Está formada de dos partes; a la primera parte se le llama la derivada local, que es físicamente la tasa de cambio en el tiempo en un punto fijo; a la segunda parte se le llama la derivada convectiva, que es físicamente la tasa de cambio debida al movimiento del elemento de fluido de un punto a otro del campo de fluido donde las propiedades del fluido son espacialmente diferentes. La derivada sustancial se puede aplicar a cualquier variable del campo de fluido, por ejemplo: presión ( $p$ ) o temperatura ( $T$ ) (Anderson, 1995).

$$\nabla \equiv i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$$

$$V \equiv (u, v, w) \tag{3.1}$$

#### 2.3.1.2 Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV + \iint_S \rho V \cdot dS = 0 \tag{3.2}$$

### 2.3.1.3 Ecuación de momento (forma no conservativa)

$$\begin{aligned}
 \text{Componente en x} \quad \rho \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial t_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial t_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial t_{zx}}{\partial x} + \rho f_x \\
 \text{Componente en y} \quad \rho \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial t_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial t_{yy}}{\partial x} + \frac{\partial t_{zy}}{\partial x} + \rho f_y \\
 \text{Componente en z} \quad \rho \frac{Dw}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial t_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial t_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial t_{zz}}{\partial x} + \rho f_z
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

### 2.3.1.4 Ecuación de energía (forma no conservativa)

$$\begin{aligned}
 \rho \frac{Dw}{Dt} \left( e + \frac{V^2}{2} \right) &= \rho q + \frac{\partial}{\partial x} \left( k + \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k + \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k + \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} \\
 &+ \frac{\partial(ut_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(ut_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(ut_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(vt_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(vt_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(vt_{zy})}{\partial z} \\
 &+ \frac{\partial(wt_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(wt_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(wt_{zz})}{\partial z} + pf \cdot V
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Las ecuaciones forman un sistema acoplado de ecuaciones diferenciales parciales no-lineales. Hasta ahora no se ha encontrado solución analítica. Es común asumir que el fluido es un gas perfecto en donde las fuerzas

intermoleculares se pueden despreciar. Para un gas perfecto la ecuación de estado es:

$$p = \rho RT \quad (3.5)$$

en donde  $R$  es la constante específica del gas. Para un gas calóricamente perfecto tenemos:

$$e = C_v T \quad (3.6)$$

en donde  $C_v$  es el calor específico a volumen constante (Rodríguez, 2006; Norton et al, 2007).

## **2.4 Redes Bayesianas**

La predicción del gradiente al interior de un invernadero con ventilación natural es difícil, debido a la naturaleza inherente estocástica del flujo de aire. Las Redes Bayesianas son técnicas numéricas de incertidumbre que hacen uso de la inferencia bayesiana como método heurístico que puede ser de ayuda para describir las relaciones entre las variables que definen las condiciones de ventilación.

### **2.4.1 Conceptos teóricos**

Las Redes Bayesianas (BN) son tipos de representación del conocimiento desarrollado en el campo de la inteligencia artificial para realizar aproximaciones en el campo del razonamiento (Pearl, 1988; Mediero, 2007; Gámez et al, 2011; Zaidan et al, 2011). Una BN es un gráfico acíclico cuyos nodos corresponden directamente a los conceptos o variables aleatorias y cuyos enlaces se

corresponden con las relaciones o funciones (Correa et al., 2009). Las variables se definen en un dominio discreto o cualitativo, y las relaciones funcionales describen las inferencias causales expresadas en términos de probabilidades condicionales que se muestra en la ecuación 4.1.

$$P(x_1, \dots, x_n) = P(x_i | \text{parents}(x_i)) \quad (4.1)$$

Una BN se puede utilizar para identificar las relaciones entre las variables anteriormente indeterminadas o para describir y cuantificar estas relaciones, incluso con un conjunto de datos incompletos (Hruschka et al, 2007; Reyes, 2010). El algoritmo de solución de BN permite el cálculo de la distribución de probabilidad esperada de las variables de salida. El resultado de este cálculo depende de las distribuciones de las probabilidades de las variables de entrada. A nivel global, las BN pueden ser percibidas como una distribución de probabilidad conjunta de una colección de variables aleatorias discretas (Garrote et al., 2007).

$$P(c_j | x_i) = P(x_i | c_j) P(c_j) / \sum_k P(x_i | c_k) P(c_k) \quad (4.2)$$

Una probabilidad a priori  $P(c_j)$  es una probabilidad de que una muestra  $x_i$  pertenezca a la clase  $c_j$ , sin ninguna información sobre sus valores característicos, como se muestra en la ecuación 4.2. Las máquinas de aprendizaje en inteligencia artificial, están relacionadas con los métodos de minería de datos, la clasificación o agrupación y el reconocimiento de patrones. Los métodos estadísticos de aprendizaje automático se pueden aplicar al marco de la estadística bayesiana, sin embargo el aprendizaje automático se puede emplear en una variedad de técnicas de clasificación para producir otros modelos de BN (Subramaniam et al., 2010; Naveed et al., 2011). El objetivo de una BN de aprendizaje es encontrar un arreglo de red que mejor describa los datos observados.

Son dos propiedades de las redes bayesianas, que pueden ser aprovechadas. En primer lugar su capacidad para representar la distribución de probabilidad, y la segunda que el conocimiento experto puede aplicarse directamente tanto a la estructura de la red como a sus parámetros (Eredics et al., 2012).

#### **2.4.2 Clasificadores Bayesianos**

Los Clasificadores Bayesianos son técnicas de aprendizaje automático para las BN, las cuales han permitido expandir drásticamente las posibles aplicaciones de estos modelos, mediante la posibilidad de inducir el concepto de BN a las bases de datos (Aguilera et al., 2011). En los modelos de aprendizaje, el método más representativo es el de *“búsqueda y resultado”* basado en el algoritmo K2. Dicho algoritmo comienza asignando un nombre a cada variable sin *“padres”*. A continuación agrega a cada variable un padre de forma incremental, la cual en su mayoría aumenta la puntuación de la estructura resultante. Cuando cualquier adición no puede aumentar el marcador, deja de aumentar padres a la variable. Tomando en cuenta un conocimiento previo del ordenamiento de las variables en base a su grado de dependencia, el espacio de búsqueda en esta restricción es mucho menor que el espacio de toda una estructura y no hay necesidad de comprobar los ciclos en el proceso de aprendizaje. Si no se tiene conocimiento anterior sobre el ordenamiento de las variables, se procede a nuevas búsquedas (Guoliang, 2009).

Las BNs pueden ser empleadas para determinar relaciones no determinadas anteriormente, entre variables que definen las condiciones del clima, aún mediante datos incompletos, con lo cual puede ser una herramienta para describir y analizar fenómenos al interior de los invernaderos (De la torre-Gea et al., 2011a).

#### **2.5 Estudios realizados en invernaderos mediante CFD**

En los últimos cinco años se han realizado estudios para determinar las condiciones del clima al interior de invernaderos empleando CFD como se

muestra en la Figura 2, con lo cual se ha podido aumentar el grado de realismo incorporando modelos 3D, mallas anti insectos y la simulación del cultivo mediante su incorporación como medio poroso, entre otros. Los resultados obtenidos han podido contribuir al mejor entendimiento del fenómeno de la ventilación del invernadero (Norton et al., 2007).

### **2.5.1 Radiación solar y temperatura**

Se han realizado estudios utilizando modelos de radiación solar y transpiración basados en el balance de calor y humedad de los cultivos, para investigar la distribución de temperatura y humedad del aire así como las interacciones con los procesos fisiológicos del cultivo, además de la distribución del flujo de aire (SASE, 2006). De acuerdo con Tablada (2005), el factor de protección solar juega un papel crucial en el mantenimiento estable de las condiciones térmicas en el interior, incluso si la temperatura exterior es mayor. La velocidad del aire ligeramente más alta en la última planta es insignificante el fin de reducir los efectos negativos de la radiación solar sobre el tejado y la fachada. La temperatura de la cubierta del invernadero es un parámetro esencial necesario para cualquier análisis de la transferencia de energía en el invernadero. Un modelo desarrollado por Impron et al. (2007) calculó la transmisión de la radiación a través de la cubierta del invernadero, incluyendo la Radiación Cercana al Infrarojo (NIR). Tong *et al.* (2009) desarrollaron un modelo numérico para determinar el tiempo que dependen de las distribuciones de la temperatura sobre la base de datos medidos cada hora de la radiación solar, el aire interior, el suelo y la temperatura exterior, teniendo en cuenta la radiación solar y la variable de la convección natural dentro del invernadero durante el invierno en el norte de China.

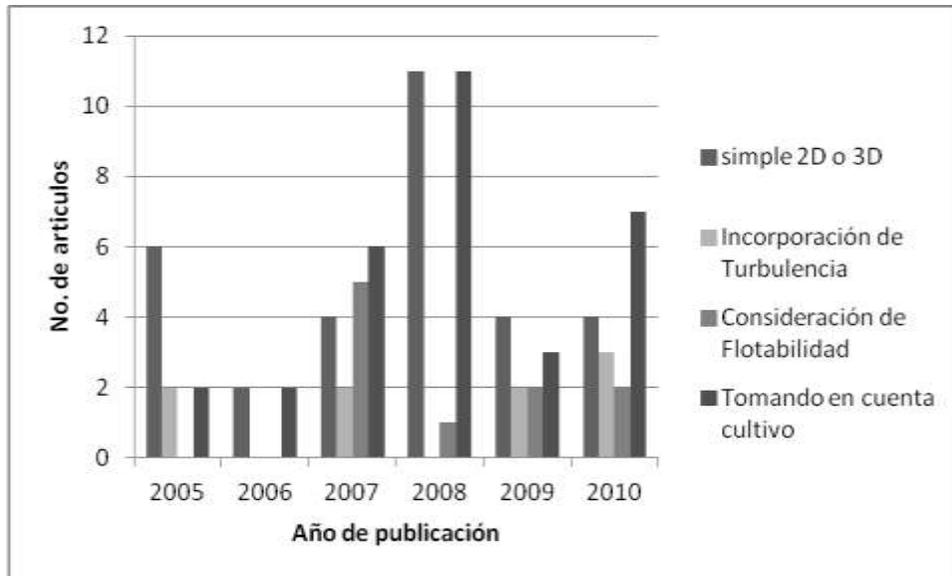


Figura 2. Proporción de las variables estudiadas en modelos CFD (De la torre-Gea, et al., 2011b).

### 2.5.2 Temperatura e intercambio de aire

El efecto de la radiación solar y térmica a menudo se toma en cuenta mediante el establecimiento de flujos de calor en los límites físicos del invernadero. La transferencia de radiación dentro del espacio del cultivo son de mayor interés, ya que determinan los dos principales procesos fisiológicos de los cultivos: la transpiración y la fotosíntesis. Por lo que es probable que reciba más atención en los próximos años (Bournet y Boulard, 2010). Pontikakos et al. (2006) analizaron los datos obtenidos de un modelo CFD, que muestran que la temperatura límite exterior es un parámetro crítico en el patrón de temperaturas al interior y que para determinadas temperaturas externas así como la dirección del viento, velocidad del aire se convierte en el parámetro principal. De acuerdo con Molina et al. (2006), mediante la ventilación natural, la distribución de la temperatura del aire al interior, en donde la temperatura media varía entre 28,2 a 32,9 ° C con una temperatura exterior de 26 ° C, se forman regiones en el interior del invernadero que fueron 13 ° C más caliente que el aire exterior. Nebbali et al. (2006) utilizó un método semi-analítico para determinar el perfil de temperatura del suelo a partir de los parámetros meteorológicos, para ayudar a evaluar el

intercambio de flujo de calor entre la superficie y el aire. Rico-García et al. (2008) mostró que la ventilación de los invernaderos, debido a la influencia de la temperatura produce altas tasas de intercambio de aire, sin embargo, los patrones de aire se producen cerca de las ventanas, con pobre intercambio de aire en la zona central del invernadero debido a un efecto de estancamiento que reduce el viento en todo el invernadero. De acuerdo con los resultados de Majdoubi et al. (2009), la convección y la radiación son las formas dominantes de la transferencia de calor. Las mediciones muestran que la diferencia entre la temperatura del aire dentro y fuera del invernadero está fuertemente ligada a la radiación solar y en segundo lugar, a la velocidad del viento. Sin embargo, Chow y Hold (2010) obtuvieron las siguientes conclusiones estudiando las fuerzas de flotabilidad de los gradientes térmicos:

- a) La radiación térmica sin la participación del aire cambia la distribución de temperatura del aire mediante la radiación de energía térmica en la zona superior de la pared hacia la zona inferior de la misma, que a su vez afecta la temperatura del aire a través de la conducción y convección;
- b) La inclusión de la absorción del aire aumenta el efecto de redistribución térmica radiativa, permitiendo que el aire absorba y disipe el calor, la reduciendo los gradientes de temperatura;
- c) Las condiciones térmicas extremas y de calor afecta a los límites absolutos de temperatura, pero no su distribución.

La radiación juega un papel importante en la distribución de calor. Las condiciones atmosféricas, especialmente la humedad relativa, son importantes para el cálculo de la radiación y la transferencia de calor. Flores-Velázquez (2010) descubrió recientemente que sin la ventilación natural cenital, es posible encontrar una relación lineal entre el aumento de la temperatura y la longitud del invernadero, respectivamente.

### 2.5.3 Incorporación de cultivos a los modelos CFD

El efecto de las plantas en la ventilación de gases también ha sido estudiado previamente. Bournet et al. (2007), basado en trabajos realizados por Nederhoff (1985) y Lee y Short (1998), dedujeron que un cultivo de 90 cm de altura y densidad baja, reduce la ventilación entre un 12 y un 15%. Roy y Boulard (2005) desarrollaron un modelo en 3D para la caracterización de las condiciones climáticas en un invernadero, la incorporando cinco filas de tomates maduros, como un medio poroso, donde se consideró la transferencia de calor y la flotabilidad, el calor y la humedad entre el cultivo y el flujo de aire en el interior. El calor y la humedad de los coeficientes de transferencia se deducen de las características de la capa límite laminar de la hoja, que se calculan con la velocidad del flujo en el cultivo. Khaoua et al. (2006) encontraron que bajo condiciones externas de la velocidad del aire de  $1 \text{ ms}^{-1}$  de la velocidad del viento y temperatura de  $30^\circ$ , en los cultivos varía la velocidad del viento en función de su modalidad, entre  $0,1$  y  $0,5 \text{ ms}^{-1}$  para el lado de sotavento, mientras que las diferencias de temperatura en la cubierta fueron entre  $2,0$  a  $6,1^\circ \text{ C}$ . En un estudio empleando tomates como cultivo, Majdoubi et al. (2007) encontraron que las hileras de cultivo orientadas perpendicularmente al movimiento del aire reducen la tasa de flujo de aire a través del cultivo en un 50 % bajo invernadero. De acuerdo a Baeza et al. (2008), un invernadero con una eficiencia de ventilación natural debe presentar un número suficiente de renovaciones de aire para eliminar el exceso de calor, con buena circulación de aire a través de la cosecha. El efecto del cultivo fue evaluado por Impron et al. (2007) mediante un sub-modelo para determinar los efectos de la ventilación, las propiedades de la cubierta y la transpiración de las plantas. De acuerdo con Kruger y Pretorius (2007), la temperatura y la velocidad del aire a nivel de planta se ven influidos por la disposición y el número de ventanas. Un estudio realizado por Sapounas et al. (2007) en el cual simularon un cultivo de tomate como un medio poroso, teniendo en cuenta la adición de la flotabilidad para desarrollar un modelo de la caída de

presión en el flujo de aire debido al cultivo. El modelo dependía de la etapa de crecimiento del área foliar y el cultivo, bajo el modelo de turbulencia RANS junto con el modelo de turbulencia  $k-\epsilon$  RNG. Los resultados, con mediciones experimentales obtenidos a 1,2 m en el cultivo, muestran que el sistema de enfriamiento por evaporación es eficaz con parámetros numéricos, proporcionando una herramienta útil para mejorar la eficiencia del sistema. Un estudio realizado por Roy et al. (2008) a nivel de la hoja, a través de un sistema experimental basado en células Münger, midió la temperatura, humedad relativa y diferentes flujos de calor a las hojas de soja, encontrando que de los valores mínimos de resistencia estomática van desde 66 hasta 200  $\text{cm}^{-1}$ . Teitel et al. (2008b) construyeron un modelo a escala, encontrando que la dirección del viento afecta de manera significativa la tasa de ventilación y distribución de la temperatura en los cultivos. En un invernadero tipo túnel, un cultivo de tomate fue modelado por Bartzanas et al. (2008) mediante el diseño de un medio poroso, donde destacan la influencia del sistema de calefacción en el microclima bajo invernadero. El comportamiento climático de las filas de un cultivo de tomates se estudió a través de funciones definidas por el usuario (Baxevanou et al., 2007). De acuerdo con Majdoubi et al. (2009), la reorientación de las filas de los cultivos de manera simple mejora de las condiciones climáticas. Endalew et al. (2009) realizó un modelo CFD de una planta con hojas y ramas de la copa, usando las ecuaciones de energía turbulenta en el sub-dominios creado alrededor de las ramas. Fidaros et al. (2010) simularon un cultivo de tomate en invernadero, como un medio poroso para el transporte de la radiación por coordenadas discretas (DO). De acuerdo con Teitel et al. (2010), al aplicar el enfoque de medio poroso, la ecuación Forchheimer se utiliza a menudo, puede causar resultados erróneos con respecto a la caída de presión. Una forma alternativa es a través de varios paneles de medios porosos utilizando geometrías realistas. Por otra parte, el cultivo ejerce una tensión mecánica (fuerza de arrastre) en el flujo por encima, del cultivo, pero también interactúa con la distribución de la temperatura y la humedad, mediante el proceso de la transpiración (Bournet y Boulard, 2010). Un modelo simple de la transpiración de un cultivo fue desarrollado por Sun et al. (2010), el cual relaciona

las características de ventilación en un invernadero en el este de China, para obtener una buena aproximación.

#### **2.5.4 Humedad**

Roy y Boulard (2005) estudiaron la dirección del viento, simulado de 0°, 45° y 90° con respecto a la orientación del invernadero para determinar la velocidad del viento, la temperatura y la distribución de humedad dentro del invernadero, para conseguir una buena aproximación de la humedad. De acuerdo con Demrati et al. (2007), los modelos permiten estimar con mayor precisión, las necesidades de agua para un cultivo de plátano bajo invernadero, mejorando el ahorro en las regiones donde el agua es el principal factor limitante para la agricultura. Roy et al. (2008) estudió la humedad en la superficie de las hojas en niveles bajos de luz, transpiración del cultivo y flujo de aire, integrando las tres variables en un modelo único de respuesta de los estomas de la hoja sobre el flujo de aire y la radiación. Campen (2008) mostró que el cambio climático a través de un sistema de ventilación es más homogéneo, permitiendo el control es más eficiente que con el método convencional de extracción de vapor. Los deshumidificadores y aire acondicionado reduce la diferencia global de la humedad entre el centro y las zonas más bajas de un invernadero, como lo demuestra Kim (2008), quien utilizando un modelo 3D, pudo identificar la distribución heterogénea de la humedad relativa en un invernadero. De acuerdo con Majdobi et al. (2009), un aumento de la temperatura del aire precede a un aumento más moderado en la humedad específica.

#### **2.5.5 Concentración de Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

En general son pocos los estudios que sean realizados sobre la distribución de CO<sub>2</sub> en relación a la ventilación en invernaderos. Actualmente no existe un modelo para predecir el gradiente de CO<sub>2</sub> a lo largo de la dirección del flujo de aire, aún siendo un gradiente de mayor importancia que la temperatura y la

humedad, ya que influye directamente en la asimilación de los cultivos (Teitel et al., 2010).

Se ha realizado un enorme esfuerzo dedicado al análisis de la ventilación de los invernaderos (Norton, 2007), cada nuevo estudio proporciona nuevos elementos no sólo en el movimiento del aire en el invernadero, sino también en las formas que adopta debido a las interacciones que ocurren en el medio ambiente, tales como la posición, forma y tamaño de las ventanas y, uno de los más importantes, la presencia del cultivo (Flores-Velázquez, 2010).

### **CAPITULO III. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Delimitación y caracterización de la zona de estudio**

El proyecto se desarrolló en los invernaderos experimentales le-1 e le-3 (Figura 3) ubicado en el Campus Amazcla (Figura 6), perteneciente a la facultad de Ingeniería, este se encuentra ubicado en la comunidad que lleva el mismo nombre, el cual pertenece al municipio del Marqués cuyas coordenadas geográficas son: latitud norte 20° 42', longitud oeste de 100° 16' y altitud de 1920 msnm. (INEGI, 2000).

Geomorfológicamente esta rodeados de sierras, mesetas y lomeríos que impiden el paso de los vientos húmedos del Golfo y la Mesa del Centro, que en sus laderas boreales retiene la humedad de los vientos que viajan de norte a sur. La disposición de esas áreas origina un índice de precipitación bajo en la zona y provoca una oscilación térmica de 7 a 14°C, que determina el carácter extremo de estos climas.

El clima de acuerdo con los criterios de Koppen modificados por Enriqueta García, (1988) se clasifica en general como semiseco, semicalido, con lluvia en verano y con un porcentaje de lluvia invernal menor de 5. La temperatura media anual varía de 18° a 19°C, la precipitación total anual fluctúa entre 450 y 630 mm.

Las áreas donde rige esta variante están situadas en los alrededores de la ciudad de Querétaro, Villa Corregidora, El Marqués, Santa Rosa de Jáuregui, la localidad Paso de Cuadros y en la colindancia del municipio de Peñamiller con el estado de Guanajuato.

### 3.2 Infraestructura Disponible

#### 3.2.1 Invernaderos

Ambos invernaderos están orientados de norte a sur y son de tipo Gótico, el le-1 es de 432 m<sup>2</sup> en 2 naves, mientras que el le-3 es de 135 m<sup>2</sup> en una nave; en donde cada nave es de 9 de ancho, 4.20 m de la altura a la canaleta, 6.70 m a la cumbrera (2.50 m de cumbrera), 24 m de longitud para el le-1 y 15 m para el le-3. El le-1 no cuenta con ventana cenital sólo laterales de tipo enrollable, de 3 x 9 m a la cara frontal y posterior y de 3 x 16 m a los costados, mientras que el le-3 además de las ventanas laterales, cuenta con una ventana cenital de .9 m de ancho por 15 m de largo, como se muestra en la Figura 3 y 4.

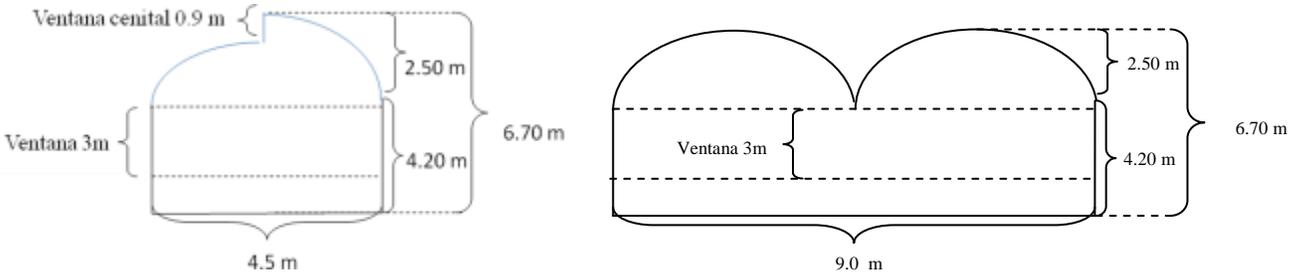


Figura 3. Dimensiones de los invernaderos experimentales le-1 e le-3.



Figura 4. Invernaderos experimentales le-1 e le-3 ubicados en Amazcala, Querétaro, donde se realizó la investigación.

### 3.2.2 Material biológico

Se trabajó con la especie *Solanum lycopersicum* (Figura 5) con las siguientes características de distribución:

- Densidad de población: 2.5 plantas/m<sup>2</sup>
- 60 cm de camellón de cultivo
- 1 m de pasillo



Figura 5. Cultivo de *Solanum lycopersicum* bajo invernadero en la UAQ Campus Amazcala.

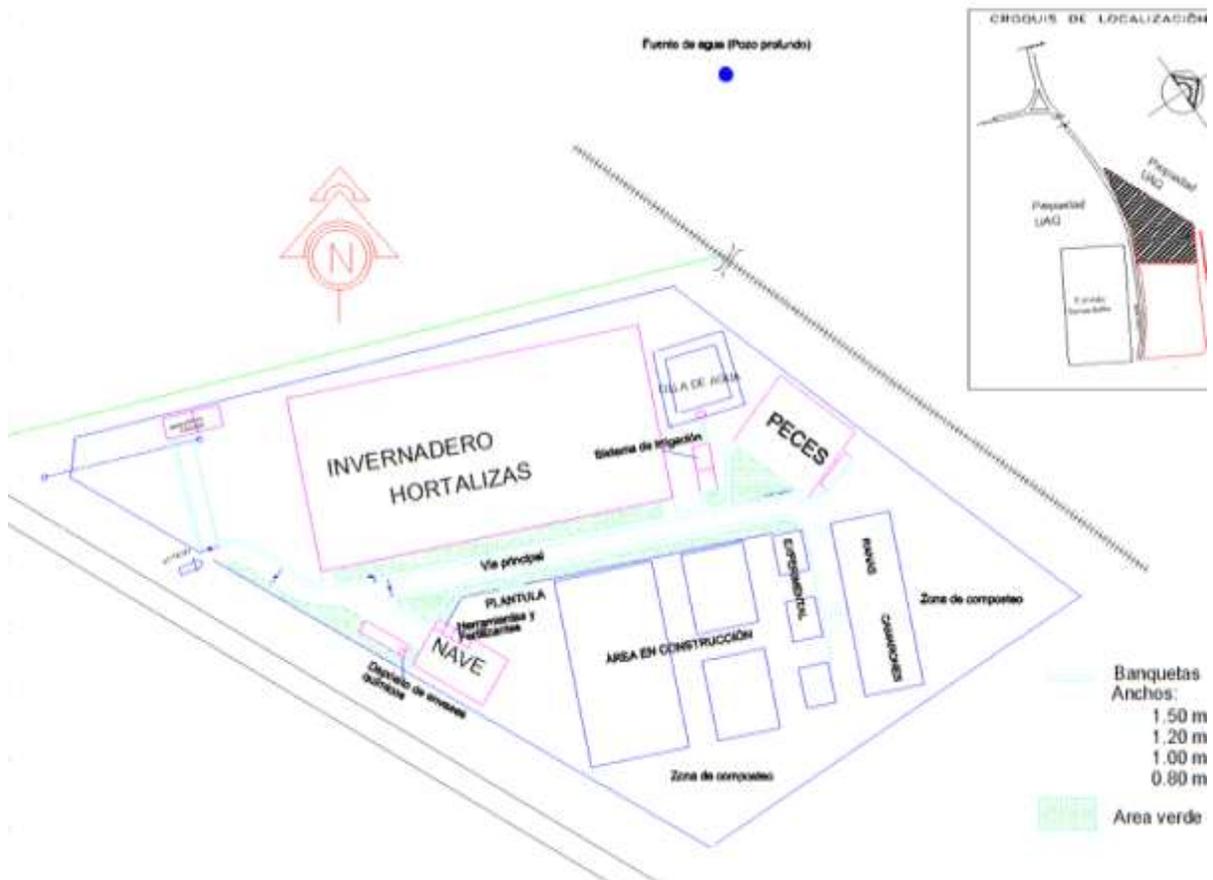


Figura 6. Plano general de las instalaciones en Amazcala

### **3.3 Caracterización del flujo de aire y variables de estado**

#### **3.3.1 Flujo de aire**

Se realizaron muestreos y mediciones del flujo de aire mediante anemometría omni-direccional. Se obtuvo un conjunto de datos experimentales en un período de 36 horas comprendidos entre el 21 al 22 de agosto del 2011, mediante el empleo de sensores colocados en la parte central al interior del invernadero. El conjunto de datos se compone de las variables: Temperatura del aire, Humedad del aire, Velocidad del viento y Concentración de CO<sub>2</sub>. Las mediciones fueron obtenidas a dos alturas; a un metro en el interior del cultivo y a tres metros del suelo sobre el cultivo. Las mediciones de temperatura y humedad fueron realizadas a intervalos de cuatro minutos por medio de un sensor de tipo LM335. La concentración de CO<sub>2</sub> fue determinada mediante un sensor de dióxido de carbono de tipo FYA600CO2H. La velocidad y dirección del aire fue determinada mediante anemómetros omnidireccionales, cuyo rango de operación es de 0 ms<sup>-1</sup> a 20 ms<sup>-1</sup> con una precisión de 0,03 m s<sup>-1</sup>. El conjunto de datos al interior del invernadero fueron tomados entre el 21 y 25 de agosto del 2011. Los datos fueron discretizados mediante el sistema ELVIRA, como se muestra posteriormente para ser empleados en el desarrollo del modelo de Redes Bayesianas que describe las relaciones entre todas las variables.

#### **3.3.2 Variables de estado**

Se llevaron a cabo muestreos y mediciones de las variables de estado: temperatura, humedad relativa, radiación solar y concentración de CO<sub>2</sub> al interior del invernadero. De igual forma y para establecer las condiciones climáticas del entorno del invernadero, se realizaron mediciones para las mismas variables de estado mediante la estación meteorológica TUNA desarrollada en la Universidad Autónoma de Querétaro.

### **3.4 Desarrollo del modelo CFD**

#### **3.4.1 Recursos informáticos**

Se realizó el desarrollo y simulación numérica del modelo CFD con el software ANSYS v.14 el cual fue ejecutado sobre una PC de 64 bits, procesador Intel Core™ i7-2600 a 3.4 GHz, RAM de 8 GB y bajo el sistema operativo Windows 7.0 Professional, con lo cual se resolvieron las ecuaciones de energía, continuidad y de momento.

#### **3.4.2 Metodología para el desarrollo del modelo CFD**

La metodología para desarrollar el modelo CFD se realizó de acuerdo al modelo propuesto por Rico-García (2008), del cual corresponden las siguientes etapas:

- 1) Discretización del flujo continuo: las variables de campo se aproximaron a un número finito de valores en puntos llamados nodos
- 2) Discretización de las ecuaciones de movimiento en función de los valores de los nodos
- 3) Solución del sistema de ecuaciones algebraicas y obtención de los valores de las variables en todos los nodos.

#### **3.4.3 Etapas del análisis de CFD**

##### **3.4.3.1 Cálculos previos**

- a) Formulación del problema y planteamiento de las ecuaciones de gobierno.

- b) Establecimiento de las ecuaciones de contorno
- c) Generación de la malla de volúmenes finitos

### 3.4.3.2 Configuración del modelo CFD y solución de las ecuaciones

El invernadero experimental fue simulado mediante el modelo CFD, en donde se diseñaron las ventanas como entradas y salidas del flujo de aire basadas en los valores de velocidad del aire previamente medidos mediante los sensores en el invernadero. El espacio ocupado por el cultivo fue simulado empleando figuras elípticas en 3D y asignando las propiedades de medio poroso. La solución del modelo 3D se realizó aplicando las ecuaciones de estado estacionario 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 mostradas anteriormente. En la Tabla 2 se muestra un resumen de las condiciones de frontera y valores iniciales.

Tabla 2. Resumen de las condiciones de frontera y valores iniciales del modelo CFD.

	Descripción	Magnitud
Solución	3D simulation	
Tipo de modelo	Estado estacionario	
Viscosidad	K-ε con flotabilidad	
Ecuación de energía	activo	
Simulación del cultivo	Medio poroso	
Entrada del dominio	Velocidad de entrada	1 m s <sup>-1</sup>

Salida del dominio	Presión de salida		
Radiación	1400 W		
Propiedades físicas			
	Air	Soil	Polyetilen
Densidad (kg m <sup>3</sup> )	1.22	1400	920
Calor específico ( J K <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup> )	1006.43	1738	1900
Conductividad térmica (W m <sup>-2</sup> k <sup>-1</sup> )	.0242	1.5	0.3
Coefficiente de expansion térmica °k <sup>-1</sup>	.003389		

En esta etapa del modelo CFD, tiene lugar la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el problema.

### 3.4.3.3 Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos de la solución de las ecuaciones se correspondieron con el valor de las variables de campo en cada punto de la malla. Esta cantidad de números debe reducirse a los fundamentos para poder manejarse con facilidad y obtener lo que pretendemos en el cálculo. Una parte importante de esta etapa es la representación gráfica de las variables que gobiernan el flujo, para tener una visión rápida y amena de los resultados obtenidos. También se incluye la comparación de los resultados con otros obtenidos:

- a) Mediante análisis de CFD
- b) Con resultados experimentales
- c) Con resultados de otras publicaciones científicas.
- d) Contra resultados obtenidos con redes Bayesianas

### **3.5 Evaluación de la geometría del espacio de cultivo y su orientación.**

Se llevó a cabo mediante el cálculo del flujo de aire y variables de estado con el modelo CFD en:

- a) relación a la altura del cultivo (1.0 y 3.0 m)
- b) camellones simples.
- c) en base al eje longitudinal del invernadero a 90°.

### **3.6 Análisis mediante Redes Bayesianas**

En análisis de las relaciones entre las variables se realizó mediante el sistema ELVIRA versión 0.162 en tres etapas, sugeridas por Mediero (2007):

- a) Pre-procesamiento: Se llevó a cabo mediante el algoritmo de imputación “por promedios” para completar las series de datos parciales. Este algoritmo reemplaza los valores faltantes o desconocidos, por el promedio de los valores para cada variable. Este método no necesita parámetros y consiste en la discretización de los datos masivos mediante el algoritmo, empleando dos intervalos con la misma frecuencia.
- b) Procesamiento: De acuerdo con Wang et al. (2006), la mejor estructura de red bayesiana se obtiene empleando el algoritmo K2 con un número máximo de padres igual a 3 y sin restricciones.
- c) Post-procesamiento: Se realizó un análisis de dependencias para obtener la estructura topológica de la red, la cual representa a las variables y sus dependencias causales. Después de obtener la red de aprendizaje paramétrico, se realizó el cálculo de las probabilidades condicionales en las variables que muestren relación o dependencia.

## CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Condiciones climáticas al interior del invernadero

El comportamiento de las variables estudiadas en los pasillos es muy similar al espacio de cultivo, sin embargo, a un metro de altura la temperatura es 3° mayor en los pasillos durante el día y menor en la noche (Figura 7). Esta diferencia entre las condiciones en pasillos con respecto al espacio del cultivo es debida al efecto de la ventilación, mencionado por Teitel *et al.* (2010).

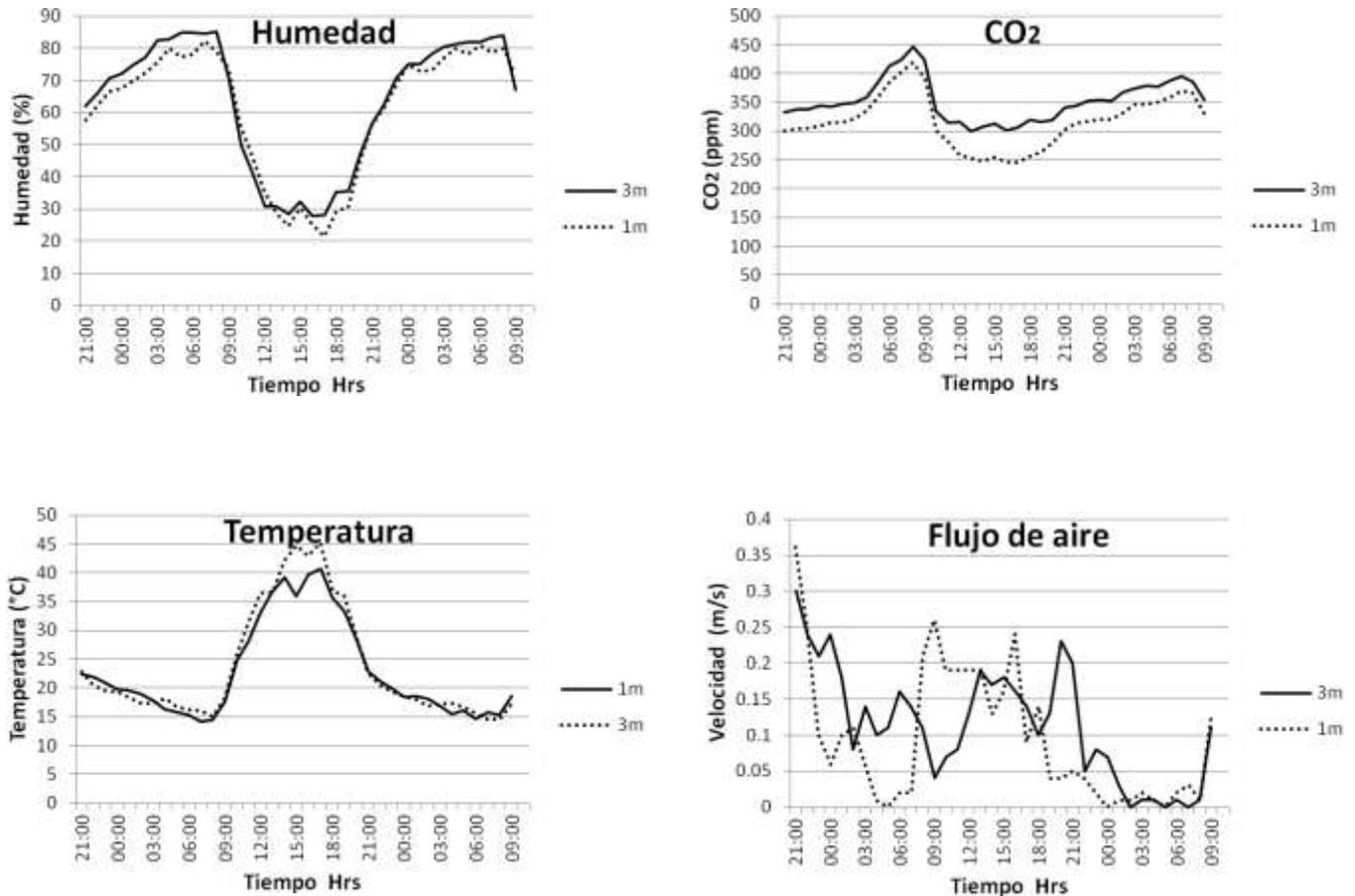


Figura 7. Condiciones climáticas de la parte central del invernadero.

La humedad y la concentración de CO<sub>2</sub> muestran una relación inversa con la temperatura. Este comportamiento es similar en los pasillos como en el espacio del cultivo incluso cuando está maduro. Sin embargo, la presencia del cultivo puede retener más humedad y presentar una mayor disminución en la concentración de CO<sub>2</sub> debido al efecto de la fotosíntesis.

#### 4.2 Modelo de Redes Bayesianas de las condiciones climáticas al interior del invernadero

El modelo de Redes Bayesianas nos permite identificar las dependencias e independencias entre las variables, así como cuantificar el grado de influencia entre ellas.

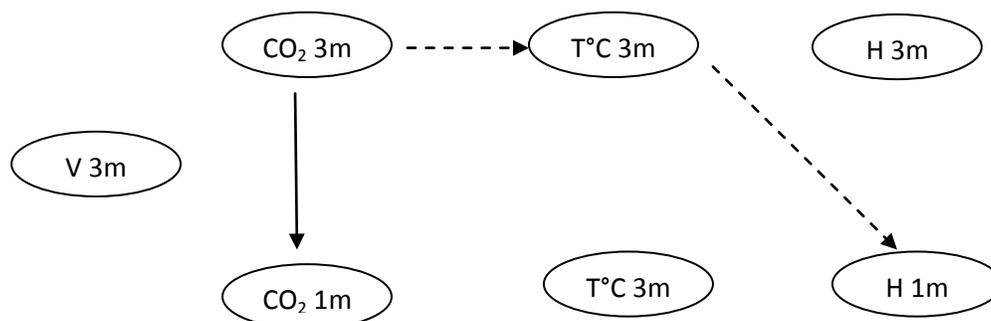


Figura 8. Red Bayesiana para datos de 36 horas, del 21 y 22 de agosto del 2011, en la parte central del invernadero; Velocidad del viento (V 3), dióxido de carbono a 1 m (CO<sub>2</sub> 1m), dióxido de carbono a 3 m (CO<sub>2</sub> 3m), temperatura del aire a 1 m (T° 1m), temperatura del aire a 3 m (T°C 3m), humedad a 1 m (H 1m) y humedad a 3 m (H 3m). La línea continua indica una relación directa y la línea punteada indica una relación inversa.

En la Figura 8 se muestran las relaciones entre variables considerando tanto el día como la noche, por lo que es importante establecer éste modelo de forma parcial, ya que las relaciones entre variables no son las mismas en el día y en la noche, haciéndose necesario un análisis más detallado en intervalos de

tiempo menores. Este modelo muestra que cuando la velocidad del aire es menor a 0.4 m/s no afecta a otras variables. La concentración de CO<sub>2</sub> a 1 m y 3 m están directamente relacionadas. La concentración de CO<sub>2</sub> a 3 m y la Humedad Relativa a 1 m son inversamente proporcionales a la temperatura a 3 m.

### 4.3 Distribución de la probabilidad condicional como bondad de ajuste del modelo de Redes Bayesianas

Se obtuvo un modelo de Red Bayesiana con un 87.5% de precisión, calculado por el sistema Elvira en la etapa de post-proceso, el cual muestra las relaciones entre las variables estudiadas. Las Tablas 3, 4 y 5 muestran los "datos esperados" como las variables de estado más probable. La bondad de ajuste del modelo muestra las siguientes dependencias: a) CO<sub>2</sub> 3m \ T ° 3m datos esperados con r = -1, datos observados con r = -0.907; b) T ° 3 m \ H 1m datos esperados con r = -1, datos observados con r = -0.906 y, c) CO<sub>2</sub> 3m \ CO<sub>2</sub> 1m datos esperados con r = 0.999, los datos observados con r = 0.986.

Tabla 3. Distribución de probabilidad condicional entre CO<sub>2</sub> y Temperatura del aire a 3 m.

<b>CO<sub>2</sub> 3m/T°3m</b>	<b>13° C</b>	<b>25° C</b>	<b>37° C</b>
<b>300 ppm</b>	0.067	0.133	0.75
<b>375 ppm</b>	0.067	0.734	0.1875
<b>450 ppm</b>	0.867	0.133	0.0625

Tabla 4. Distribución de probabilidad condicional entre Temperatura del aire a 3 m y Humedad relativa a 1 m.

<b>T° 3m/ H 1m</b>	<b>26%</b>	<b>53%</b>	<b>80%</b>
--------------------	------------	------------	------------

---

<b>13° C</b>	0.067	0.067	0.8125
<b>25° C</b>	0.067	0.799	0.125
<b>37° C</b>	0.866	0.133	0.0625

---

Tabla 5. Distribución de probabilidad condicional entre CO<sub>2</sub> a 3 m y CO<sub>2</sub> a 1m.

---

<b>CO<sub>2</sub> 3m / CO<sub>2</sub> 1m</b>	<b>245 ppm</b>	<b>323 ppm</b>	<b>400 ppm</b>
<b>300 ppm</b>	0.866	0.067	0.0625
<b>375 ppm</b>	0.067	0.866	0.0625
<b>450 ppm</b>	0.067	0.067	0.875

---

Este análisis muestra que la velocidad de flujo de aire no afecta las otras variables cuando la velocidad del aire es baja, ya que no promueve un intercambio de calor, como se muestra en la Figura 9. Esto coincide con estudios previos de Rico-García et al. (2008), Majdoubi et al. (2009) y Chow y Hold (2010). Mientras que las concentraciones de CO<sub>2</sub> situados a 1 m y 3 m son directamente proporcionales, el CO<sub>2</sub> a 3 m es inversamente proporcional a la temperatura del aire a 3 m, y del mismo modo la Humedad a 1 m.

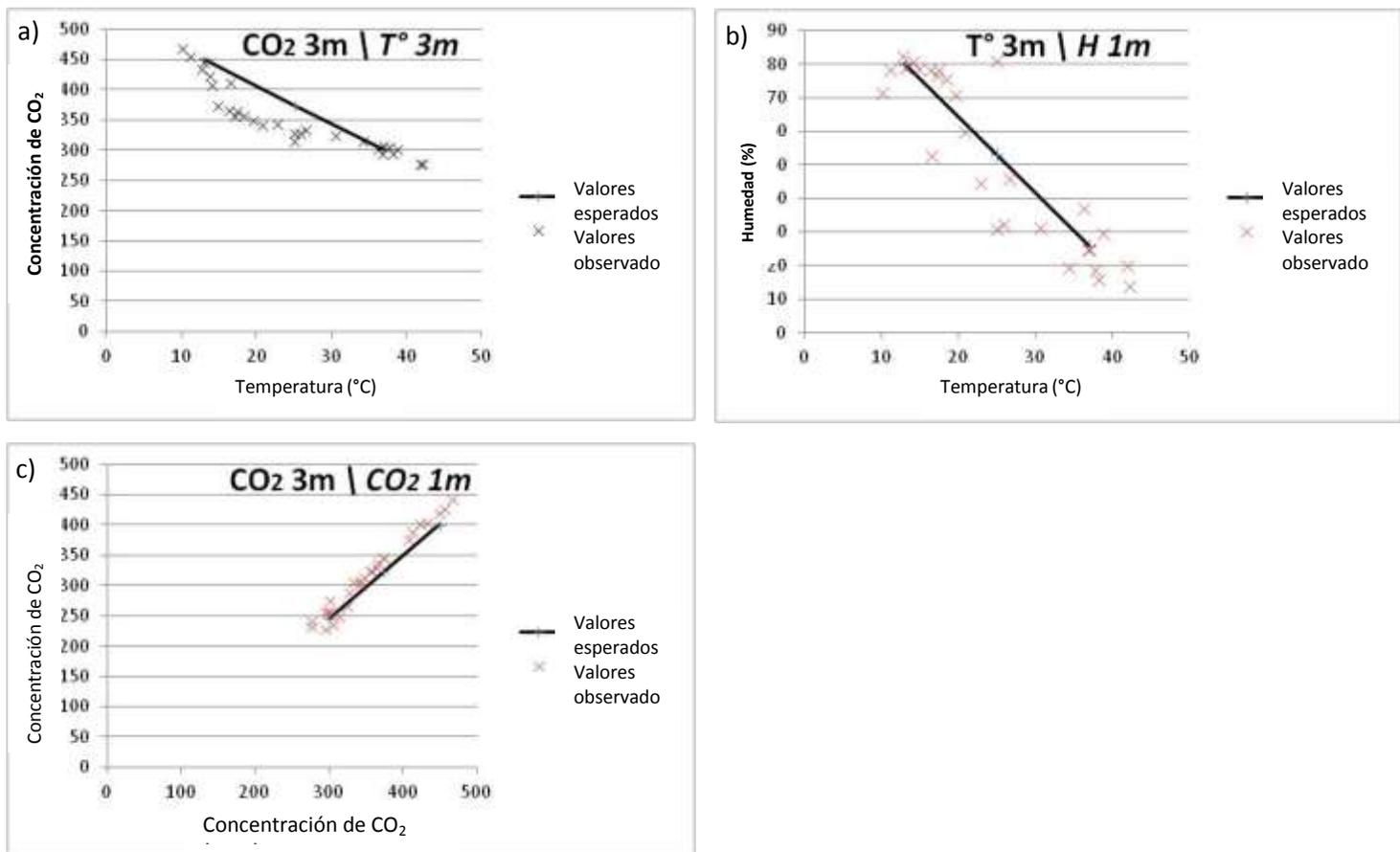


Figura 9. Comparación de los datos esperados contra los datos observados:

a) CO<sub>2</sub> 3m| T 3m, b) T 3m| H 1m y c) CO<sub>2</sub> 3m| CO<sub>2</sub> 1m.

Las concentraciones de CO<sub>2</sub> a 1 y 3 m están estrechamente relacionadas, tanto en la noche como en el día, el CO<sub>2</sub> a 1 m funciona como una fuente de CO<sub>2</sub> que incrementa su valor a 3 m elevándose rápidamente por encima del cultivo por diferencia de densidad. Durante el día, el cultivo consume CO<sub>2</sub> inicialmente a 1 metro, y el incremento en la temperatura hace que el CO<sub>2</sub> se vuelva menos denso y pasa a las capas superiores. No sucede lo mismo con la temperatura y la humedad, ya que tienen un comportamiento variable en el día y por la noche sobre 1 y 3 m, con una temperatura más alta en el día y una menor humedad en 1 m que a 3 m. Por la noche, estas relaciones se invierten, como se muestra en la Figura 9

(19:00 - 07:00). La relación inversamente proporcional del CO<sub>2</sub> y la humedad con la temperatura a 3 m muestra que esta variable es la de mayor importancia, ya que su variación provoca cambios en otras variables tanto de día como de noche. Siendo la humedad a 1 m la variable más sensible.

#### 4.4 Análisis y discusión de las Redes Bayesianas aplicadas a períodos de tres horas a lo largo de las 24 hrs del día

El conjunto de datos fue analizado en intervalos de tres horas, como se muestra en la Figura 10, encontrando las siguientes relaciones entre las variables:

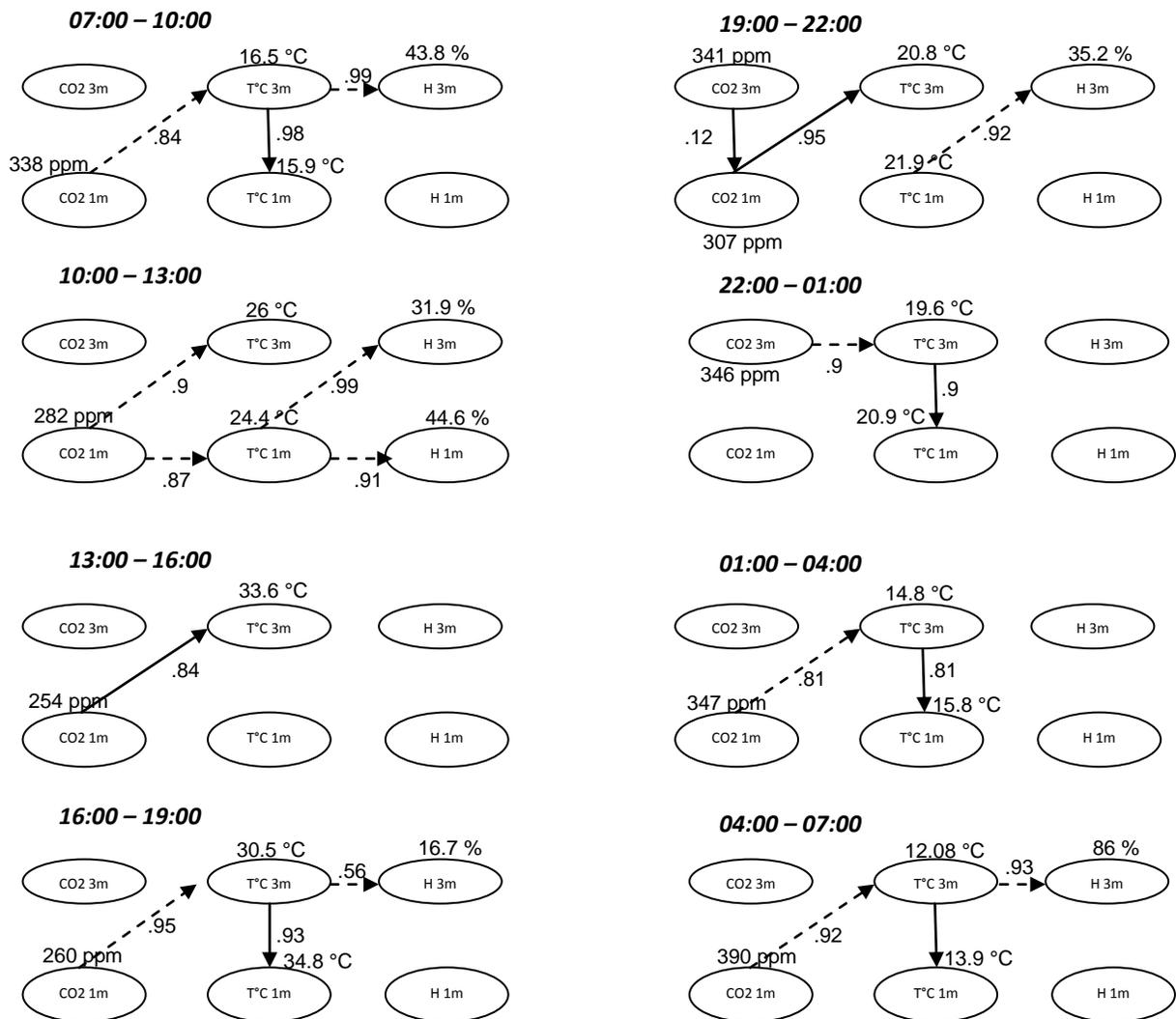


Figura 10. Red Bayesiana para periodos de tres horas en un día. Concentración de CO<sub>2</sub> a 3 m (CO<sub>2</sub>\_A), concentración de CO<sub>2</sub> a 1 m (CO<sub>2</sub>\_B), temperatura del aire a 3 m (T°C\_AD), temperatura del aire a 1 m (T°C\_BD), humedad relativa a 3 m (H\_AD), humedad a 1 m (H\_BD). La línea continua indica una relación directa y la línea punteada indica una relación inversa.

07:00-10:00. La temperatura del aire a 3 m aumenta influyendo sobre la zona de cultivo, sobre la humedad del aire a 3 metros y la concentración de CO<sub>2</sub> a 1 m, las cuales disminuyen cuando la temperatura del aire aumenta y calienta las capas inferiores a 1 m (T ° C\_BD ).

10:00-13:00. La concentración de CO<sub>2</sub> a 1 m (CO<sub>2</sub>\_B) disminuye debido al aumento en la temperatura del aire y la actividad fotosintética. La humedad del aire a 3 m muestra una relación directa con la humedad a 1 m, que disminuye por el incremento de la temperatura. La concentración de CO<sub>2</sub> a 3 m disminuye su valor, pero no bajo la influencia de la temperatura dentro del invernadero, posiblemente debido a la ventilación.

13:00-16:00. La temperatura máxima y valores mínimos de humedad del aire y el CO<sub>2</sub> se alcanzó en el interior del invernadero en este período. La concentración de CO<sub>2</sub> a 1 m (CO<sub>2</sub>\_B) muestra influencia directa con la temperatura del aire de 3 m (T°C\_AD) lo cual es indicativo de la suspensión en la fotosíntesis por sobre calentamiento.

16:00-19:00. Baja la temperatura del aire y la fotosíntesis de la plantas se expresa una vez más en la relación inversa entre el CO<sub>2</sub> a 1 metro (CO<sub>2</sub>\_B) y la temperatura del aire de 3 m (T°C\_AD). De forma inversa al período entre las 7:00 a 10:00, cuando la temperatura del aire a 3 m disminuye, la temperatura del aire a 1 m (T C\_BD °) también reduce sus valores desde este punto hasta el amanecer del día siguiente. La humedad del aire comienza a incrementarse.

19:00-22:00. El sol se oculta y las plantas paran la fotosíntesis, lo cual se expresa mediante la relación inversa entre la temperatura del aire a 3 m (T°C\_AD), y el CO<sub>2</sub> a 1m (CO<sub>2</sub>\_B) el cual se incrementa por la respiración de las plantas,

aumenta la concentración de CO<sub>2</sub> a 3 m (CO<sub>2</sub>-A). La temperatura del aire a 1 m (T°C\_B) es mayor que a 3 m (T°C\_A), y por lo tanto disminuye, presentando relación inversa con la humedad del aire a 3 m (H\_AD), la cual aumenta.

22:00-01:00. La tendencia es similar al período anterior, sin embargo la concentración de CO<sub>2</sub> en 1 m muestra la relación inversa con la temperatura del aire en 3 m debido a la respiración.

01:00-04:00. El CO<sub>2</sub> a 1 m muestra la relación inversa con la temperatura del aire en 3 m debido a la respiración.

04:00-07:00. En este punto, se han logrado mayores niveles de concentración de CO<sub>2</sub>, la humedad del aire y disminuye la temperatura del aire. Al final de este período se tiene la mayor diferencia en la humedad del aire a los 3 m y a 1 m. Se registra la temperatura más baja a 3 m, mostrando relación inversa con el mayor nivel de humedad a 1 m, lo que sugiere que la humedad sube por efecto de la respiración del cultivo.

#### **4.5 Modelo de Red Bayesiana de Radiación, Velocidad del flujo de aire y Temperatura a partir del modelo CFD**

Se obtuvo un modelo de Redes Bayesianas a partir de 4200 mediciones de datos de temperatura, radiación solar y velocidad del flujo de aire, de un modelo CFD, en intervalos de 500 W a 2300 W de radiación solar, 0 a 1.1 m/s de velocidad del flujo de aire y 15°C a 58°C de temperatura, cuyas inferencias se muestra en la Figura 11.

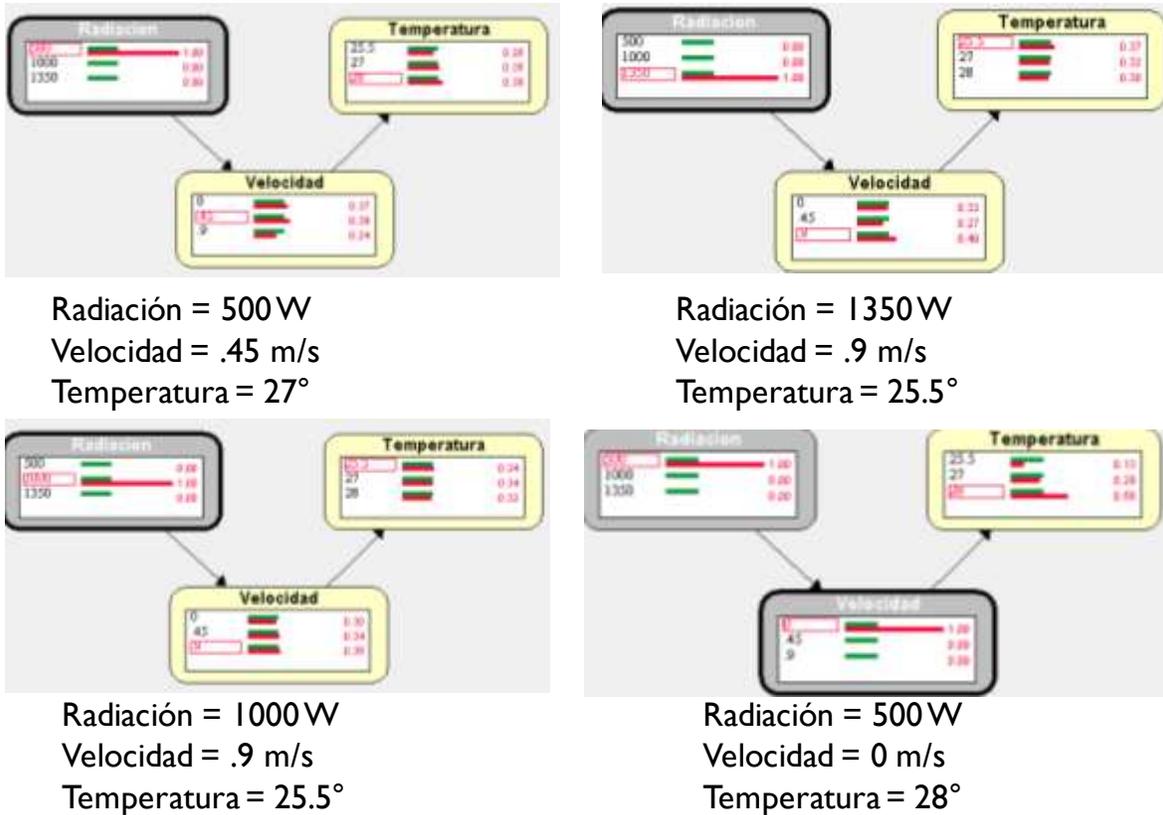


Figura 11. Cálculo de inferencias más importantes sobre el modelo de Red Bayesiana a partir de datos del modelo CFD.

En el modelo de Red Bayesiana se muestran las relaciones entre las variables estudiadas, observándose una relación directamente proporcional entre la radiación solar y la velocidad del flujo de aire, así como una relación inversamente proporcional entre la velocidad del flujo de aire y la temperatura.

Cuando la radiación solar es igual a 500 W, la velocidad del flujo de aire es igual a .45 m/s y la temperatura es igual a 28°C con una probabilidad del 36%. Conforme la radiación solar aumenta hasta alcanzar 1350 W, la velocidad del flujo de aire aumenta hasta 0.9 m/s y la temperatura baja a 25.5°C con probabilidades del 40% y 37% respectivamente. Esto indica que las variaciones en la radiación solar influyen en la velocidad del flujo de aire y ésta a su vez a la temperatura.

Cuando la velocidad del flujo de aire es igual a cero, la radiación solar es igual a 500 W con una probabilidad del 100% y la temperatura es de 28°C con una probabilidad del 58%. Al incrementar la velocidad del flujo de aire hasta alcanzar 0.9 m/s, la radiación solar es igual a 1350 W y la temperatura desciende hasta los 15°C con similares valores de probabilidad. Esto indica que la velocidad del flujo de aire es la variable de mayor influencia al interior del invernadero cuando ésta es de 0.9 m/s.

Es necesario realizar un estudio más detallado de los modelo CFD analizados mediante Redes Bayesianas, tomando en cuenta otros métodos de aprendizaje de máquina que permitan realizar una comparación, así como incorporar otras variables como humedad y concentración de CO<sub>2</sub>.

#### **4.6 Relación entre la temperatura y la concentración de CO<sub>2</sub> y humedad a partir del modelo CFD**

Para 1 y 3 m por encima y por dentro del cultivo, la relación entre la temperatura, la concentración de CO<sub>2</sub> y la humedad, se comporta como dos sistemas diferentes, a 1 m de altura en el espacio del cultivo, estas variables están retrasadas en el tiempo con respecto a las mismas a 3 m. El cultivo actúa amortiguando los cambios de las variables, lo que retrasa el efecto de la temperatura. En el espacio de pasillo, la concentración de CO<sub>2</sub> es menor que en el espacio del cultivo debido al efecto de la respiración vegetal.

Al interior de los invernaderos, la mayor temperatura alcanzada se realiza entre las 13:00 y 16:00 horas en cualquier época del año y cualquier etapa del cultivo. En esta condición, se alcanzan los valores más bajos de humedad y concentración de CO<sub>2</sub> en el aire, como se muestra en la Figura 12. De manera inversa, la menor temperatura se alcanza en el momento del amanecer, coincidiendo con los valores más altos tanto de humedad como de concentración

de CO<sub>2</sub> en el aire.

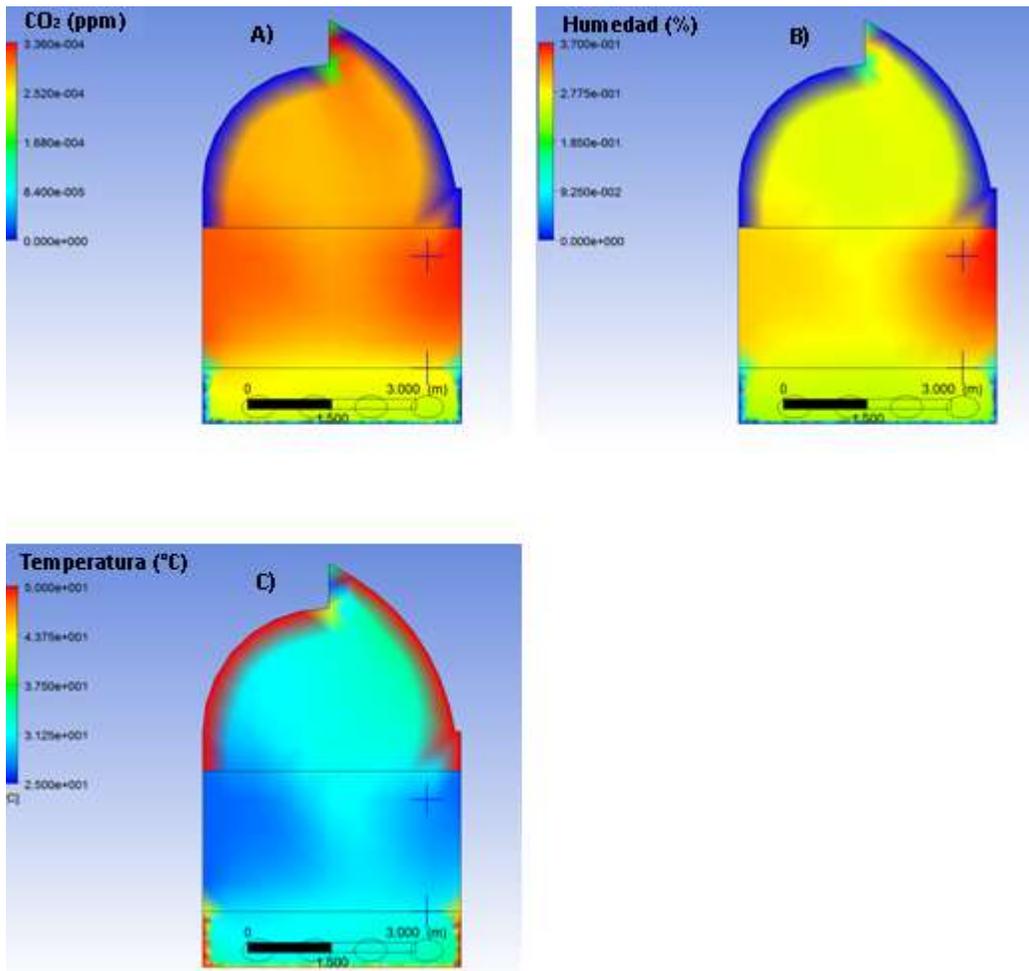


Figura 12. Resultados del modelo CFD del invernadero experimental Ie03: A) Concentración de CO<sub>2</sub> (ppm), B) Humedad (%) y C) Temperatura (°C).

Los valores de la humedad y concentración de CO<sub>2</sub> se invierten cuando aumenta la temperatura, formándose gradientes en el espacio del cultivo, por encima de este, y en los pasillos. Sin embargo tales gradientes son mayores en el espacio del cultivo debido al efecto del estancamiento del flujo de aire. Las

concentraciones de CO<sub>2</sub> y humedad son más bajos cuando la temperatura es más alta, mostrando un comportamiento descrito por las ecuaciones de la Tabla 6.

Tabla 6. Relación entre Humedad, concentración de CO<sub>2</sub> y Temperatura.

	Distancia del suelo	Humedad	Concentración de CO <sub>2</sub>
Cultivo inmaduro	1 m	$H = -2.40T + 105, r^2 = 0.90$	$CO_2 = -4.03T + 407, r^2 = 0.88$
	3 m	$H = -2.25T + 100, r^2 = 0.89$	$CO_2 = -2.39T + 383, r^2 = 0.86$
Cultivo maduro	1 m	$H = -2.50T + 130, r^2 = 0.97$	$CO_2 = -5.26 T + 436, r^2 = 0.81$
	3 m	$H = -2.62T + 121, r^2 = 0.97$	$CO_2 = -4.11T + 442, r^2 = 0.81$
Pasillos	1 m	$H = -3.23T + 131, r^2 = 0.94$	$CO_2 = -3.41T + 385, r^2 = 0.96$
	3 m	$H = -2.80T + 128, r^2 = 0.95$	$CO_2 = -2.69T + 404, r^2 = 0.90$

La pendiente de las líneas muestran la variabilidad de la humedad y concentración de CO<sub>2</sub> con respecto a la temperatura, la ordenada al origen es el valor hipotético de la temperatura cuando el valor de la humedad y concentración de CO<sub>2</sub> es igual a cero, y la abscisa al origen es el valor de la humedad y CO<sub>2</sub> cuando la temperatura es igual a cero. Mientras mayor es la pendiente de la línea, el valor de la ordenada al origen es mayor, y la abscisa al origen disminuye. La pendiente de las rectas determina la estabilidad de las variables con respecto a la temperatura y por lo tanto la presencia o ausencia de gradientes.

Las mayores pendientes corresponden a las variables medidas a 1 m, y cuando el cultivo está maduro. Mientras que las pendientes menores corresponden a las variables medidas a 3 m, y cuando el cultivo está inmaduro. Las pendientes de las líneas son similares cuando la humedad y la concentración de CO<sub>2</sub> fueron medidas a 1 m, y cuando el cultivo está incipiente, con respecto a cuando se miden en 3 m y con un cultivo maduro. Los gradientes de humedad y

concentración de CO<sub>2</sub> en los pasillos son similares a los medidos con cultivo incipiente, pero la ordenada al origen es diferente debido a la ausencia del cultivo.

El gradiente de la concentración de CO<sub>2</sub> en 1 m es -5.26 ppm / 1 ° C cuando el cultivo está maduro, debido a que contiene una mayor cantidad de biomasa, por lo tanto la respiración y la fotosíntesis son mayores. Esto no ocurre en los pasillos en ausencia del cultivo, el cual permite una menor diferencia entre la pendiente de la recta a 1 m (-3.41 ppm / ° C) y 3 m (-2.69 ppm / ° C), lo cual origina un gradiente menor. En un cultivo maduro, se requiere una menor cantidad de calor para la disminución de la concentración de CO<sub>2</sub>, ya que éste se consume en el proceso de fotosíntesis, alcanzando valores cercanos a 200 ppm entre las 13:00 y 16:00 hrs. Además, otro factor que determina un mayor gradiente en la concentración de CO<sub>2</sub> en el cultivo es aire estancado debido a la densidad de la biomasa.

Según Nisen et al. (1988), en la mayoría de las especies de plantas cultivadas en invernaderos, disminuye la tasa de fotosíntesis a temperaturas superiores a 30° C y se suspende completamente al llegar a 40° C. Basándose en los resultados obtenidos en este estudio, las temperaturas máximas alcanzadas en el interior del invernadero superan los 45° C, sin embargo por encima de 40° C, la concentración de CO<sub>2</sub> continúa disminuyendo incluso cuando no hay actividad fotosintética. Este comportamiento en la concentración del CO<sub>2</sub> se produce en ambos: el espacio de cultivo y en los pasillos y cuando el cultivo está incipiente, lo que sugiere que es independiente de la actividad fotosintética.

El mayor efecto de la presencia del cultivo dentro del invernadero se da durante el proceso de respiración, alcanzando su clímax al amanecer cuando se presentan las temperaturas más bajas. Durante las horas más calurosas del día hay menos distinción entre el comportamiento del CO<sub>2</sub> en presencia y ausencia del cultivo. Las mejores condiciones de humedad y CO<sub>2</sub> se dan desde el amanecer hasta las 11:00 horas, por lo que es aconsejable tratar de mantenerlos.

Por otro lado, se observa una menor diferencia entre la humedad en presencia del cultivo incipiente y el cultivo maduro, pero la ordenada al origen es significativamente mayor con el cultivo maduro que en los pasillos. La presencia de un cultivo maduro promueve el desarrollo de condiciones estables de interior de un invernadero.

#### 4.7 Bondad de ajuste del modelo CFD

La bondad de ajuste consistió en verificar la exactitud y validez de los resultados dados por el modelo CFD. La bondad de ajuste se realizó con un conjunto de datos diferente al de las variables utilizadas en el modelo desarrollado; la primera se midió entre 22 a 25 de agosto y que corresponde a la definición de las condiciones de contorno y los valores iniciales del modelo, el segundo conjunto de datos variables obtenido se entre el 18 al 21 de agosto para calcular la prueba de significancia mediante un análisis de regresión lineal de las relaciones entre humedad y CO<sub>2</sub> con respecto a la temperatura, bajo condiciones climáticas similares. Los resultados se muestran en la Figura 13.

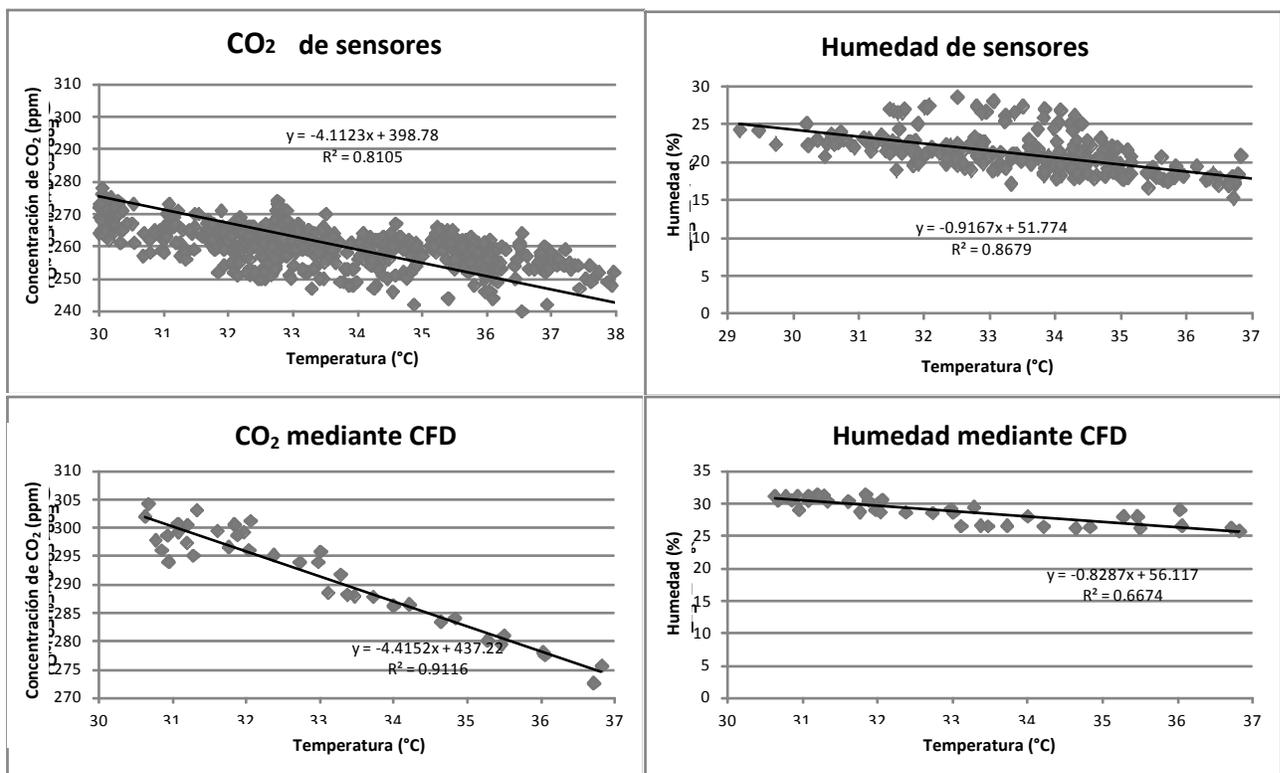


Figura 13. Bondad de ajuste del modelo CFD mediante las relaciones entre la humedad y concentración de CO<sub>2</sub> con respecto a la temperatura.

La Figura 13 muestra cómo es la relación entre la concentración de CO<sub>2</sub> y la humedad, con respecto a la temperatura en el modelo CFD en comparación con el conjunto de datos obtenido de las mediciones mediante sensores dentro del invernadero. La regresión lineal muestra que tanto la concentración de CO<sub>2</sub> y humedad en el modelo CFD son similares con el conjunto de medidas de datos; con 5% de diferencia en la ordenada al origen en la ecuación de la humedad, y 39 ppm en la ecuación de la concentración de CO<sub>2</sub>. Las pendientes de las ecuaciones en ambos casos son muy similares también. Esto indica que la aproximación por el modelo CFD es correcta.

#### **4.8 Bondad de ajuste de modelo CFD utilizando Redes Bayesianas**

La bondad de ajuste consistió en verificar la exactitud y validez de los resultados dados por el modelo CFD. Comúnmente, la bondad de ajuste se realizó en un conjunto de datos diferente de las variables utilizadas en el modelo desarrollado. En este trabajo, el proceso de bondad de ajuste consistió en la comparación con dos modelos de Redes Bayesianas, la primera se desarrolló a partir del conjunto de datos medidos mediante los sensores dentro del invernadero, y el segundo modelo de Redes Bayesianas se obtuvo mediante un conjunto de datos generado por el modelo CFD.

El primer modelo de Redes Bayesianas se obtuvo a partir de 2000 mediciones de datos de los sensores y el segundo modelo de Redes Bayesianas se obtuvo de 4200 mediciones de datos del modelo CFD. Ambos modelos se compararon y sus inferencias se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Comparación de las inferencias entre los datos medidos y los obtenidos

a partir del modelo CFD.

	Temperatura	CO <sub>2</sub>	P(CO <sub>2</sub>  T°)	Humedad	P(H T°)	
modelo CFD	34.0 °C	1.00	233 ppm	0.77	24.0 %	0.74
Datos de campo	33.3°C	1.00	240 ppm	0.88	17.4 %	0.88

En ambos modelos de Redes Bayesianas, las variables se discretizaron en tres intervalos. Se tuvo en cuenta la temperatura más alta para obtener las probabilidades condicionales de la concentración de CO<sub>2</sub> y humedad. Los valores de las variables con respecto a la temperatura para los dos modelos de Redes Bayesianas son muy similares, lo que indica que los valores obtenidos a partir del modelo CFD son correctamente aproximados a los valores obtenidos por mediciones en el interior del invernadero. Las inferencias calculadas por los modelos de Redes Bayesianas para ambos: las mediciones de sensores y los datos obtenidos a partir del modelo CFD son similares en la temperatura y la concentración de CO<sub>2</sub>.

Los coeficientes de correlación indican en qué medida la concentración de CO<sub>2</sub> y humedad son inversamente relacionadas con la temperatura, tanto en las mediciones de campo como en los datos obtuvieron a partir del modelo CFD, como se muestra en la Tabla 8. Esto indica que el modelo CFD se comporta adecuadamente y apegado a la realidad.

Tabla 8. Coeficientes de correlación entre la concentración de CO<sub>2</sub> y la humedad con respecto a la temperatura.

Coeficiente de Correlación	Temperatura CO <sub>2</sub>	Temperatura Humedad
Modelo CFD	-0.98057339	-0.96686119

Aunque el análisis de correlación de variables es un método probabilístico, que indica el grado en que dos variables están relacionadas, el modelo de Redes Bayesianas que muestra las relaciones entre las variables se pueden utilizar para muchas variables al mismo tiempo. Del mismo modo, el modelo de Redes Bayesianas puede mostrar grados de independencia en las variables que no muestra el análisis de correlación lineal.

Comparando los resultados de la Tabla 8, se observa que las probabilidades condicionales de CO<sub>2</sub> y la humedad con respecto a la temperatura son menores que los valores de correlación de la Tabla 7. Esto indica que aunque el modelo CFD está correctamente validado basado en el análisis de correlación lineal, los modelos de Redes Bayesianas muestran que el modelo CFD puede ser más refinado para que se ajuste a los datos medidos en el interior del invernadero.

Las ventajas de utilizar modelos de Redes Bayesianas para ajustar un modelo CFD basado en este trabajo son: en comparación con otros métodos de bondad de ajuste es una técnica económica y consume poco tiempo y pocos recursos informáticos, aumentando la precisión, e incluyendo la incertidumbre mediante el cálculo de las inferencias y la cuantificar el grado de dependencia o independencia entre las variables estudiadas. Además de la posibilidad de utilizar conjuntos de datos incompletos, tanto para el modelo CFD como de las mediciones en el interior del invernadero. La principal desventaja es que se necesitan al menos dos variables medidas para establecer la relación entre ambas.

#### **4.9 Modelos CFD del espacio del cultivo.**

Se realizó la simulación de los modelos CFD para el espacio del cultivo

para el invernadero experimental le01, a tres diferentes alturas de la base del cultivo, así como del tutoreo, en dos condiciones diferentes del flujo de aire, con los camellones del cultivo perpendiculares al flujo de aire y con dichos camellones paralelos al flujo de aire. Las imágenes del modelo CFD se muestran en la Figura 14, y el resumen de las condiciones de frontera y valores iniciales se muestran en la Tabla 9. El análisis tomó en cuenta las variables: Temperatura, Humedad y concentración de CO<sub>2</sub>.

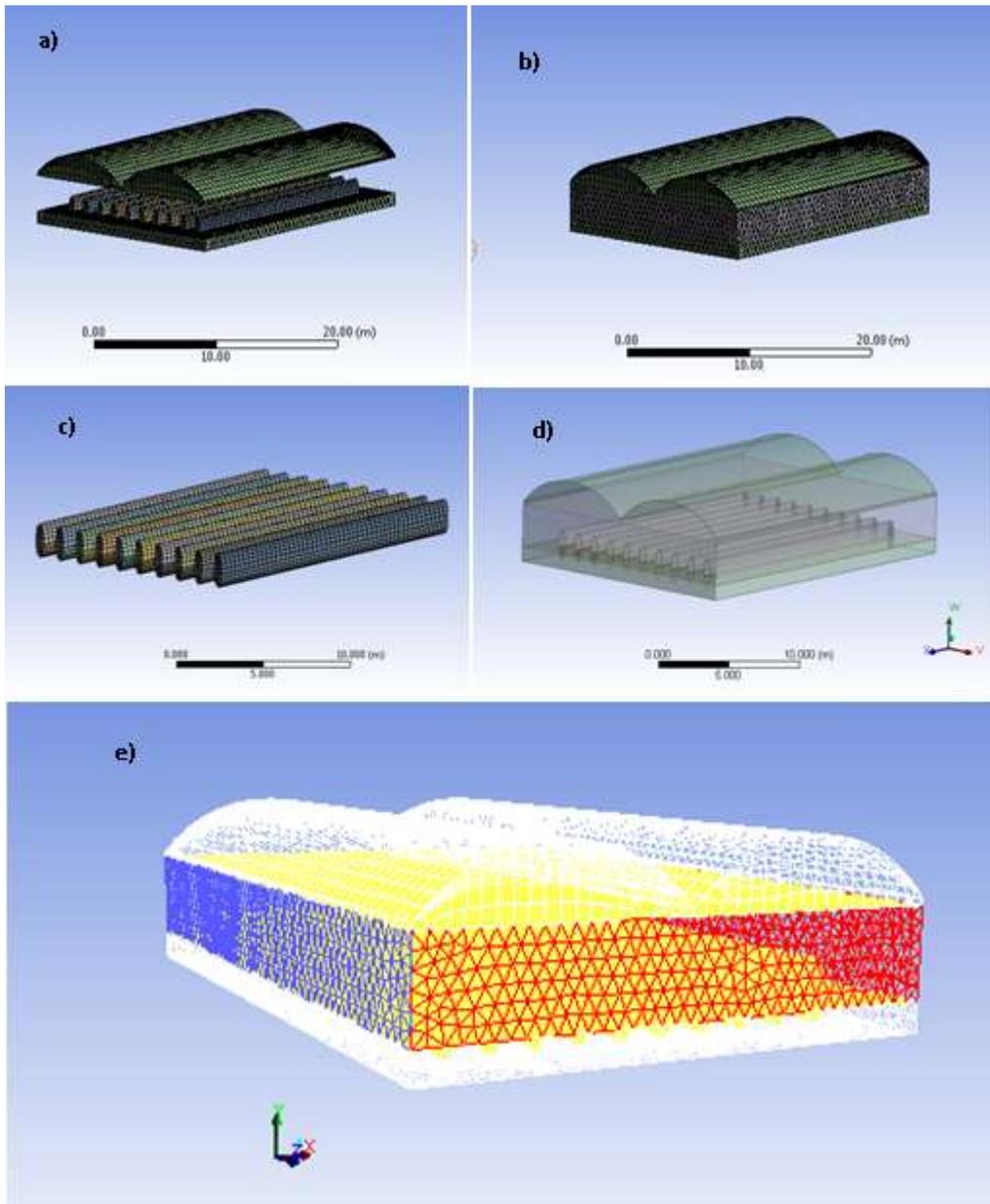


Figura 14. Modelo CFD del espacio del cultivo en el invernadero experimental le01: a) malla del cultivo, cubierta y base, b) malla del invernadero, c) malla del cultivo, d) geometría del invernadero y cultivo, e) modelo CFD-Fluent mostrando entrada de aire (azul) y salida de presión (rojo).

Tabla 9. Resumen de las condiciones de frontera y valores iniciales del modelo CFD del espacio del cultivo.

	DESCRIPCIÓN	MAGNITUD
	Simulación 3D	
Solución	Basado en presión y velocidad absoluta	
	Doble Precisión	
Tipo de modelo	Estado estacionario	
	Automatic Patch	
	Conforming/Sweeping	
Tipo de malla	Tamaño mínimo de elementos	0.15 m
	Tamaño máximo de elementos	3.05 m
	Número de elementos	650,801
	Métrica del mallado:	5.545567
	Skewness mínima	0.959830
	Skewness máxima	0.255454
	Skewness promedio	0.137146
Calidad de la malla:	Skewness D.E.	4.17269 e-02
	Mínima ortogonal	2.16302 e+02
	Relación de aspecto máxima	
	K-ε con flotabilidad	
	(2 ecuaciones)	
Viscosidad	C1-Epsilon	1.44
	C2-Epsilon	1.92
Ecuación de energía	activo	
Simulación del cultivo	Medio poroso	
	Velocidad de entrada	0.4 m s <sup>-1</sup>
	Energía cinética turbulenta	1.0 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Entrada del dominio	Relación de disipación turbulenta	1.0 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
	Temperatura del aire	27°C
	Concentración de CO <sub>2</sub>	0.0004 kg/m <sup>3</sup>
	Humedad Relativa	0.03 0.0004 kg/m <sup>3</sup>
	Presión de salida	
Salida del dominio	Energía cinética turbulenta de retorno	1.0 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
	Relación de disipación turbulenta	1.0 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>

de retorno

	Radiación solar directa		
	Radiación solar difusa	900 w/m <sup>2</sup>	
	Calculadora solar:	400 w/m <sup>2</sup>	
	Posicionamiento Global		
	Latitud		
Radiación solar	Longitud	100° 16'	
	Zona horaria	20° 42'	
	Fecha:	-6	
	Hora:	21/04	
	Método de radiación solar:	13:00	
	Máxima teórica		
Propiedades físicas de los materiales	Aire	Suelo	Polietileno
Densidad (kg m <sup>3</sup> )	1.22	1400	920
Calor específico ( J K <sup>-1</sup> °K <sup>-1</sup> )	1006.43	1738	1900
Conductividad térmica (W m <sup>-2</sup> k <sup>-1</sup> )	24.2 e-3	1.5	0.3
Coeficiente de expansión térmica °k <sup>-1</sup>	3.389 e-3		
Gases transportados por el aire	CO <sub>2</sub>	Vapor de agua	
Conductividad térmica	0.0454 w/m <sup>k</sup>	0.0454 w/m <sup>k</sup>	
Viscosidad	1.72 e-05 kg/m-s	1.72 e-05 kg/m-s	
Difusividad de masa	2.88 e-5 kg/m-s	2.88 e-5 kg/m-s	
Coeficiente de difusión térmica	-8e-06 t + 6 e-05 kg/m-s	-2.5 e-3 + 0.13 kg/m-s	

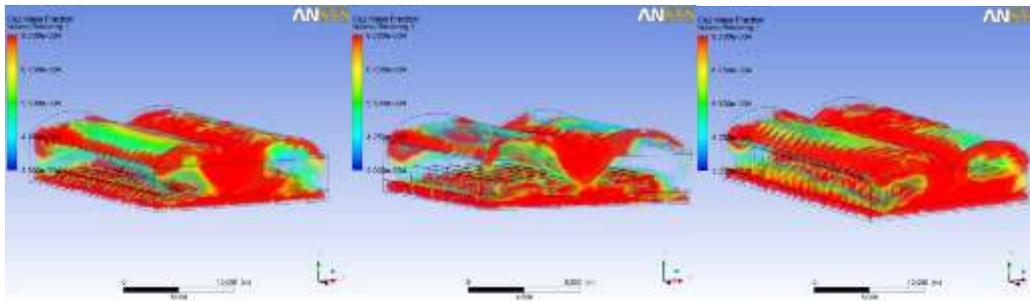
#### 4.9.1. Cultivo orientado perpendicularmente al flujo de aire.

Cuando el cultivo es orientado perpendicular al flujo de aire, la distribución del CO<sub>2</sub>, humedad y temperatura es heterogénea, ya que éste forma una barrera que evita que el aire fluya libremente a lo largo de los camellones.

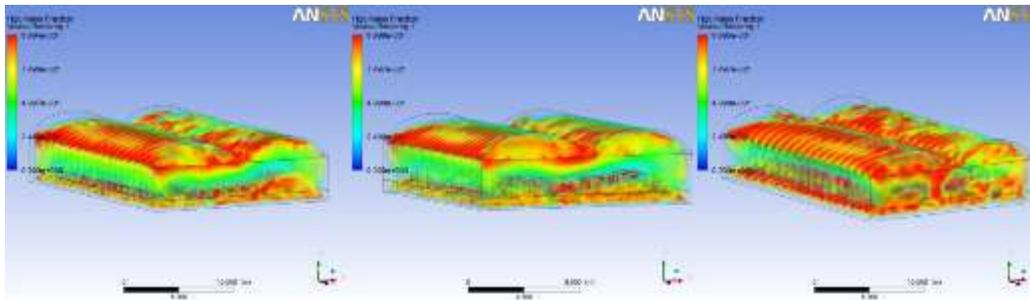
##### 4.9.1.1. Altura de la base del cultivo 0.15 m

Cuando la base del cultivo se encuentra cercana al suelo, provoca que el aire no fluya libremente por debajo del cultivo, originando estancamiento, como se muestra en la Figura 15.

a)



b)



c)

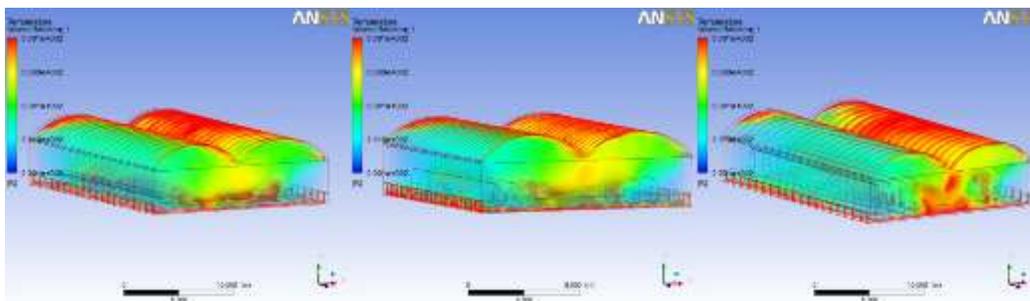
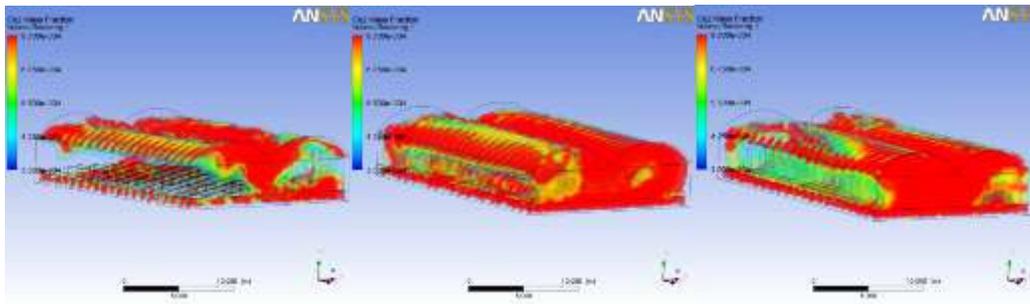


Figura 15. Cultivo perpendicular al flujo de aire con altura a la base de .15 m a) Concentración de CO<sub>2</sub>, b) Humedad y c) Temperatura.

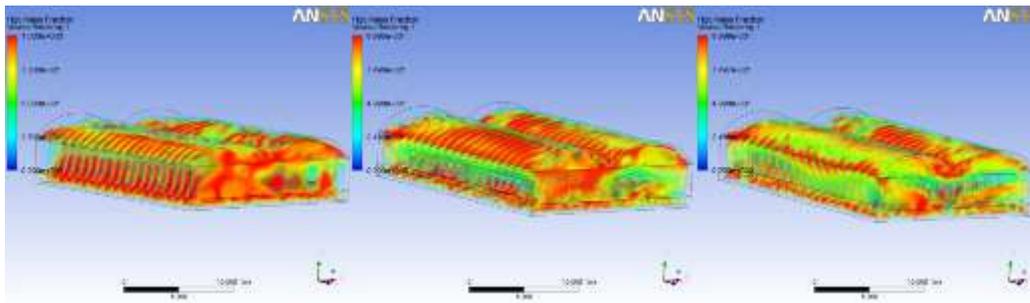
#### 4.9.1.2. Altura de la base del cultivo 0.5 m.

La altura de la base del cultivo a 0.5 m ayuda a obtener mejores condiciones ambientales, ya que forma un volumen que amortigua el calor reflejado por el suelo y permite que el flujo de aire circule por debajo del cultivo, evitando el efecto de estancamiento (Figura 16).

a)



b)



c)

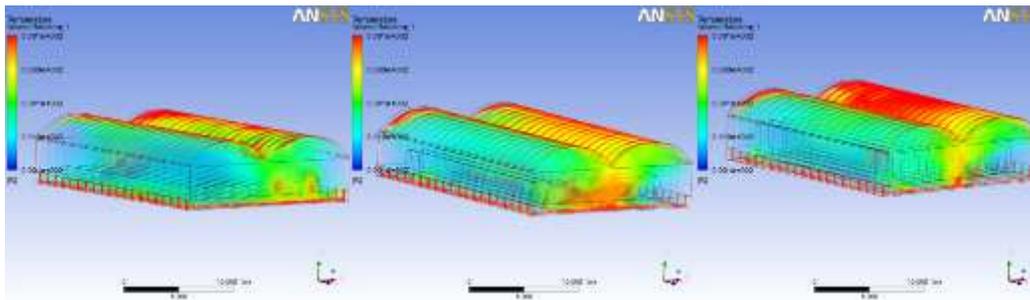


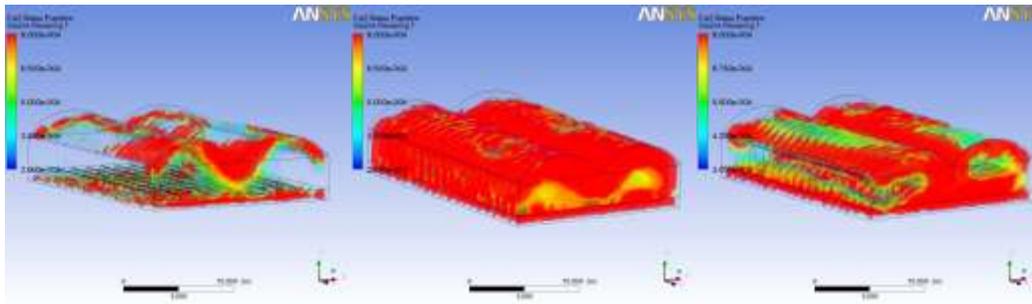
Figura 16. Cultivo perpendicular al flujo de aire con altura a la base de .5 m a) Concentración de CO<sub>2</sub>, b) Humedad y c) Temperatura.

#### 4.9.2. Cultivo orientado paralelamente al flujo de aire.

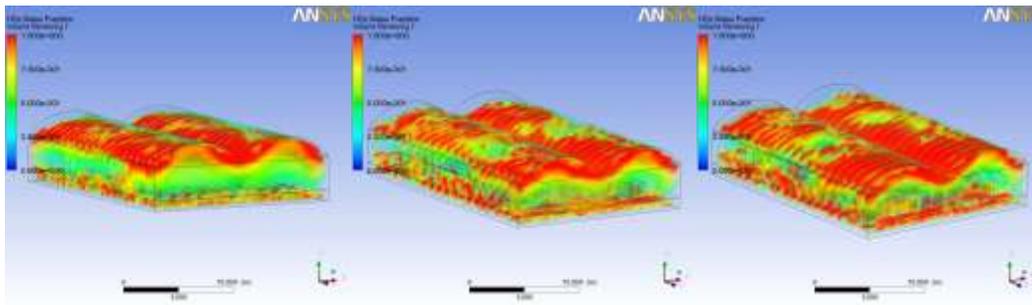
Cuando el cultivo es orientado paralelo al flujo de aire, la distribución de CO<sub>2</sub>, humedad y temperatura se observa homogéneo en relación a cuando es orientado perpendicularmente (Figuras 17 y 18).

##### 4.9.2.1. Altura de la base del cultivo 0.15 m

a)



b)



c)

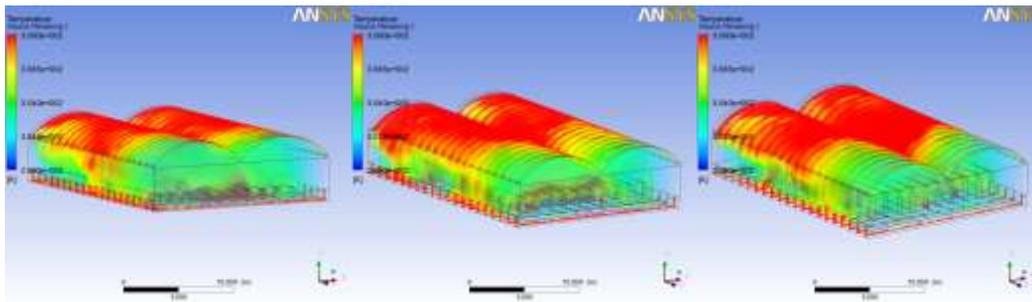
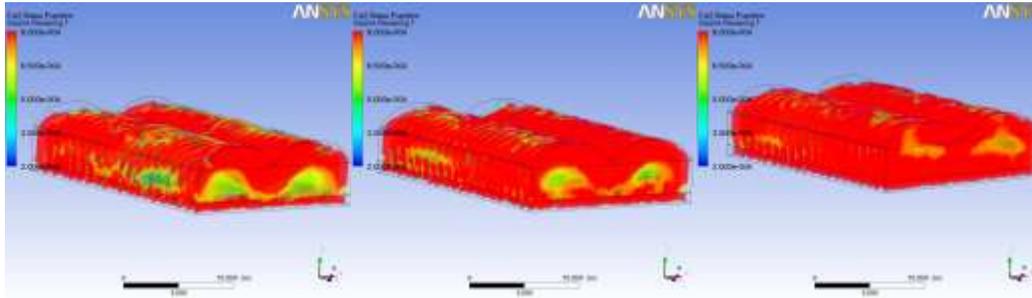


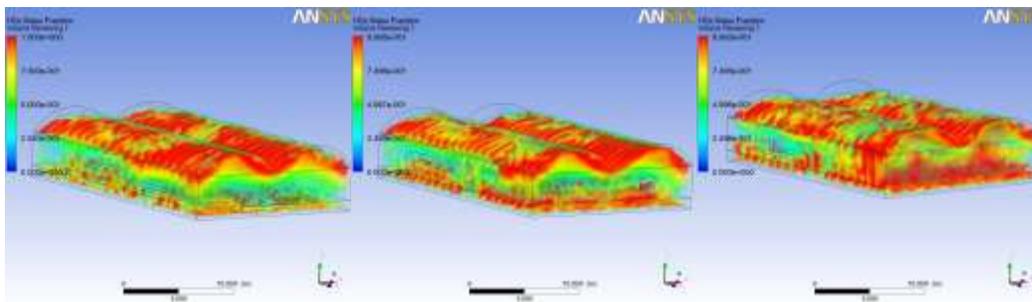
Figura 17. Cultivo paralelo al flujo de aire con altura a la base de .15 m a) Concentración de CO<sub>2</sub>, b) Humedad y c) Temperatura.

4.9.2.2. Altura de la base del cultivo 0.5 m

a)



b)



c)

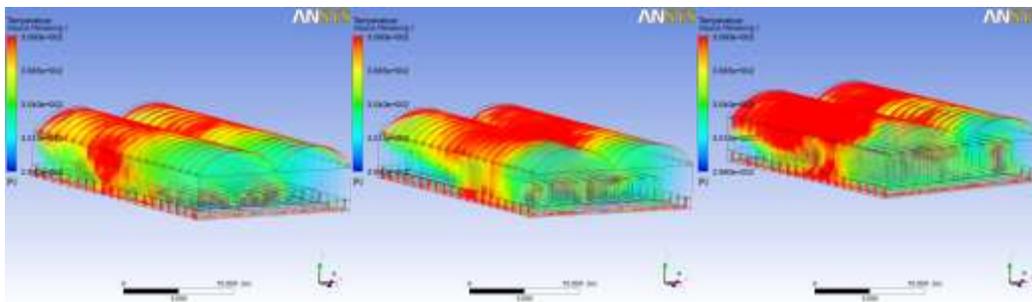


Figura 18. Cultivo paralelo al flujo de aire con altura a la base de .5 m a) Concentración de CO<sub>2</sub>, b) Humedad y c) Temperatura.

Tabla 10. Valores de CO<sub>2</sub>, Humedad y Temperatura a diferentes alturas del cultivo y flujos de aire.

PARALELO AL FLUJO DE AIRE	PERPENDICULAR AL FLUJO DE AIRE
---------------------------------	--------------------------------------

<i>Altura</i>	<i>CO<sub>2</sub></i> <i>(kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>H<sub>2</sub>O</i> <i>(%)</i>	<i>Temp</i> <i>(°C)</i>	<i>Altura</i>	<i>CO<sub>2</sub></i> <i>(kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>H<sub>2</sub>O</i> <i>(%)</i>	<i>Temp</i> <i>(°C)</i>
<b>1m</b>	0.000191	0.608	33.76	<b>1m</b>	0.000037	0.067	27.9
<b>2m</b>	0.001628	0.659	33.78	<b>2m</b>	0.000129	0.219	27.6
<b>3m</b>	0.000886	0.859	32.86	<b>3m</b>	0.000185	0.846	28.7
<b>1.5m</b>	0.001636	0.629	33.99	<b>1.5m</b>	0.000372	0.475	27.3
<b>2.5m</b>	0.001328	0.941	32.02	<b>2.5m</b>	0.000553	0.781	27.1
<b>3.5m</b>	0.001587	0.666	34.68	<b>3.5m</b>	0.000955	0.988	30.3
<b>Promedios</b>	0.001209	0.73	33.52		0.000372	0.56	28.15

## CO<sub>2</sub>

Las concentraciones más altas se observan cuando el cultivo es orientado paralelo al flujo de aire, con tutoreo a 1.5 m y altura de la base a .5m. Las concentraciones más pobres se observan cuando el cultivo es orientado perpendicularmente al flujo de aire a 1m de altura y 0.15 m de altura de la base. En promedio, se observa 4 veces más CO<sub>2</sub> cuando el cultivo es orientado paralelo al flujo de aire (Tabla 10).

## H<sub>2</sub>O

Como se muestra en la Tabla 9, las concentraciones más altas se observan cuando el cultivo es orientado perpendicular al flujo de aire, con tutoreo a 3.5 m y altura de la base a .5m. Las concentraciones más pobres se observan cuando el cultivo es orientado perpendicularmente al flujo de aire a 1m de altura y 0.15 m de altura de la base. En promedio, se observa más H<sub>2</sub>O cuando el cultivo es orientado paralelo al flujo de aire.

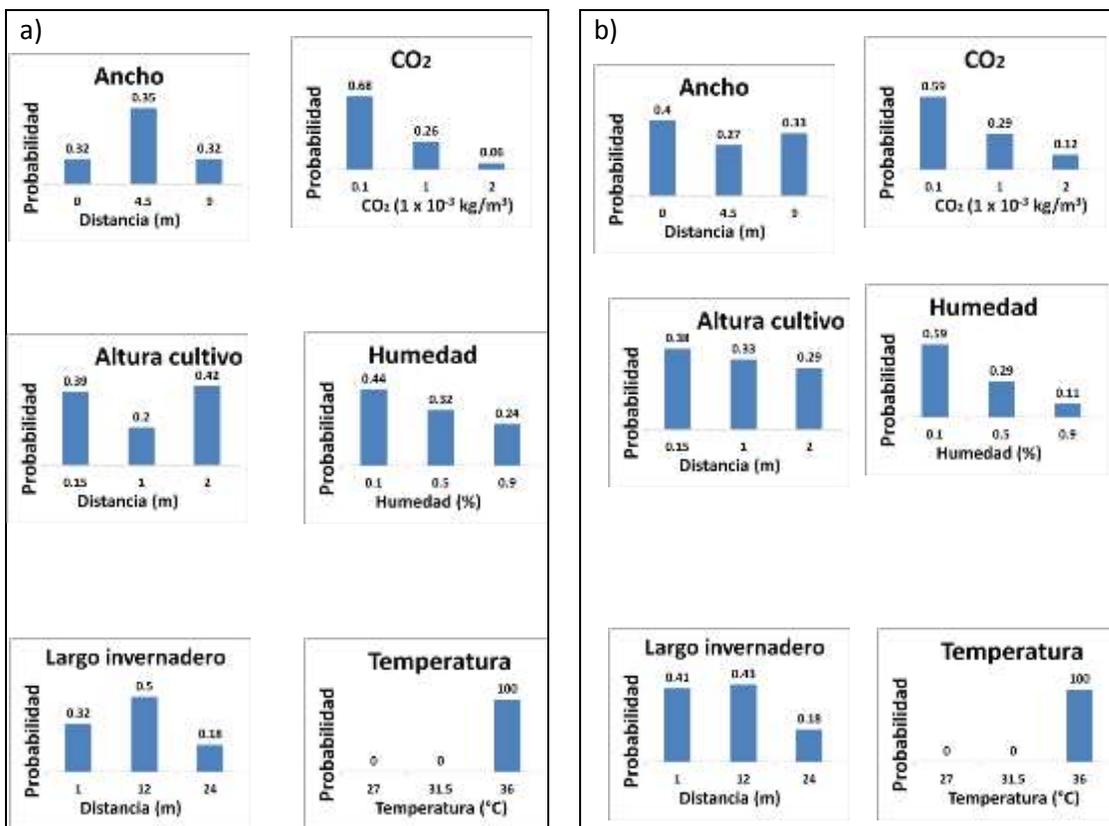
## Temperatura

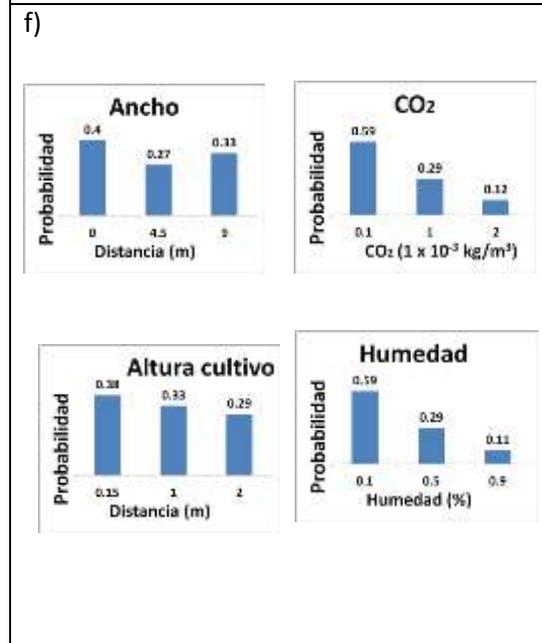
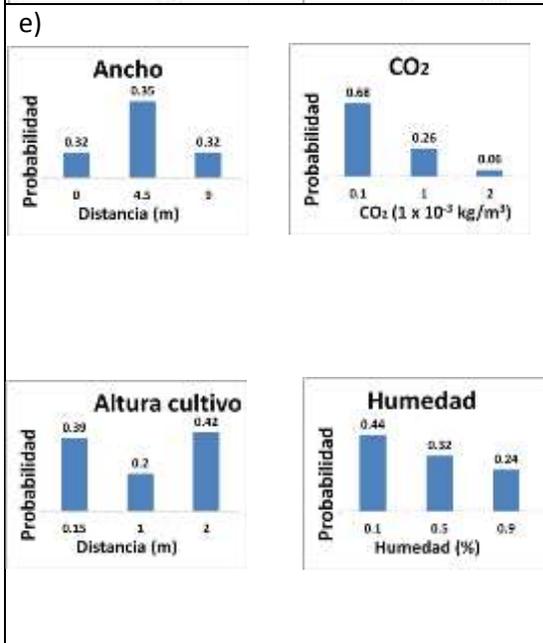
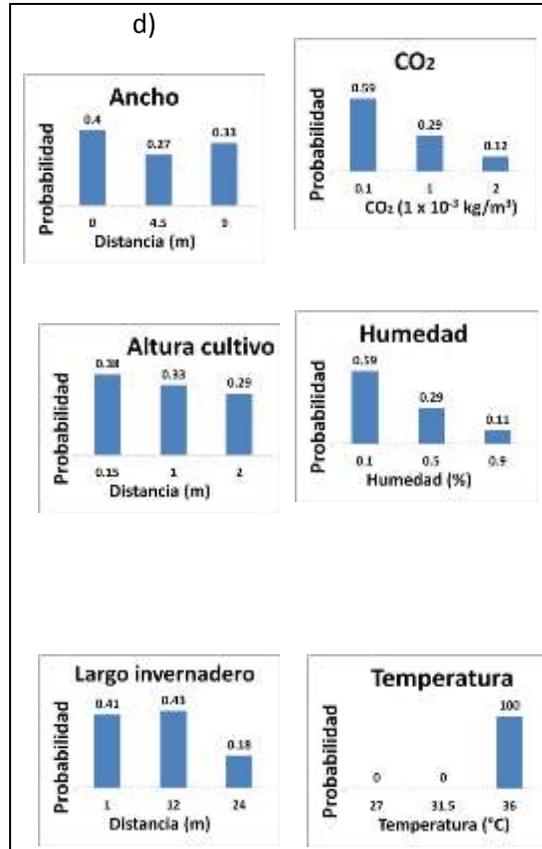
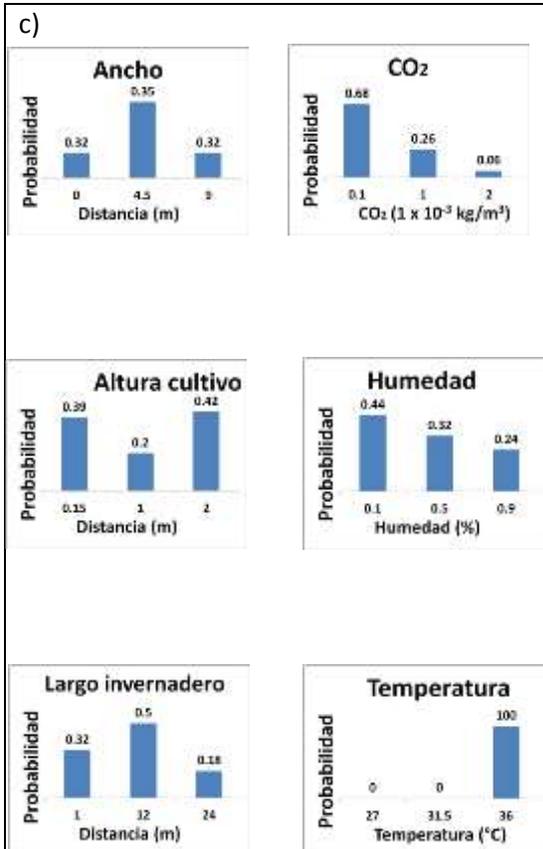
La Tabla 9 muestra que la temperatura más baja se observa cuando el cultivo es perpendicular al flujo de aire, con un tutoreo de 2.5 m y 0.5 m de altura de la base. La temperatura más alta se observa cuando el cultivo es paralelo al flujo de aire, con un tutoreo de 3.5 m y 0.5 m de altura de la base. En promedio se observan 4.4° más de temperatura cuando el cultivo es paralelo al flujo de aire.

Las mejores condiciones de concentración de CO<sub>2</sub> y humedad se dan cuando el cultivo se orienta paralelo al flujo de aire, con tutores a 3.5 m y 0.5 m de altura de la base, sin embargo esta configuración presenta la mayor temperatura.

#### 4.10 Redes Bayesianas aplicadas a los Modelos CFD del espacio del cultivo.

Se obtuvieron seis modelos de Redes Bayesianas a partir de los 33,610 mediciones de datos de temperatura, concentración de CO<sub>2</sub>, Humedad, altura del cultivo, y ubicación del cultivo al interior del invernadero, de los seis modelos CFD calculados en intervalos de 26°C a 37°C de temperatura, 0 a .002 kg/m<sup>3</sup> de concentración de CO<sub>2</sub> y 0.2 a 3.20 m de altura del cultivo, con el objetivo de determinar las condiciones críticas mediante relaciones entre las variables estudiadas y el espacio del cultivo, por medio de sus inferencias, las cuales se muestra en las Figuras 18 y 20.





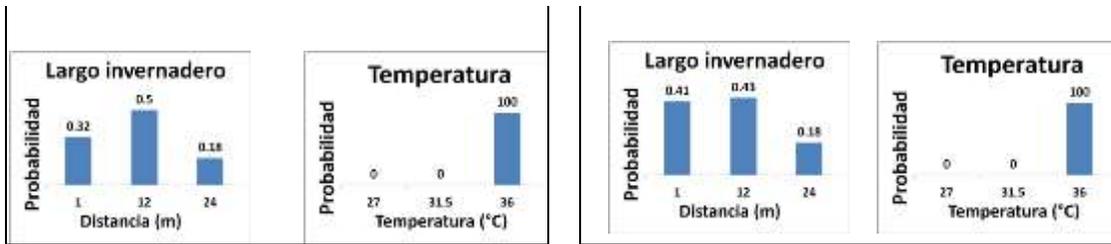
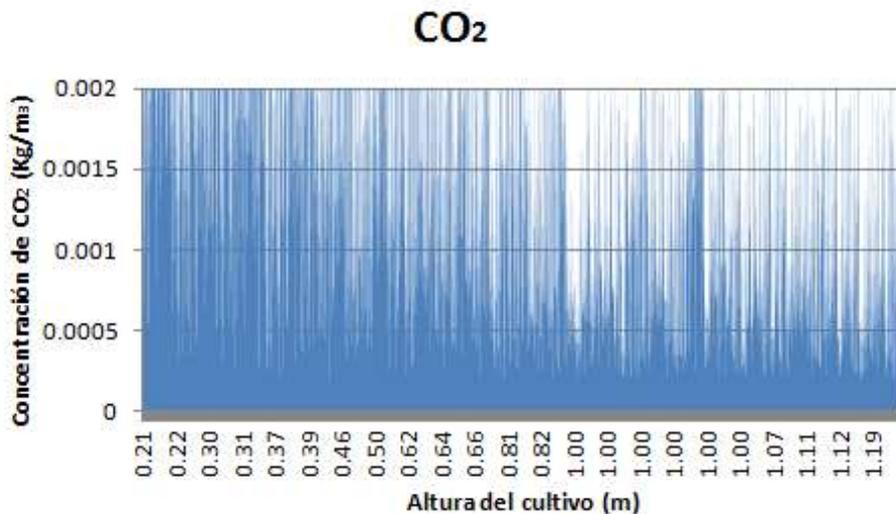


Figura 19. Cálculo de inferencias sobre el modelo de Red Bayesiana a partir de datos del modelo CFD para el invernadero le01 cuando el cultivo es orientado paralelo al flujo de aire a diferentes alturas: a) 1m, b) 1.5 m, c) 2m, d) 2.5 m, e) 3 m y f) 3.5 m.

- a) Cultivo a 1 m de altura: La concentración de CO<sub>2</sub> es inversamente proporcional a la altura del cultivo (Figura 19). La temperatura más alta (37°C) se da a 1 m en el centro del invernadero (6.4m, 15.4m), con humedad y concentración de CO<sub>2</sub> bajas (0% y 0 kg/m<sup>3</sup> respectivamente). La concentración de CO<sub>2</sub> más alta (0.002 kg/m<sup>3</sup>) se da a una altura del cultivo de 0.21 cm, con una temperatura de 27°C.



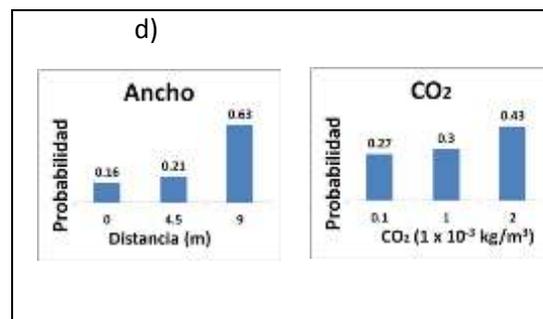
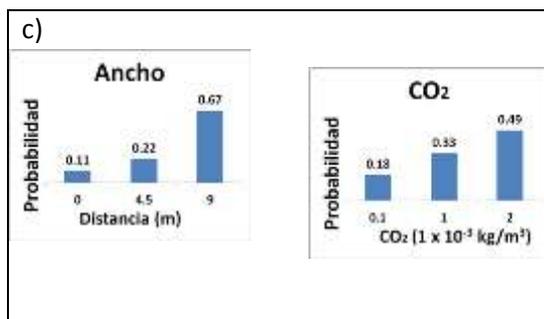
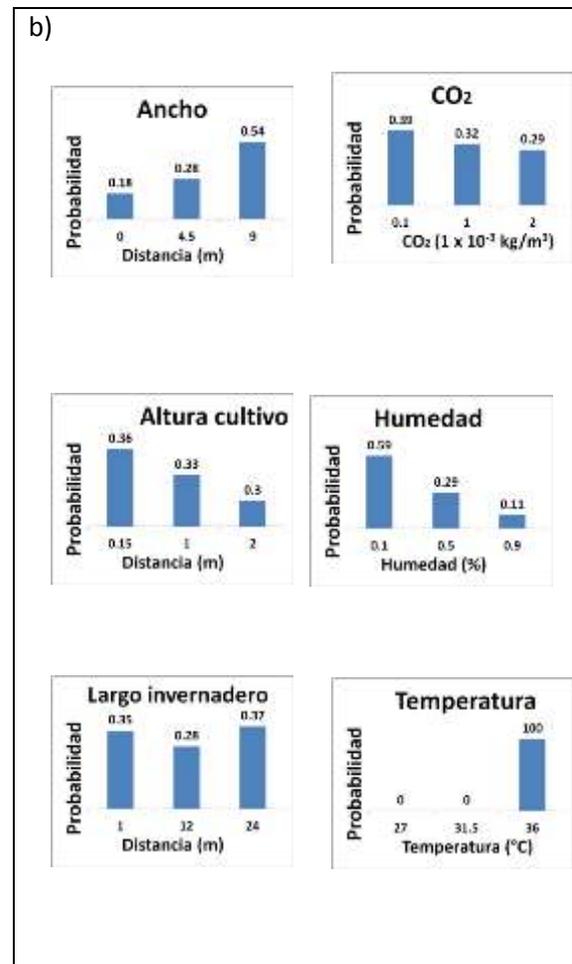
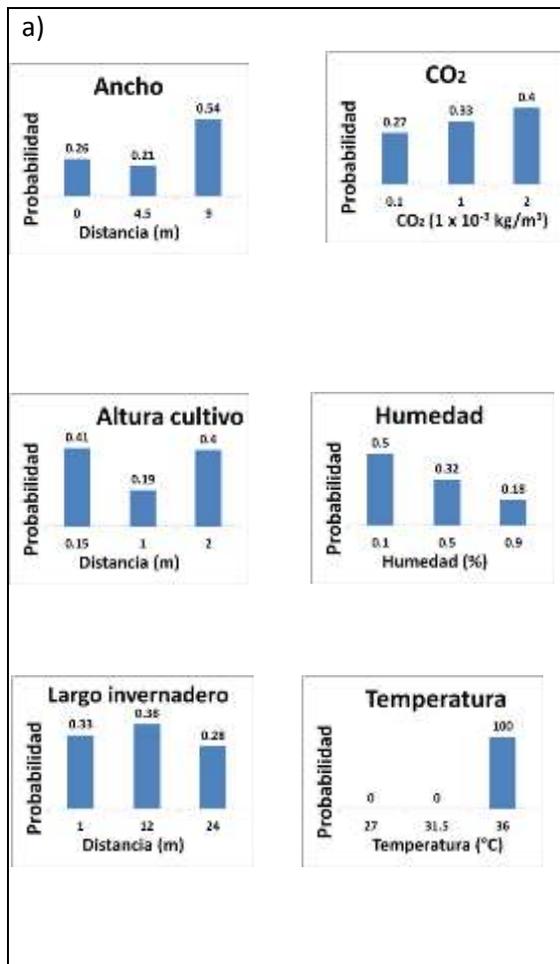
20..

Relación de la concentración de CO<sub>2</sub> con respecto a la altura del cultivo, cuando éste presenta 1m de altura.

- b) Cultivo a 1.5 m de altura: no existen relaciones definidas, la temperatura más alta (37°C) se da a baja altura (.5m), parte media izquierda del invernadero (1.7m, 15.4m), con humedad y concentración de CO<sub>2</sub> bajas (0% y 0 kg/m<sup>3</sup> respectivamente). La concentración de CO<sub>2</sub> más alta (0.002 kg/m<sup>3</sup>) se da a una altura del cultivo de 0.5 m, con una temperatura de 27°C.
- c) Cultivo a 2 m de altura: no existen relaciones definidas, la temperatura más alta (36°C) se da a baja altura (.2m), a lo largo de la parte media (15.3m) del invernadero, con humedad baja (0%) y concentración de CO<sub>2</sub> media (1000 kg/m<sup>3</sup>). La concentración de CO<sub>2</sub> más alta (0.003 kg/m<sup>3</sup>) se da a una altura del cultivo de 0.2 m, con una temperatura de 36°C.
- d) Cultivo a 2.5 m de altura: no existen relaciones definidas. La temperatura más alta (38°C) se da a baja altura (.5m), parte media del invernadero (6.4m, 15.4m), humedad baja (0%) y concentración de CO<sub>2</sub> media (1000 kg/m<sup>3</sup>). La concentración de CO<sub>2</sub> más alta (0.002 kg/m<sup>3</sup>) se da a una altura del cultivo de 0.5 m, con una temperatura de 33°C.
- e) Cultivo a 3 m de altura: no existen relaciones definidas, la temperatura más alta (36°C) se da a 1m de altura, parte media izquierda del invernadero (6.4m, 15.3m), con humedad baja (0%) y concentración de CO<sub>2</sub> media (1000 kg/m<sup>3</sup>). La concentración de CO<sub>2</sub> más alta (0.002 kg/m<sup>3</sup>) se da a una altura del cultivo de 0.2 m, con una temperatura de 27°C.
- f) Cultivo a 3.5 m de altura: no existen relaciones definidas, la temperatura más alta (37°C) se da a 1m de altura, parte media anterior del invernadero (6.4m, 8.6m), con humedad baja (0%) y concentración de CO<sub>2</sub> media (1000 kg/m<sup>3</sup>). La concentración de CO<sub>2</sub> más alta (0.002 kg/m<sup>3</sup>) se da a una altura del cultivo de 1.0 m, con una temperatura de 33°C.

Cuando el cultivo es orientado paralelo al flujo de aire, sus temperaturas son más altas que cuando se orienta perpendicular al flujo de aire. Se observan menos diferencias entre los tratamientos y no se observan relaciones de dependencia entre las variables y la altura del cultivo a excepción de cuando éste tiene una

altura de 1 m con base en .15 cm, en donde la concentración de CO<sub>2</sub> es inversamente proporcional a la altura del cultivo. Las concentraciones de CO<sub>2</sub> más elevadas se dan a las alturas del cultivo más bajas a excepción de cuando el cultivo tiene una altura de 3 m con base en .5 m, donde la concentración de CO<sub>2</sub> más alta se da a 1 m de altura del cultivo.



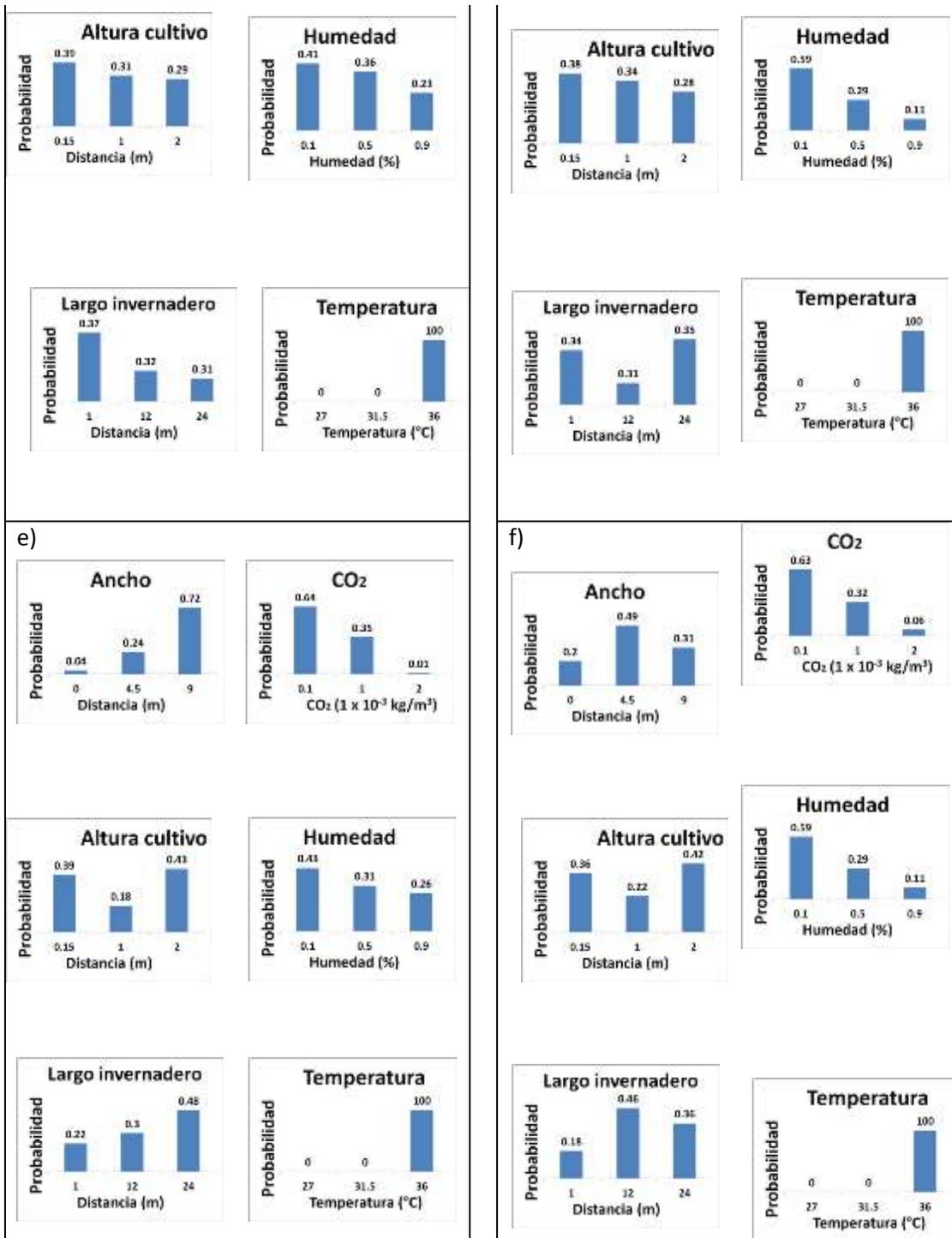


Figura 20. Cálculo de inferencias sobre el modelo de Red Bayesiana a partir de datos del modelo CFD para el invernadero le01 cuando el cultivo es orientado paralelo al flujo de aire a diferentes alturas: a) 1m, b) 1.5 m, c) 2m, d) 2.5 m, e) 3 m y f) 3.5 m.

- a) Cultivo a 1 m de altura: no existen relaciones definidas. La temperatura más alta (34°C) se da a .21 m en la parte posterior derecha del invernadero (11m, 22m), con humedad baja (0%) y concentración de CO<sub>2</sub> alta (2000 kg/m<sup>3</sup>). La concentración de CO<sub>2</sub> más baja se da a 1m.
- b) Cultivo a 1.5 m de altura: la concentración de CO<sub>2</sub> es inversamente proporcional a la altura del cultivo como se muestra en la Figura, la temperatura más alta (34°C) se da a baja altura (.5m), en la parte posterior derecha del invernadero (11m, 22m), con humedad y concentración de CO<sub>2</sub> bajas (0% y 0.0 kg/m<sup>3</sup> respectivamente). El flujo de aire arrastra al CO<sub>2</sub> y a la humedad. La concentración de CO<sub>2</sub> más alta se da a .5m.

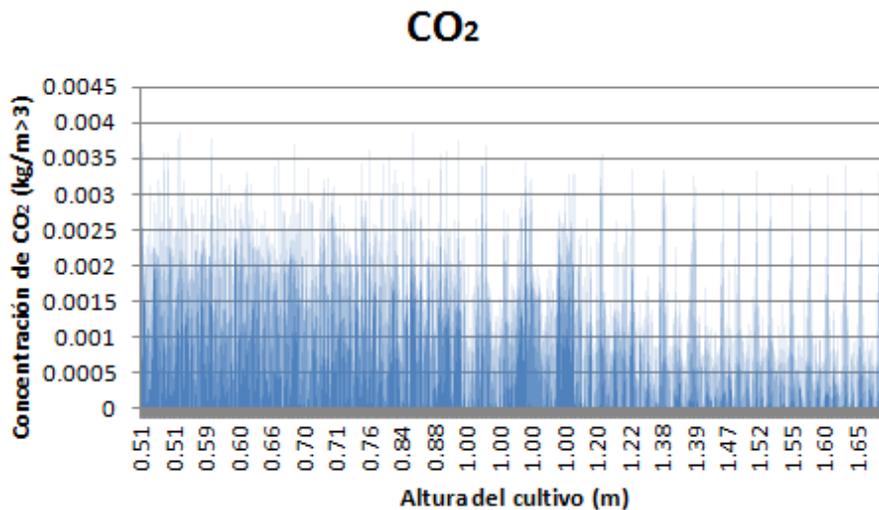


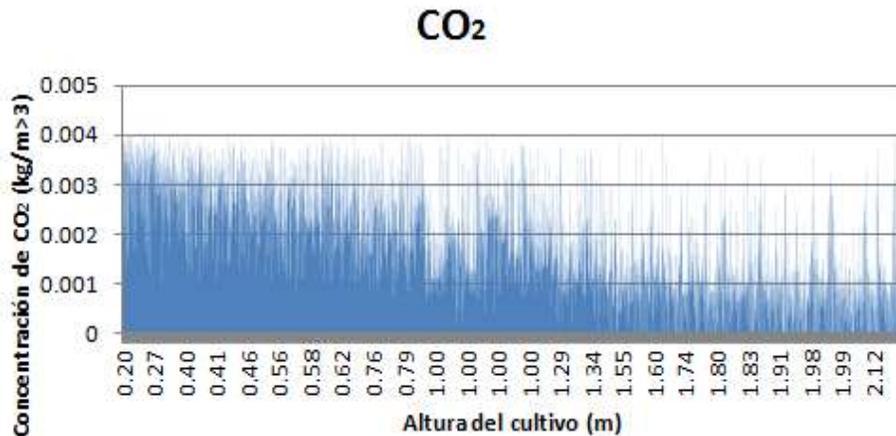
Figura  
Relación

21.

de la concentración de CO<sub>2</sub> con respecto a la altura del cultivo, cuando éste presenta 1.5 m de altura.

- c) Cultivo a 2 m de altura: la concentración de CO<sub>2</sub> es inversamente proporcional a la altura, la temperatura más alta (33°C) se da a baja altura (.2m), en la parte anterior derecha (11m, 8m) del invernadero, con humedad baja (0%) y concentración de CO<sub>2</sub> alta (2000 kg/m<sup>3</sup>). El CO<sub>2</sub> no es

arrastrado por el flujo de aire y se estanca. La concentración de CO<sub>2</sub> más baja se da a 1m de altura del cultivo.



Figura

22. Relación de la concentración de CO<sub>2</sub> con respecto a la altura del cultivo, cuando éste presenta 2m de altura.

- d) Cultivo a 2.5 m de altura: no existen relaciones definidas. La temperatura más alta (34°C) se da a baja altura del cultivo (.5m), en la parte posterior derecha del invernadero (10.9m, 22m), humedad baja (0%) y concentración de CO<sub>2</sub> alta (2000 kg/m<sup>3</sup>). El CO<sub>2</sub> es arrastrado parcialmente por el flujo de aire, estancándose en la parte posterior del invernadero. La concentración de CO<sub>2</sub> más baja se da a 1m de altura del cultivo.
- e) Cultivo a 3 m de altura: no existen relaciones definidas, la temperatura más alta (32°C) se da a 1m de altura del cultivo, en la parte posterior derecha del invernadero (11.2m, 22m), con humedad baja (0%) y concentración de CO<sub>2</sub> baja (0 kg/m<sup>3</sup>). La concentración de CO<sub>2</sub> más alta se da a 0.5m de altura del cultivo, con temperatura de 32°C.
- f) Cultivo a 3.5 m de altura: no existen relaciones definidas, la temperatura más alta (37°C) se da a 1m de altura, en la parte media posterior del invernadero (6.4m, 15.3m), con humedad baja (0%) y concentración de CO<sub>2</sub> baja (0 kg/m<sup>3</sup>). La concentración de CO<sub>2</sub> más alta se da a 0.5m de altura del cultivo, con temperatura de 28°C.

Cuando el cultivo es orientado perpendicular al flujo de aire, las temperaturas son menores que cuando es orientado paralelo al flujo de aire; se observan relaciones inversamente proporcionales entre la concentración de CO<sub>2</sub> y la altura del cultivo. En todos los casos, la temperatura máxima se da en la base del cultivo, lo cual propicia bajas concentraciones de CO<sub>2</sub> a excepción del cultivo a 2 m de altura con base en .15 m, en donde a diferencia de los demás casos, se observa una alta concentración de CO<sub>2</sub> debido a que el CO<sub>2</sub> no es arrastrado por el flujo de aire y se estanca.

## **V. CONCLUSION E INVESTIGACION FUTURA**

Las mejores condiciones de concentración de CO<sub>2</sub> y humedad se dan cuando el cultivo se orienta paralelo al flujo de aire, con tutoreo a 3.5 m y 0.5 m de altura de la base, y a pesar de que la temperatura es la más elevada con respecto a otras alturas y orientaciones del cultivo, ésta es de 33.5°C en promedio, la cual no representa un problema para el cultivo.

Utilizando un modelo CFD es posible determinar las relaciones entre las variables temperatura, humedad, velocidad de flujo de aire y concentración de CO<sub>2</sub>. Es posible conceptualizar el espacio del cultivo como un subsistema, que interactúan con su medio ambiente dentro de los invernaderos, mediante CFD. Las Redes Bayesianas tienen la capacidad de mostrar las relaciones entre las variables que implican los procesos fisiológicos de los cultivos dentro del invernadero. Por lo tanto, Las Redes Bayesianas deben ser evaluadas a mayor detalle, comparando sus predicciones contra las mediciones realizada. El cálculo de la inferencia en una Red Bayesiana es una medida cuantitativa de las relaciones entre sus variables, mostrando su estado más probable. Las Redes Bayesianas aplicadas a los modelos CFD muestran las dependencias entre las variables estudiadas y su distribución debida a los flujos de aire a través del cultivo, que definen las mejores condiciones ambientales al interior un invernadero.

Dentro de las aplicaciones y usos esperados de este proyecto se mencionan los siguientes puntos:

- 1) El modelo CFD podrá ser replicado a otros invernaderos para mejorar sus condiciones climáticas interiores y obtener mejores cosechas.
- 2) El modelo CFD podrá ser utilizado para simular otros tipos de cultivo y predecir las condiciones ambientales al interior del invernadero.
- 3) Con este trabajo se propone una nueva metodología para determinar las mejores condiciones ambientales mediante BN aplicadas a los modelos CFD.

La aplicación de las BN como herramienta para analizar modelos numéricos CFD es una técnica que debe ser estudiada a mayor profundidad, ya que los beneficios que se pueden obtener al generar grandes cantidades de mediciones provenientes de un conjunto de variables, se incrementarán con los avances en las tecnologías informáticas y desarrollo de mayores capacidades de procesamiento y almacenamiento de información.

Por último, es necesario vincular las BN con lenguajes de programación que permitan desarrollar dispositivos de control para la automatización de invernaderos, con lo cual se podrán generar espacios inteligentes que cuenten con la capacidad de aprender las variaciones en las condiciones climáticas y responder eficientemente a las condiciones adversas.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera, P.A., A. Fernández, R. Fernández, R. Rumí, A. Salmerón. 2011. Bayesian Network in environmental modelling. *Environmental modelling & software*, 26: 1376 – 1388.

Asociación Mexicana De Horticultura Protegida Asociación Civil. 2010. Boletín Informativo. Julio 15 Vol.2 No. 8.

Anderson, J.D. 1995. *Computational Fluid Dynamics*. McGraw-Hill, US

Ali, H.M., Moustafa, S., El-Mansy, H. 1990. Efficient Greenhouse Design For Hot Climates, *Energy Conversion And Management* 30: 433-437.

Baptista, F.J., Bailey, B.J., Meneses, J.F. 2001. Natural Ventilation Of Greenhouses: Comparison Of Measured And Predicted Ventilation Rates. *Agribuilding*, 136–151.

Bartzanas T., Tadj N., Draoui B., Kittas C. 2008. Numerical and experimental analysis of convective heat transfer in a heated greenhouse. *Acta Hortic.* 801: 847-854.

Baxevanou C., Bartzanas T., Fidaros D., Kittas C. 2008. Solar radiation distribution in a tunnel greenhouse. *Acta Hortic.* 801: 855-862.

Bouchet, E.R., Freyre, C.E., Bouzo, C.A. 2003. Medición Y Predicción De La Tasa De Renovación Del Aire En Un Invernadero Con Ventilación Lateral. Ponencia Oral. *Actas Del Xxvi Congreso Argentino De Horticultura, Paraná, Entre Ríos.* 7 P.

Boulard, T., Baille, A. 1995. Modelling Of Air Exchange Rate In A Greenhouse Equipped With Continuous Roof Vents. *J. Agric. Engng. Res.* 61:37-48.

Bournet P.E., Ould Khaoua S.A. 2007. Predicted effects of roof vent combinations on the climate distribution in a glasshouse considering radioactive and convective heat transfers. *Acta Hortic.* 801: 925-932.

Bournet, P.E., Boulard, T. 2010. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. *Computers and Electronics in Agriculture* 74, 195–217.

Casanova, V.V. 2008. Modelación De Dióxido De Carbono (CO<sub>2</sub>) En Invernaderos Ventilados Naturalmente. Tesis Doctoral. Facultad De Ingeniería. Universidad Autónoma De Querétaro. México, Pp 26-27.

Castilla Prados N. 2007. Invernaderos De Plástico. Tecnología Y Manejo. (Ed.) Mundi-Prensa, 2<sup>a</sup> Ed.

Chow K., Hold A.E. 2010. On the influence of boundary conditions and thermal radiation on predictive accuracy in numerical simulations of indoor ventilation. *Build. Environ.* 45: 437–444.

Coelho, M., Baptista, F., Fitas Da Cruz, V., Garcia, J.L. 2006. Comparison Of Four Natural Ventilation Systems In A Mediterranean Greenhouse. *Acta Hort.* 719:157-171.

Correa M., Bielza C., Paimes-Teixeira J., Alique J.R. 2009. Comparison of Bayesian networks and artificial neural networks for quality detection in a machining process. *Expert Syst. Appl.*, 36(3): 7270- 7279.

Critten, D.L., Bailey, B.J. 2002. A Review Of Greenhouse Engineering Developments During The 1990s. *Agricultural And Forest Meteorology* 112: 1-22.

De la torre-Gea, G., Soto-Zarazúa, G.M., Guevara-González, R., Rico-García, E. 2011a. Bayesian Networks for defining relationships among climate factors. *International Journal of Physics Sciences*, 6(18), 4412-4418.

De la torre-Gea, G., Soto-Zarazúa, G.M., López-Crúz, I., Torres-Pacheco, I., Rico-García, E. 2011b. Computational fluid dynamics in greenhouses: A review. *African Journal of Biotechnology*, 10(77), 17651-17662.

Guillermo De la Torre-Gea y Enrique Rico-García. 2012. Redes bayesianas aplicadas a un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional para las condiciones climáticas al interior de un invernadero. *Research in Computing Science*, 55:249-258.

Demrati, H., Boulard, T., Bekkaoui, A., Bouirden, L. 2001. Natural Ventilation And Microclimatic Performance Of A Large-Scale Banana Greenhouse. *J. Agric. Engng Res.* 80 (3), 261-271

Endalew A.M., Hertog M., Gebrehiwot M.G., Baelmans M., Ramon H., Nicolai B.M., Verboven P. 2009. Modelling airflow within model plant canopies using an integrated approach. *Comput. Electron. Agric.* 66: 9-24.

Eredics, P., Gáti K., Dobrowiecki T.P., Horváth G. 2012. Bayesian Restoration of Greenhouse Desk Temperature Measurements, 16th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems, Lisboa, Portugal, pp. 447-451.

Fernández, J.E., Bailey, B. J. 1992. Measurement And Prediction Of Greenhouse Ventilation Rates. *Agricultural And Forest Meteorology* 58:229-245.

Fidaros, D.K., Baxevanou, C.A., Bartzanas, T., Kittas, C. 2010. Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day. Renewable energy volume 35, Issue 7, July, pages 1380-1386 special section: IST National Conference.

Flores-Velázquez, J. 2010. Climate analysis in the main models of greenhouses in Mexico (mesh shade and Baticenital multitunnel) using CFD. PhD Tesis, Almeria University, Spain.

Gámez J.A., Mateo J.L., Puerta J.M. 2011. Learning Bayesian networks by hill climbing: efficient methods based on progressive restriction of the neighborhood. Data Min. Knowl. Discov., 22: 106-148.

García E. 1988. Modifications to Köppen classification system climate to suit the conditions of the Mexican Republic. Offset Larios S.A. Mexico, pp. 201-217.

Garrote L., Molina M., Mediero L. 2007. Probabilistic Forecasts Using Bayesian Networks Calibrated with Deterministic Rainfall-Runoff Models. In Vasiliev et al. (eds.), Extreme Hydrological Events: New Concepts for Security, Springer, pp. 173-183.

Guoliang L. (2009). Knowledge Discovery with Bayesian Networks. PhD dissertation, National University of Singapore, Singapore.

Guantes, R. J. 2006. El Mercado De Los Invernaderos En México, Oficina Económica Y Comercial De La Embajada De España En México, (091106).

Hruschka E, Hruschka E, Ebecken NFF (2007). Bayesian networks for imputation in classification Problems. J. Intell. Inform. Syst., 29: 231- 252.

Iglesias, N. Y., Muñoz, A. 2007. Comparación De La Transmisión De La Radiación Fotosintéticamente Activa (Par) En Invernaderos Del Norte De La Patagonia. *Horticultura Argentina* 26(60): Ene.-Jun.

Impron I., Hemming S., Botb G.P.A. 2007. Simple greenhouse climate model as a design tool for greenhouses in tropical lowland. *Biosystems Eng.* 98: 79-89.

INEGI. Marco Geoestadístico, 2000. Fuente [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)

Katsoulas, N., Bartzanas, T., Boulard, T., Mermier, M., Kittas, C. 2006. Effect Of Vent Openings And Insect Screens On Greenhouse Ventilation, *Biosystems Engineering*, 93: 427-436.

Khaoua S.A.O., Bournet P.E., Migeon C., Boulard T., Chassériaux G. 2006. Analysis of greenhouse ventilation efficiency based on computational fluid dynamics. *Biosystems Eng.* 95: 83–98.

Kim K., Yoona J.Y., Kwonb H.J., Hana J.H., Sonc J.E., Namd S.W., Giacomelli G.A., Lee I.B. (2008). 3-d cfd analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers. *Biosystems Eng.* 100: 245 – 255.

Kittas, C., Boulard T., Papadakis, G. 1997. Natural Ventilation Of A Greenhouse With Ridge And Side Openings: Sensitivity To Temperature And Wind Effects, *Transactions Of The Asae* 40:415-425.

Kittas C., Boulard, T., Bartzanas N., Katsoulas M. 2002. Influence Of An Insect Screen On Greenhouse Ventilation. *American Society of Agricultural Engineers* ISSN 0001–2351 Vol. 45(4): 1083–1090.

Kostyuk, V.I., Koval Skaya, I.M.; Garan'ko, I.B. 1990. Characteristics Of The Temperature Regime Of Tomatoes In A Heated Greenhouse. Nauchnotekhnicheskii Byulleten Vsesoyuznogo Ordlena Leninai Ordena Druzhby Narodov Nauchno Issledo Vatel'skogo Instituta.

Kruger S., Pretorius L. 2007. The effect of ventilator configurations in naturally ventilated greenhouse applications. 10<sup>th</sup> Uk Heat Transfer National Conference, Edinburgh, Scotland, September: 10 – 11.

Majdoubi H., Boulard T., Hanafi A., Bekkaoui A., Fatnassi H., Demrati H., Nya M., Bourden L. 2007. Natural ventilation performance of a large greenhouse equipped with insect screens. ASABE 50: 641–650.

Majdoubi H., Boulard T., Fatnassi H., Bourden L. 2009. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare canary type greenhouse: an experimental and CFD assisted study. Agr. Forest Meteorol. 149: 1050–1062.

Martines E., Lira L. 2008. Dew Point Calculation at Different Pressures. Metrology Symposium. SM2008-M117-1098-1.

Mediero O.L. 2007. Probabilistic forecast flood flows Through Bayesian Networks Applied to a Distributed Hydrological Model. PhD dissertation, Polytechnic University of Madrid, Madrid, Spain.

Molina-Aiz F.D., Valera D.L., Pena A.A., Alvarez A.J., Gil J.A. 2006. Analysis of the effect of rollup vent arrangement and wind speed on Almería-type greenhouse ventilation performance using Computational Fluid Dynamics. Acta Hortic. 719: 173-180.

Nebali R., Makhlof S., Boulard T., Roy J.C. 2006. A dynamic model for the determination of thermal boundary conditions in the ground of a greenhouse. Acta Hortic. 719: 295-302.

Nisen A., Grafiadellis M., Jimenez R., Malfa G. La, Martinez García P.F., Monteiro A., Verlodt H., Villele O. de, Zabeltitz C.H. von, Denis I.Cl. y Baudoin W.O. 1988. Cultures protégées en climat méditerranéen. FAO. N° 90. Roma, 317 pp.

Norton, T., Sun, D.W. , Grant, J., Fallon, R., Dodd, V. 2007. Applications of Computational Fluid Dynamics (CFD) in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review. *Bioresource Technology* 98 2386–2414.

Ocaña, R.C. 2007. Crecimiento de superficie de invernaderos en México. *Producción protegida*, Meister Media, Mayo pp. 1 – 3.

Pearl J. 1988. Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference. Morgan Kaufmann, San Mateo CA, United States, pp. 64-70.

Perales A., Perdigones A., García J.L., Montero J.I., Antón A. 2003. El Control De La Condensación En Invernaderos. *Revista Horticultura* 168:14-19.

Pontikakos C., Ferentinos K.P., Tsiligridis T.A. 2005. Web-based estimation model of natural ventilation efficiency in greenhouses using 3D Computational Fluid Dynamics. In Proc. of the International Congress on Information Technologies in Agriculture, Food and Environment, October: 12-14.

Reyes P. 2010. Bayesian networks for setting genetic algorithm parameters used in problems of geometric constraint satisfaction. *Intell. Artificial.*, 45: 5-8.

Rico-García, E., Lopez C. I.L., Herrera R., Soto-Zarazúa G.M., Castañeda, M. 2008. Effect Of The Temperature On Greenhouse Natural Ventilation Under Hot Conditions: Computational Fluid Dynamics Simulations. *Journal Of Applied Sciences* 8 (24): 4543-4551.

Rico-García, E. 2008 Modelación Climática En Invernaderos: Ventilación Natural. Tesis Doctoral. Facultad De Ingeniería. Universidad Autónoma De Querétaro, Pp 74:97.

Rodríguez, N.Y., 2006 Ecuaciones Fundamentales De La Dinámica De Fluidos. Universidad De La Habana, Facultad De Matemática Y Computación, Ciudad De La Habana, Cuba.

Roy, J.C., Boulard T. 2005. CFD prediction of the natural ventilation in a tunnel-type greenhouse: influence of wind direction and sensibility to turbulence models. Acta Hort. (Ishs) 691:457-464.

Roy J.C., Vidal C., Fargues J., Boulard T. (2008). CFD based determination of temperature and humidity at leaf surface. Comput. Electron. Agric. 61: 201-212.

Sapounas A.A., Nikita-Martzopoulou C., Bartzanas T., Kittas C. (2007). Aspects of CFD modeling of fan and pad evaporative cooling system in a greenhouses. Int. J. Vent. 6: 379-388.

Sase, S. 2006. Air movement and climate uniformity in ventilated greenhouses. Acta Hort. (Ishs) 719:313-324.

Sanz, De Galdeano J., Uribarri A., Sábada S., Aguado G., Del Castillo J. 2001. Invernaderos Fríos, Su Manejo En Invierno. *Navarra Agraria*, Noviembre - Diciembre 2001: 29-35.

Seginer I. 2002. The Penman-Monteith Evapotranspiration Equation As An Element In Greenhouse Ventilation Design. *Biosystems Engineering* 82 (4): 423-439.

Sun, H., Yang, J., Wang, X., 2010. CFD based determination of crop transpiration in local greenhouses in eastern china. *Bioinformatics and Biomedical Engineering (Icbbbe)*, 4th International Conference On, Page(S): 1 - 4 IEEE Conferences.

Tablada A., Blocken B., Carmeliet J., De Troyer F., Verschure H. (2005). The influence of courtyard geometry on air flow and thermal comfort: CFD and thermal comfort simulations. *22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture 1*: 75-80.

Teitel, M., Shkylar S. 1998. Pressure Drop Across Insect-Proof Screens. *Transactions Of The Asae*, 41(6), 1829-1834.

Teitel, M., Tanny, J., Ben-Yakir, D., Barak, M. 2005. Airflow Patterns Through Roof Openings Of A Naturally Ventilated Greenhouse And Their Effect On Insect Penetration, *Biosystems Engineering* 92:341-353.

Teitel M., Ziskind G., Liran O., Dubovsky V., Letan R. 2008b. Effect of wind direction on greenhouse ventilation rate, airflow patterns and temperature distributions. *Biosystems Eng.* 101: 351-369.

Teitel M. 2010. Using Computational Fluid Dynamics Simulations to determine pressure drops on woven screens. *Biosystems Eng.* 105: 172-179.

Tong G., Christopher D.M., Li B. 2009. Numerical modelling of temperature variations in a chinese solar greenhouse. *Comput. Electron. Agric.* 68: 129-139.

Wash C.H., Heikkinen H.S., Liou C., Nuss A.W. 1990. A Rapid Cyclogenesis Event during GALE IOP 9. *Mon. Weather Rev.*, 118(2): 234-257.