



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

MODELACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>) EN  
INVERNADEROS VENTILADOS NATURALMENTE

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIDAD

EN

INGENIERÍA DE INVERNADEROS

PRESENTA

VICTOR EDUARDO CASANOVA VILLARREAL

DIRIGIDO POR

Dr. ENRIQUE RICO GARCÍA

Santiago de Querétaro, Qro. Agosto de 2008

VICTOR E. CASANOVA VILLARREAL

Modelación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)  
en Invernaderos Ventilados Naturalmente

2008



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Especialidad en Ingeniería de Invernaderos

"Modelación del dióxido de carbono ( CO<sub>2</sub> ) en invernaderos ventilados naturalmente"

**TESIS**


Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Especialidad en Ingeniería de Invernaderos

**Presenta:**  
**Victor Eduardo Casanova Villarreal**

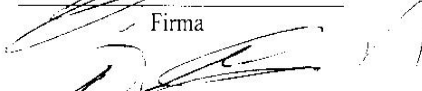
**Dirigido por:**  
**Dr. Enrique Rico García**

SINODALES

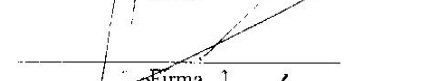
Dr. Enrique Rico García.  
Presidente

  
Firma

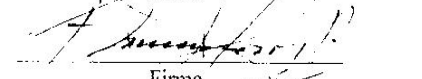
Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos  
Secretario

  
Firma

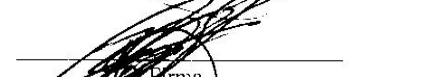
Dr. Gilberto Herrera Ramos .  
Vocal

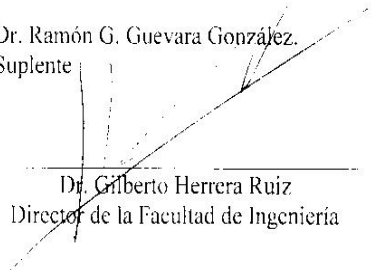
  
Firma

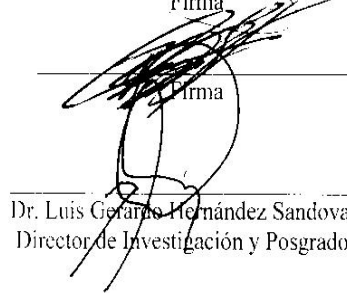
Dr. Irineo Torres Pacheco.  
Suplente

  
Firma

Dr. Ramón G. Guevara González.  
Suplente

  
Firma

  
Dr. Gilberto Herrera Ruiz  
Director de la Facultad de Ingeniería

  
Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro., Agosto, 2008  
México

## RESUMEN

Los factores externos que más influyen en el clima de un invernadero son la radiación solar, la temperatura, la velocidad del viento, la humedad relativa y la concentración de CO<sub>2</sub>. Una de las estrategias para conocer la dinámica del CO<sub>2</sub> dentro del invernadero es determinar lo que fija el cultivo (fotosíntesis neta). Este trabajo tiene como objetivo validar, bajo condiciones de invernadero, modelos de fotosíntesis neta para el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y pepino (*Cucumis sativus* L.) y generar modelos de regresión que expliquen las fluctuaciones del CO<sub>2</sub> dentro de los invernaderos. Para el monitoreo de variables en el interior de los invernaderos se instalaron sensores de CO<sub>2</sub>, radiación PAR, humedad relativa y temperatura. En el exterior se instaló un sensor de CO<sub>2</sub> y las variables de radiación solar, humedad relativa, velocidad de viento y temperatura, fueron registradas en una estación meteorológica. Para el registro de la fotosíntesis neta se utilizó un fitómetro de cuatro cámaras. El periodo de registro de datos para lechuga fue del 23 al 27 de junio del 2008 y para pepino del 3 al 8 julio de 2008. Los modelos de fotosíntesis neta se programaron en el ambiente MATLAB (simulink). Para la estimación de parámetros se utilizó el programa SAS (Statistical Analysis System). La calibración de los modelos de fotosíntesis neta, tanto de lechuga como de pepino, arrojó valores de R<sup>2</sup> de 0.89 y 0.94, respectivamente, mientras que los mejores modelos de regresión para predecir el CO<sub>2</sub> dentro del invernadero tuvieron R<sup>2</sup> de 0.85 y 0.80, respectivamente.

Palabras claves. Modelación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), Fotosíntesis neta, invernaderos.

## SUMMARY

The main external factors influencing inner climate in greenhouses are solar radiation, air temperature, wind velocity, relative humidity and CO<sub>2</sub> concentration. A strategy to better understand CO<sub>2</sub> dynamics inside greenhouses is by determining how CO<sub>2</sub> is fixed by plants (net photosynthesis). The objective of this work is to validate, under greenhouse conditions, net photosynthesis models for lettuce (*Lactuca Sativa* L) and cucumber (*Cucumis sativus* L) crops, and to generate regression models explaining CO<sub>2</sub> fluctuations inside greenhouses. Sensors for CO<sub>2</sub>, PAR radiation, relative humidity and temperature were installed in the greenhouse. On the outside, a CO<sub>2</sub> sensor was also installed. Solar radiation, relative humidity, wind velocity and temperature were registered using an outside weather station. A four-chamber photosynthesis monitor was used to register net photosynthesis. Monitoring period for lettuce was from June 23<sup>rd</sup> to 27<sup>th</sup>, 2008; while the corresponding for cucumbers was from July 3<sup>rd</sup> to 8<sup>th</sup>, 2008. The net photosynthesis models were programmed in MATLAB environment (simulink). Parameter estimation was performed using the SAS (Statistical Analysis System) program. Calibration of net photosynthesis models, both for lettuce and cucumbers, yielded R<sup>2</sup> values of 0.89 and 0.94, respectively, while the best regression models to predict CO<sub>2</sub> inside the greenhouse had R<sup>2</sup> values of 0.85 and 0.80, respectively.

Keywords: Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) modelling, net photosynthesis, greenhouses.

**DEDICO ESTA TESIS A:**

A mi esposa ALICIA MERCEDES LOPE GUTIÉRREZ Una Mujer que me ha dado fortaleza y confianza en mi vida profesional.

A mi MADRE VICTORIA VILLARREAL MAY, por enseñarme que la vida es de valores y esfuerzos

A mi padre EDUARDO CASANOVA por los ejemplos de lucha incansable ante la vida

Con todo amor a mis hijos EDUARDO y JUAN, por el tiempo que les he robado como padre y que han sabido comprender.

## **AGRADECIMIENTO**

Al Dr. Enrique Rico por el apoyo y asesoría brindada en la realización de este trabajo

Al Dr. Eusebio Ventura Ramos y Dr Gilberto Herrera Ruiz por el apoyo incondicional que he recibido de ellos.

Al Ing Valentín González Sifuentes por las facilidades dadas para la realización de esta especialidad.

Al Consejo Quintanaroense de Ciencia y Tecnología por la beca proporcionada en el periodo de realización de esta especialidad.

<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Importancia de la producción en invernaderos en el mundo	1
1.2. Los nuevos retos en la producción de invernaderos	3
1.3. Limitantes de la producción de invernaderos en México	5
1.4. Objetivos	6
1.5. Alcances del trabajo	7
2. ANTECEDENTES	8
2.1. Modelos matemáticos de crecimiento en hortalizas	8
2.2. El papel del CO <sub>2</sub> en las plantas	15
2.3. Manejo de CO <sub>2</sub> en invernadero	19
2.4. Justificación	22
3. MATERIALES Y MÉTODOS	23
3.1. Localización.	23
3.2. Metodología	24
3.3. Descripción de modelos	25
3.3.1. Nicolet	25
3.3.1. Modelos empíricos para pepino	27
3.4. Monitoreo de variables	28
3.5. Calibración de los modelos mecánicos.	30
3.6. Obtención de modelos de regresión para la variable CO <sub>2</sub> dentro del invernadero.	34
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	38
4.1. Calibración del modelo de fotosíntesis neta para lechuga	38
4.2. Modelos ARX (caja negra), para estimar la concentración de CO <sub>2</sub> en el interior del invernadero para el cultivo de lechuga	42
4.3. Análisis de correlación canónica para clima de invernadero (CANCORR)	47
4.4. Calibración del modelo de fotosíntesis neta para el cultivo de pepino	49

4.5. Modelos ARX (caja negra), para estimar la concentración de CO <sub>2</sub> en el interior del invernadero para cultivo de pepino.	56
5. CONCLUSIONES	60
6. SUGERENCIAS	62
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64



<b>FIGURA</b>	<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>PÁGINA</b>
2.1. Efectos de la radiación y la concentración de CO <sub>2</sub> sobre la asimilación neta de CO <sub>2</sub>		20
3.1. a. Dimensiones de los invernaderos		24
3.1.b) Aspecto físico de los invernaderos		24
3.2. b. Sensores de CO <sub>2</sub> , Temperatura, Humedad relativa		28
3.3. a . Medidor de fotosíntesis utilizado en los cultivos de lechuga y pepino.		29
3.3.b. Cámaras del medidor de fotosíntesis.		29
3.4. Medición de la longitud de la hoja, para obtener el área foliar.		32
3.5. Programa de fotosíntesis neta para lechuga en el ambiente MATLAB – Simulink.		33
3.6. Programa de fotosíntesis neta para pepino, en ambiente MATLAB- Simulink.		33
3.7. Secuencia esquemática de la metodología, utilizada para la obtención de los modelos.		37
4.1.a. Comparación de la cantidad de CO <sub>2</sub> fijada por la planta, medida por el fitómetro, contra la cantidad estimada por el modelo		41
4.1.b. Sensibilidad de la fotosíntesis neta a las variables PAR y CO <sub>2</sub> inv para el cultivo de lechuga.		41
4.2. Comparación de dos modelos de regresión , con las concentraciones observadas de CO <sub>2</sub> dentro del invernadero, en cultivo de lechuga		47
4.3. Comparación entre los valores de fotosíntesis neta y los estimados con el modelo.		52
4.4. Sensibilidad de la fotosíntesis neta a las variables temperatura y concentración de CO <sub>2</sub> del invernadero, en cultivo de pepino.		53
4.5. Sensibilidad de la fotosíntesis neta en el cultivo de pepino, a las variable LAI y la Temperatura del invernadero.		50
4.6. Sensibilidad de la fotosíntesis neta en pepino, a las variables PAR y a la concentración de CO <sub>2</sub> en el interior del invernadero.		54
4.7. Sensibilidad de la fotosíntesis neta en pepino, a las variables LAI y PAR.		55

4.8. Comparación de dos modelos de regresión, para estimar la concentración de CO<sub>2</sub> dentro del invernadero.

59

<b>CUADRO</b>	<b>ÍNDICE DE CUADROS</b>	<b>PÁGINA</b>
4.1.	Resumen de errores residuales por el método MODEL (OLS) no lineal.	38
4.2.	Parámetros estimados para el modelo de fotosíntesis neta del cultivo de lechuga.	39
4.3.	Modelos de regresión para la variable CO <sub>2</sub> en el interior del invernadero, con sus coeficientes de regresión, errores estándar de los parámetros y sus niveles de significancia.	44
4.4.	Modelos de regresión múltiple para predecir la variable CO <sub>2inv</sub> para cultivos de lechuga.	46
4.5	Correlación entre clima del invernadero y sus variables canónicas	48
4.6.	Correlación entre variables de clima exterior y la variable canónica de clima de invernadero.	49
4.7.	Análisis de residuales para el modelo de fotosíntesis neta para el cultivo de pepino, utilizando MODEL (OLS) del SAS.	50
4.8.	Parámetros estimados para el modelo de fotosíntesis neta del cultivo de pepino en invernadero, utilizando MODEL (OLS).	51
4.9.	Modelos de regresión para la variable CO <sub>2</sub> en el interior del invernadero, con sus coeficientes de regresión, errores estándar de los parámetros y su nivel de significancia.	57
4.10.	Modelo de regresión múltiple para predecir la variable CO <sub>2 inv</sub> para cultivos de pepino.	58

# 1. INTRODUCCIÓN

Se pretende dar una visión de la importancia que ha tomado en el mundo la producción de cultivos en invernadero, los próximos pasos a seguir en esta tecnología y los escenarios posibles que se vislumbran. Se hace referencia de la situación actual de nuestro país en relación con esta tecnología y los nuevos retos en materia de investigación que se tiene que afrontar para crear nuestra propia tecnología.

## 1.1. Importancia de la producción en invernadero en el mundo

Los cambios radicales que conlleva el paso de sistemas agrícolas tradicionales a modernos hacen que los conceptos ordinarios y temporales de la economía agrícola resulten insuficientes para su comparación. En efecto, en los sistemas 'tradicionales' los agricultores trataban de colaborar con la Madre-Tierra reponiendo en ciclo cerrado la mayoría de los insumos. En los sistemas 'modernos' se cuenta lo menos posible con la Madre-Tierra tendiendo a comprar los medios de producción y a vender los productos, equiparándose con las plantas industriales. Esta equiparación culmina en el caso de la ganadería sin suelo, de la agricultura hidropónica y de manejo de invernaderos (en la que se compra todo lo que se incorpora al proceso de producción, incluido el CO<sub>2</sub>). (Gálvez y Salinas, 1996).

La producción de cultivos en invernadero es una técnica moderna usada en la producción agrícola; su ventaja sobre el método tradicional a cielo abierto es

que se establece una barrera entre el medio ambiente externo y el cultivo. Esta barrera crea un microclima que permite protegerlo del viento, granizo, heladas, plagas, enfermedades, hierbas y animales (Castañeda *et al*, 2007).

Jiménez (1999) menciona que el cultivo en invernadero ha alcanzado tal importancia que, en el mundo, se reporta tan sólo para la explotación de flores y plantas de ornato, cerca de 56, 300 ha, lo que nos da una idea del recurso y del concepto antes referido. Siendo los países que más han adoptado esta tecnología aquéllos con condiciones climáticas adversas, tal es el caso de gran parte de Europa, Asia y América del Norte.

En Holanda se tiene un 80% de la superficie destinada a la producción bajo invernadero, ocupada por cultivos hortícolas. Las especies que destacan son: tomate, pepino, lechuga, coliflor, melón, zanahoria, espinaca, puerro, col, apio y fresa. (Ministry of Agricultura and fisheries, Holanda 1959, Citado por Jiménez 1999). En España robledo y Martin (1981) reportaron que las hortalizas más explotadas en invernadero son: pepino, tomate, pimiento, lechuga, calabacita, sandía, melón, ejote y berenjena.

En el 2004 la Asociación Mexicana de Productores de Hortalizas en Invernadero reportaba un total de 3000 hectáreas de invernaderos en todo el territorio nacional. En la actualidad operan en México 6000 hectáreas de invernadero (El Siglo de Torreón, 06 de febrero de 2008). De 1999 a la fecha la cantidad de invernaderos ha aumentado en un seiscientos por ciento.

## **1.2. Los nuevos retos en la producción de invernadero.**

Los diversos elementos que lo componen y las múltiples relaciones que se establecen en el invernadero hacen de él un sistema complejo, en el cual los flujos de energía, masa, variables biológicas del cultivo y manejo de cultivo son dinámicos y de diferente magnitud. El cultivo es su elemento central y sobre éste actúan variables abióticas como el clima (temperatura, humedad del ambiente, radiación fotosintética activa y CO<sub>2</sub>), la nutrición (agua y nutrientes), y variables bióticas (plagas, enfermedades, virus, bacterias y malas hierbas) y de manejo cultural (podas). Estas variables establecen interacciones entre sí de manera que su complejidad ha hecho necesario que sean estudiadas en profundidad e identificadas en subsistemas como invernaderos. Para alcanzar el conocimiento detallado de éstos, los modelos matemáticos han constituido una herramienta importante de ayuda, lo que ha permitido explicar el comportamiento de los mismos. Los subsistemas del invernadero han sido caracterizados de manera dinámica por diversos autores, tanto a nivel de clima, comportamiento del agua en el suelo o substrato, nutrición y plagas y enfermedades, entre otros (Ramírez, 2005).

El desarrollo de modelos del clima permite predecir el comportamiento de los diferentes componentes que integran el agrosistema invernadero y sus interacciones. Éstos permiten controlar mejor las condiciones de crecimiento dentro del invernadero, las cuales están determinadas por factores como radiación, temperatura, humedad, concentración de CO<sub>2</sub> y velocidad del viento (Challa, 1990), y donde todos guardan una estrecha relación con las condiciones climáticas específicas de cada región y son afectados por la cubierta del invernadero. Además, este tipo de herramientas se utiliza en el diseño de invernaderos, y para el análisis y diseño de nuevos algoritmos y métodos de

control (Bakker *et al.*, 1995). Hay una gran necesidad de modelos de invernaderos, especialmente en países donde este tipo de tecnología de producción es relativamente nueva.

Una herramienta para mejorar el manejo de los invernaderos son los modelos matemáticos precisos y simples para predecir el comportamiento de las variables atmosféricas. En los últimos 20 años se ha estudiado el clima del invernadero usando modelos matemáticos, físicos o mecanicistas (Bot, 1983; Deltour *et al.*, 1985; Wang y Boulard, 2000), o modelos empíricos del tipo caja negra, como los de autoregresión con variables exógenas (ARX) (Uchida-Frausto *et al.*, 2003; Boaventura-Cunha, *et al.*, 1996). El desarrollo de modelos basados en el balance de masa y energía del ambiente en un invernadero requiere tiempo, ya que deben ser calibrados y validados antes de su optimización y control. Los modelos autoregresivos tienen la ventaja de ser generados rápidamente, ya que se obtienen experimentalmente al establecer las relaciones entrada-salida del sistema mediante técnicas de identificación de parámetros (Ljung, 1999).

Los trabajos que actualmente se vislumbran, es el manejo integral de todos los sistemas que componen la producción de cultivos en invernadero, utilizando enfoques multiobjetivos. Donde se debe eficientizar el manejo de las variables climáticas, el manejo eficiente de los recursos como el agua, el manejo de fertilizantes para la disminución de contaminación. Y esto únicamente es posible con modelos matemáticos que consideren todas las variables que intervienen en el sistema, incluidos en un software capaz de tomar decisiones con el mínimo error y el desarrollo de sensores capaces de monitorear todos los parámetros antes mencionados.

### **1.3. Limitantes de la producción de invernaderos en México.**

El uso de invernaderos para la producción de hortalizas ha crecido en México rápidamente en los últimos años. Lo más importante para el éxito de estos agronegocios es incrementar la eficiencia de la producción, lograr mayor calidad y alta productividad, lo cual está relacionado con las condiciones climáticas específicas de cada región.

La introducción de invernaderos con sistemas de ventilación de operación manual y sensores simples en México, ha logrado aumentos en el rendimiento del cultivo de tomate de hasta 13 kg m<sup>2</sup> (Rodríguez, 1996). Una mejor administración del cultivo (fertilización, riego, poda, etc.) y el uso de sistemas de control automático de clima y riego, permiten obtener rendimientos hasta de 40 kg m<sup>2</sup>; sin embargo, algunos productores holandeses obtienen hasta 78 kg /m<sup>2</sup> (LEIDLO, 1996).

México está rezagado en la productividad por metro cuadrado de invernadero, principalmente por la diferencia tecnológica y el conocimiento desarrollado en otros países en el área de ingeniería de invernaderos (diseño, equipamiento, etc.) adecuada a sus características. Esto evidencia la necesidad de desarrollar métodos propios, conocimientos y habilidades técnicas en el área de invernaderos. Las investigaciones enfocadas al desarrollo de modelos climáticos reflejan conocimiento científico de forma cuantitativa, y pueden usarse para diseñar herramientas de ingeniería para invernaderos (Castañeda, 2007).



## 1.4. Objetivos.

### Objetivo general:

**Evaluar la fluctuación de la concentración de CO<sub>2</sub> en el invernadero para los cultivos de lechuga y pepino (*Lactuca sativa* L. y *Cucumis sativus* L.)**

Ecuación general del modelo:  $\frac{dCO_2}{dt} = V - A$  donde

$\frac{dCO_2}{dt}$  = Variación del dióxido de carbono con respecto al tiempo

V = Renovación del CO<sub>2</sub> por la ventilación

A = Asimilación del CO<sub>2</sub> por el cultivo

### Objetivos particulares:

**1-Validar un modelo empírico de fotosíntesis neta en el cultivo del pepino (*Cucumis sativus* L), bajo condiciones de invernadero.**

$$P_{net} = a_0 [f_I(I) f_C(C) f_{TP}(T) + f_{TR}(T)] f_L(LAI)$$

**2. Validar la variable de estado (fotosíntesis neta) del modelo NICOLET, que predice la fotosíntesis en el cultivo de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo condiciones de invernadero.**

$$p\{I, C_a\} = \frac{\varepsilon I \sigma (C_{Ca} - C_C)}{\varepsilon I + \sigma (C_{Ca} - C_C)}$$

**3. A través de las variables de entrada, medidas dentro de invernadero, como temperatura del aire, humedad relativa, intensidad luminosa, concentración de CO<sub>2</sub>, obtener modelos de regresión para predecir las variaciones de concentración de CO<sub>2</sub> dentro del invernadero.**

### **1.5. Alcances del trabajo.**

La modelación de fenómenos tan complejos, es posible actualmente con los poderosos sistemas computacionales que existen, por lo que el obtener un modelo que prediga algún parámetro en el interior del invernadero, nos lleva primero que nada a la comprensión de este fenómeno y posteriormente a desarrollar sistemas computacionales que utilicen estos modelos para el control climático del invernadero. En México se puede decir que no existe control climático en los invernaderos establecidos, los productores todavía están integrando a su modo de producción estos sistemas agrícolas, por lo que estos operan únicamente a expensas de los cambios climáticos del exterior. El próximo paso es eficientizar al máximo el manejo de esas estructuras, utilizando modelos matemáticos desarrollados en nuestras condiciones, que permitan si no manipular estas variables por lo menos regular su influencia sobre nuestros cultivos. Es infinita la aplicación de modelos matemáticos en estos sistemas, basta mencionar que se puede utilizar en el diseño de la misma estructura, en el flujo nutricional, en el clima interno, en factores económicos para la comercialización.

## 2. ANTECEDENTES

En este capítulo se pretende dar la situación actual, en que se encuentra las investigaciones realizadas en este ámbito del modelaje, sobre el control climático del invernadero. Además se da una perspectiva sobre el potencial que tienen este tipo de investigaciones en nuestro país, y sobre todo algunas particularidades que hay que tomar en cuenta.

### 2.1 Modelos matemáticos de crecimiento en hortalizas.

Durante los últimos 15 años se han desarrollado modelos matemáticos para hortalizas cultivadas en condiciones de invernadero. Gary *et al* (1998) reportan que el número de especies estudiadas hasta ese año ascendía a 25 especies de frutales, 23 especies vegetales cultivadas a campo abierto, 20 ornamentales y 4 especies vegetales cultivadas en invernadero. De estas últimas, el jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) representaba la mitad de las referencias sobre vegetales modelados en invernadero. Algunos modelos explicativos desarrollados para algunas hortalizas importantes son: pepino (*Cucumis sativus* L.)(Marcelis, 1994 a, 1994b), lechuga (*Lactuca sativa* L.) (Sweeney *et al.*, 1981; Henten, 1994; Seginer *et al.*, 1998; Seginer *et al.*, 2000), cebolla (*Allium cepa* L.)(De Visser, 1994), Jitomate (Jones *et al.*, 1991; Dayan *et al.* , 1993a, 1993b; Koning de, 1993; Gary *et al.*, 1995;Heuvelink, 1996; Jones *et al.* , 1999; Abreu *et al.*, 2001), rosa (*Rosa hybrida* L.) (Kool y Kooning, 1996; Presnov *et al.*, 2000). Gijzen *et al.* (1998), propusieron un modelo genérico para varias especies de hortalizas cultivadas en invernaderos.

TOMato GROwth (Crecimiento de Tomate, TOMGRO) (Jones *et al.*, 1991) es un modelo mecanicista complejo (con 69 variables de estado), para el cultivo de jitomate, el cual predice desarrollo y producción. El modelo responde a las variables ambientales: temperatura, radiación solar y concentración de CO<sub>2</sub> dentro del invernadero. Una planta de jitomate es representada mediante siete vectores conteniendo las variables de estado: número de hojas, número de nodos, número de frutos, peso seco de hojas y peciolo, peso seco de segmentos principales de brotes, peso seco de frutos y área foliar. El modelo utiliza una aproximación fuente-demanda para dividir los carbohidratos para el crecimiento de los diferentes órganos. Dayan *et al.* (1993a, 1993b) realizaron un detallado análisis del modelo TOMGRO, mediante su calibración y validación para condiciones climáticas de Israel, pero no llevaron a cabo un análisis de sensibilidad.

El modelo TOMGRO ha sido modificado para permitir la modelación de crecimiento y desarrollo individual de órganos de la planta, logrando así simulaciones bastante precisas del número y peso de frutos por racimo. También se le han hecho adecuaciones para describir con más precisión la expansión de área foliar y un mejoramiento a su interfaz con el usuario, lo cual permite especificar valores de parámetros y condiciones iniciales antes de la simulación (Gary *et al.*, 1995).

Recientemente Jones y colaboradores (1999) propusieron un modelo relativamente simple para el cultivo de tomate el cual aparentemente presenta un comportamiento similar al modelo TOMGRO, pero con la gran ventaja de tener solo cinco variables de estado, a saber: número de nodos del tallo principal, índice de área foliar, peso total de la planta, peso del fruto y peso del fruto maduro. Esta versión simplificada de TOMGRO fue evaluada con datos de varios experimentos e incluso datos colectados en un invernadero comercial y los resultados obtenidos

muestran que el modelo puede describir con precisión el crecimiento y producción de tomate en diferentes localidades y años.

De Koning (1994) desarrolló un modelo para predecir la distribución de materia seca en jitomate con crecimiento indeterminado, cultivado en invernadero. Este modelo consta de un total de 300 variables de estado. El número de órganos de crecimiento fue evaluado a través de la predicción de iniciación, aborto y cosecha de órganos individuales. La demanda de fotoasimilados se basó en la tasa potencial de crecimiento de órganos. La distribución de materia seca en el modelo fue proporcional a la tasa de crecimiento potencial de los órganos. El modelo es capaz de predecir en forma razonable la formación de racimos, periodo de crecimiento del fruto y la distribución de materia seca. Sin embargo, la predicción del número de frutos por racimo no fue aceptable. Este modelo ha sido usado como base para el desarrollo de modelos simplificados que pueden ser usados en investigaciones de optimización y control óptimo del clima del invernadero. (Tap, 2000).

TOMato SIMulator (Simulador de tomate, TOMSIM) (Heuvelink 1995, 1996, 1999) es un modelo de tipo mecanicista con estructura modular, el cual simula crecimiento y desarrollo de jitomate. La producción de materia seca se predice por un modelo general de crecimiento para cultivo de invernadero. El modelo fue validado con diferentes fechas de plantación, densidad de plantas y conjunto de datos de invernaderos comerciales. El modelo permite el análisis del cultivo del jitomate y puede contribuir significativamente al sistema de soporte de manejo de cultivo. Heuvelink (1996) estudio las respuestas de crecimiento y producción de jitomate al clima del invernadero (radiación, temperatura, concentración de CO<sub>2</sub>) y manejo del cultivo (densidad de población y poda de frutos). El modelo TOMSIM predice producción de materia seca de acuerdo con el modelo para cultivos en

invernadero propuesto por Gijzen (1992). En TOMSIM la tasa de crecimiento potencial es simulada basándose en la tasa de fotosíntesis foliar, la intercepción de luz, tasa de respiración de mantenimiento y la eficiencia de la conversión de carbohidratos a materia seca estructural. La distribución de materia seca es simulada de acuerdo con la tasa de crecimiento potencial de los órganos.

El modelo “Tompousse” (modelo simplificado para tomate, TOMPOUSSE) (Abreu *et al.*, 2001; Gary *et al.*, 1996) para jitomate está orientado a simular la producción semanal del cultivo de jitomate bajo invernadero a partir de información disponible dentro de las condiciones de producción. Las etapas más importantes de elaboración de rendimiento son la transmisión promedio de radiación por el invernadero, la intercepción de radiación por la cubierta vegetal (depende del índice de área foliar) y su conversión en biomasa (que depende de la cantidad de CO<sub>2</sub> y de la distribución de una fracción de esta biomasa a los frutos). El modelo permite simular en forma adecuada las curvas de producción bajo condiciones climáticas contrastantes. Tompousse ha sido adaptado a invernaderos de plástico sin calefacción de Portugal y predice la producción semanal en términos de número y peso fresco de frutos cosechados.

El modelo de crecimiento FRUIT GROWTH, (Crecimiento de fruto, FRUGRO) para el cultivo de pepino fue propuesto por Marcelis, (1994a, 1994b). En FRUGRO la planta es descrita por un conjunto de órganos de demanda los cuales obtienen asimilados para el crecimiento a partir de un depósito común. Los asimilados son resultado de la fotosíntesis y son acumulados en un almacén. Parte de los asimilados son usados por respiración de mantenimiento y el resto está disponible para el crecimiento. La respiración de crecimiento no es tomada en cuenta. La tasa de crecimiento de los órganos de demanda depende de la cantidad de asimilados disponibles y también de la fuerza de demanda o la

capacidad potencial de los órganos para acumular asimilados. La unidad de tiempo del modelo es un día. El número de frutos de una planta es calculado como una función de las tasas de aparición de frutos, de frutos abortados y de frutos cosechados. Los datos de entrada del modelo son la temperatura diaria y radiación fotosintéticamente activa, medidos dentro del invernadero.

Varios modelos han sido propuestos para modelar el crecimiento de lechugas y por tratarse de un cultivo relativamente simple se ha usado ampliamente en estudios de optimización y control. Sweeney *et al.* (1981) propusieron un modelo de lechugas de dos variables de estado: materia seca de reservas y materia seca estructural; se ignora materia seca de la raíz. Las variables de entrada del modelo son flujo de luz y temperatura. El modelo predice materia seca total, área foliar y área foliar efectiva. A pesar de que contiene solamente dos variables de estado, la tasa de cambio de estas implica un cálculo de funciones algébricas no-lineales, a saber: funciones exponenciales de crecimiento para la materia seca estructural y una función exponencial para la tasa de fotosíntesis. El modelo de Sweeney *et al.* (1981) contiene varios parámetros que requieren ser estimados. El modelo fue validado con datos obtenidos en invernaderos en Inglaterra y predijo apropiadamente el comportamiento de la producción de materia seca total del cultivo.

Van Henten (1994a, 1994b) propuso un modelo para el cultivo de lechuga el cual se compone de dos variables de estado: el peso seco estructural y el peso seco no estructural. El modelo asume que en un tiempo dado la planta está completamente definida por las dos variables. El peso seco total, es la suma de peso seco estructural y no estructural. El peso seco no estructural está representado por el contenido de carbohidratos y almidón. Las variables de entrada son: radiación fotosintéticamente activa, temperatura y concentración de

CO<sub>2</sub> medidas dentro del invernadero. El modelo presenta 17 parámetros que deben ser estimadas. Van Henten y Van Straten (1994) llevaron a cabo un análisis de sensibilidad del modelo que muestra el papel preponderante que los parámetros eficiencia de conversión de materia seca no- estructural a materia seca estructural y eficiencia de el uso de la luz tienen en el comportamiento de las predicciones del modelo. Recientemente este modelo fue calibrado usando datos de un experimento de crecimiento de lechuga bajo un clima templado (Ramírez *et al.*, 2001).

Seginer y colaboradores (1998). Propone un nuevo modelo para lechuga (Control in LETtuce (Control de nitratos en lechuga, NICOLET) consta de dos variables de estado: contenido de carbono no-estructural y contenido de carbono estructural expresado en moles por unidad de superficie.

Como en otros modelos de crecimiento de cultivos, el contenido del modelo NICOLET es un balance de carbono. El contenido de carbono no-estructural, principalmente contenido en las vacuolas, se originan de la asimilación del proceso fotosintético, el cual es afectado por la luz y la cantidad disponible de CO<sub>2</sub>. La respiración de mantenimiento y respiración de crecimiento dan cuenta de estos recursos bajo la influencia de la temperatura. Las salidas del modelo son variables que pueden ser medidas directamente tales como peso seco de la planta, peso fresco y contenido de nitratos. El modelo NICOLET ha sido usado para generar estrategias de control óptimo de los niveles de nitratos en lechugas (Loslovich y Seginer, 2002; López *et al.*, 2003).

Dayan *et al.* (2002) desarrollaron un modelo (Rose Grow, Crecimiento de rosas) que describen el crecimiento del dosel y el desarrollo de brotes florales de



rosas en invernadero. La acumulación de biomasa es una función de fotosíntesis, respiración y eficiencia de conversión de carbohidratos a materia seca y se incluyen los efectos de índice de área foliar, luz, CO<sub>2</sub> y temperatura. El modelo utiliza incrementos de tiempo basados en una dinámica diaria y lazos de trabajo rápidos ocurriendo en un lapso de 30 minutos. En esta dinámica se calcula las variables temperatura, CO<sub>2</sub>, y radiación fotosintéticamente activa, así como los procesos de fotosíntesis y respiración. El crecimiento se calcula en la dinámica diaria en la que se actualizan las variables de estado. Se registra la dinámica de aparición de brotes, de muerte de ramas que desarrollan flores y ramas de orillas que no desarrollan flores. Para cada tipo de ramas se contabilizan tres partes diferentes de la planta: tallo, hoja y yema floral. El patrón de crecimiento de cada rama desde su iniciación hasta su madurez se divide en clases de edad, de manera que cada rama del mismo tipo y clase similar se define como “grupo de edad” y se describe de acuerdo a las variables de estado sobre los órganos de la rama: número, peso y longitud de tallo, número, peso y longitud de hoja, número, peso y volumen de yemas florales.

Tratando de buscar un modelo que predijera el crecimiento de las hortalizas en general, se propone el modelo “HORTicultura SIMulator” (Simulador de hortalizas, HORTISIM), fue construido a partir de modelos existentes, desarrollados por varios grupos de investigación. Incluye aspectos del crecimiento de cultivo y clima de invernadero considerados en forma integrada. HORTISIM contiene siete submodelos (Clima, Clima del invernadero, Suelo, cultivo, manejo del invernadero, manejo del suelo y manejo del cultivo). HORTISIM es un modelo importante ya que es genérico y no específico para un cultivo. Dado que este modelo combina un modelo del cultivo, un modelo del invernadero, un modelo del manejo del clima en el invernadero, y un modelo del manejo del cultivo, puede ser usados en estudios sobre los efectos del diseño del invernadero, equipo,

estrategias para el control del clima del invernadero y manipulación del cultivo, sobre la producción del cultivo y usos de recursos.

En México por la complejidad que se tiene en evaluar un modelo de crecimiento, debido a los múltiples equipos que se requieren, se ha optado por desarrollar modelos empíricos de autoregresión.

## **2.2. El papel del CO<sub>2</sub> en las plantas**

El 40% de la materia seca de las plantas es carbono y éste proviene del CO<sub>2</sub> absorbido durante la fotosíntesis (Lambers, 1998). En la atmósfera el O<sub>2</sub> está 600 veces más concentrado que el CO<sub>2</sub>, lo cual favorece siempre las ineficientes reacciones de oxigenación; las plantas deben acumular CO<sub>2</sub> desde una concentración muy diluida y, al mismo tiempo, funcionar a alta concentración de O<sub>2</sub> con enormes gradientes de presión de vapor de agua entre la hoja y la atmósfera (Lawlor, 1993). Como ejemplo, una hoja a 23°C con aire interno saturado de vapor de agua (100% de humedad relativa) tiene una presión de vapor de agua de aproximadamente 2.8 kPa comparado con 1.5 kPa del aire a 25°C y 50% de humedad relativa, así, las hojas deben absorber CO<sub>2</sub> mientras limitan la pérdida de vapor de agua, y son los estomas quienes regulan este conflicto (Lawlor, 1993).

Una vez situado en la hoja, el CO<sub>2</sub> se difunde de los espacios de aire intercelulares a los sitios de carboxilación en el cloroplasto (especies C3) o en el hialoplasma o porción fluida del citoplasma (especies C4 y CAM) (Lambers, 1998;

Gijzen, 1995). Considerando el flujo de CO<sub>2</sub> en el camino al estroma del cloroplasto donde la enzima rubisco está activa, el CO<sub>2</sub> tiene que difundirse del aire alrededor de la hoja a la cavidad estomatal (Gijzen, 1995).

Dos barreras tienen que ser superadas en el flujo descrito anteriormente, que pueden ser caracterizadas por sus diferentes conductancias: la conductancia de capa límite y la conductancia estomática (Gijzen, 1995), aunque también puede incluirse la conductancia de la cutícula. Se desarrolla entonces un gradiente de CO<sub>2</sub> a través de la envoltura del cloroplasto, el hialoplasma, la membrana y pared celular a los espacios intercelulares, vía que va desde el estoma al aire del ambiente (Lawlor, 1993).

La capa límite es la capa de aire adyacente a la hoja que es modificada por la hoja; su umbral está comúnmente definido como el punto en el cual las propiedades del aire están en el 99% de los valores del aire ambiente (Lambers, 1998). La velocidad del aire en el interior del invernadero genera gruesas capas de aire alrededor de la hoja y en consecuencia baja conductancia de capa límite, fluctuando sus valores entre 0.01 m s<sup>-1</sup> en cultivo de tomate (Stanghellini, 1987) y 0.025-0.05 m s<sup>-1</sup> en cultivos de campo abierto ; también se señalan valores de 10 mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (0.24 m s<sup>-1</sup>) a velocidades de viento de 5 m s<sup>-1</sup> (Lambers, 1989); o valores de 0.2 a 4 mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (0.0048 – 0.01 m s<sup>-1</sup>) a velocidades entre 0.5 y 2 m s<sup>-1</sup> (Lawlor, 1993).

La conductancia estomática incrementa a altos niveles de intensidad lumínica y decrece a altas concentraciones de CO<sub>2</sub> ambiente. Algunos valores indicados para esta conductancia son: de 0.4 mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (0.096 m s<sup>-1</sup>) en mediciones con estomas abiertos (Lawlor,1993), 1 mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (0.024 m s<sup>-1</sup>) en

estomas abiertos y alta densidad de estomas (Lambers, 1998); en estomas cerrados de  $0.01 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $0.00024 \text{ m s}^{-1}$ ) (Lawlor, 1993), en estudios realizados en tomate y pepino fue muy baja y alcanzó 0.02 a  $0.025 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $0.00048\text{-}0.0006 \text{ m s}^{-1}$ ) (Nederhoff, 1993); la conductancia en la cutícula es muy baja, del orden de  $0.005 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $0.000012 \text{ m s}^{-1}$ ) o aún de magnitud inferior (Lawlor, 1993).

Para el transporte del  $\text{CO}_2$  desde la cavidad subestomatal hasta el cloroplasto también hay una resistencia interna o conductancia interna, como consecuencia de ello, la presión parcial del  $\text{CO}_2$  dentro el cloroplasto es menor que la presión del  $\text{CO}_2$  intercelular (Lambers, 1998). La proporción de concentración de  $\text{CO}_2$  intercelular a concentración de  $\text{CO}_2$  ambiente tiende a conservarse constante a completa luz del sol en valores de 0.7 – 0.8 (Gijzen, 1995).

La conductancia interna varía bastante entre especies y se correlaciona a la capacidad fotosintética de la hoja. Es posible separar la conductancia interna antes mencionada en conductancia en el espacio intercelular y la conductancia del mesófilo, la primera depende de la geometría de los espacios de aire del mesófilo, y sus valores fluctúan entre 4 y  $0.8 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , hojas con altas tasas fotosintéticas tienen grandes espacios interiores, mientras que la conductancia del mesófilo incluye una serie de resistencias en las fases líquidas de la pared celular, membrana celular, hialoplasma, membranas del cloroplasto y estroma hasta el sitio de la enzima activa (Lawlor, 1993). Esta resistencia del mesófilo es difícil de estimar porque la concentración de  $\text{CO}_2$  en el sitio de la enzima es desconocida. Se conoce, no obstante, que el contenido de  $\text{CO}_2$  en el cloroplasto es un 30% inferior respecto al del espacio intercelular (Lawlor, 1993); algunos autores asumen una conductancia del mesófilo muy baja, del orden de  $0.005 \text{ m s}^{-1}$  (Heuvelink, 1996).

Para analizar las limitaciones de la difusión de CO<sub>2</sub> es conveniente utilizar el término resistencia, ya que su propiedad aditiva permite obtener una resistencia total. Cuando se consideran flujos, sin embargo, es más conveniente utilizar el término conductancia, inverso de la resistencia, porque el flujo varía en proporción a la conductancia como se señala en (Lamber1998).

La eficiencia de conversión de luz se incrementa con la concentración de CO<sub>2</sub>, por ejemplo en berenjena se indican eficiencias máximas de 8.5, 11.4 y 12.0  $\mu\text{g CO}_2 \text{ J}^{-1}$  a 400, 800 y 1200 ppm de concentración de CO<sub>2</sub> respectivamente, en amaranto de 8.9 y 9.0  $\mu\text{gCO}_2 \text{ J}^{-1}$  a 400 y 1200 ppm de CO<sub>2</sub> respectivamente, en tomate fue 23% más alta la tasa de fotosíntesis máxima a concentraciones de CO<sub>2</sub> de 500  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  respecto a 340  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  (Heuvelink, 1996). Se ha indicado también mayor eficiencia de radiación fotosintética en tomate de primavera, de 0.08 y 0.1 mol-CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>fotón en concentraciones de 350 y 1000  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  CO<sub>2</sub> respectivamente; y en pepino cultivado en otoño de 0.10 y 0.15 mol- CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>-fotón para concentraciones de 350 y 1000  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  CO<sub>2</sub> respectivamente en estudios realizados en (Nederhoff, 1994), aunque en begonia la eficiencia de radiación PAR a 900  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  CO<sub>2</sub> fue de 0.059 mol mol<sup>-1</sup>, menor que a 600  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  CO<sub>2</sub> que fue de 0.066 mol-CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>-fotón (Giaglaras, 1995). En *Musa paradisiaca* cultivada a 700  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  de concentración de CO<sub>2</sub>, durante una semana, la fotosíntesis neta fue 22.1% más alta que a concentración ambiente, mientras que cuando la duración fue de ocho semanas la fotosíntesis neta disminuyó en 18.1% (Sun, 2001).

La concentración de CO<sub>2</sub> sobre la fotosíntesis muestra que a elevadas concentraciones (> 1000 ppm) con exposiciones prolongadas hay una reducción

de la capacidad de fotosíntesis asociada a reducidos niveles de la enzima rubisco y nitrógeno orgánico por unidad de área foliar (Lambers, 1989).

Esta regulación hacia abajo incrementa con la duración de exposición de CO<sub>2</sub> y es más pronunciada en plantas cultivadas con bajo suministro de nutrientes (Lambers, 1998). Las plantas herbáceas reducen consistentemente su conductancia estomatal en respuesta a elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub>, esto significa que la presión intercelular no incrementa cuando se incrementa la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire (Lambers, 1998).

### **2.3. Manejo de CO<sub>2</sub> en invernadero**

Desde hace más de 200 años se observaron los primeros efectos positivos del enriquecimiento con CO<sub>2</sub> en el crecimiento de las plantas (Saussure, 1804). A principios de 1900 la investigación sobre el CO<sub>2</sub> se llevó a cabo en diferentes países de Europa (Bolas y Melville, 1935) y de Estados Unidos (Cummings y Jones, 1918). Muchos de estos resultados tuvieron un valor limitado debido a los deficientes métodos experimentales. Sin embargo, los efectos positivos del enriquecimiento de CO<sub>2</sub> encontrados en muchos experimentos fueron realmente convincentes.

Mortensen (1995), analizó el efecto de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la producción de biomasa en un cultivo de *Betula pubescens* con diferentes condiciones de temperatura y ozono. El cultivo se desarrolló bajo concentraciones de CO<sub>2</sub>, en combinación con concentraciones de ozono (O<sub>3</sub>) ó a temperatura del aire, durante un periodo de 34 a 35 días durante 24 horas. El incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> de 350 a 550 ppm a una temperatura en aire de 17°C

incrementó el peso seco de las hojas, tallo, ramas y raíces. El RGR (*velocidad de crecimiento relativo, por sus siglas en inglés*) incrementó en un 10% por enriquecimiento de CO<sub>2</sub>, mientras que incrementando la concentración de O<sub>3</sub> de 0.007 a 0.062 ppm el RGR disminuyó en un 9%. La distribución relativa de biomasa entre la diferencia de los componentes de la planta no fue significativamente afectada por las concentraciones de CO<sub>2</sub> independientemente de las concentraciones de O<sub>3</sub>. En otro experimento elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> (700 ppm) incrementaron significativamente el peso seco en la planta, con una ganancia del RGR en 5% a 15°C y 10% a 20°C. Incrementando la concentración de CO<sub>2</sub> o de temperatura incrementa el peso de la planta y del tallo.

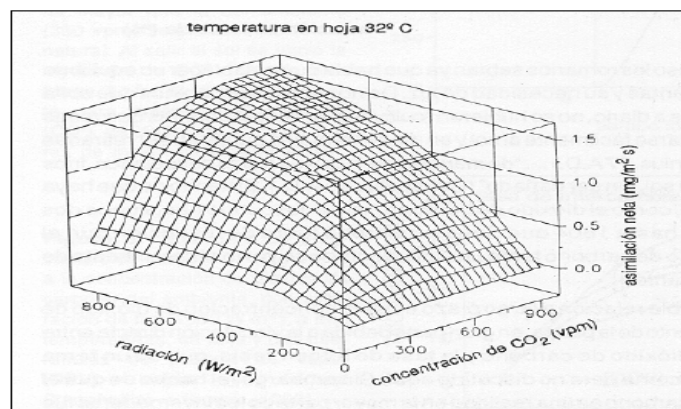


Figura 2.1. Efectos de la radiación y la concentración de CO<sub>2</sub> sobre la asimilación neta de CO<sub>2</sub>.

Tap (2000), creó un modelo usado para experimentos de control óptimo, es una versión extendida para invernaderos holandeses, a partir de la modificación realizada se expande el modelo agregando una mejor descripción de la ventilación, extendiendo el balance de energía del aire interno con la energía de transpiración y condensación, agregando el balance de humedad. Obteniendo como resultado un modelo que consta de cinco variables de estado: temperatura de aire en el invernadero, la temperatura del suelo, la concentración de CO<sub>2</sub>, la

temperatura del sistema de calefacción y la humedad del aire en el invernadero. Tap realizó una calibración y validación detalladas del modelo, así como también la integración de un modelo dinámico del crecimiento del jitomate.

Sánchez y colaboradores (2005), observaron el efecto en la producción de un invernadero en base a la varianza en el enriquecimiento de CO<sub>2</sub>. Para este trabajo utilizaron dos invernaderos idénticos en los cuales se cultivo pepino, a uno de los cuales se le hizo el control y enriquecimiento de CO<sub>2</sub>. El CO<sub>2</sub> puro fue suministrado a un cultivo de pepino bajo invernadero, manteniendo una concentración de CO<sub>2</sub> de 700 ppm en el aire cuando las ventanas estaban cerradas y una concentración de CO<sub>2</sub> de 350 ppm cuando las ventanas estaban abiertas. La dinámica del CO<sub>2</sub>, eficiencia de radiación, uso del CO<sub>2</sub>, y la respuesta del cultivo fueron determinadas durante el periodo de crecimiento, los resultados se compararon con otro cultivo de pepino en un invernadero al cual no se le suministró CO<sub>2</sub>. Mientras la concentración promedio en el día se mantenía por encima de las 400 ppm en el invernadero enriquecido del invernadero, un significativo agotamiento de CO<sub>2</sub> fue observado en el invernadero no enriquecido, cuando la concentración de CO<sub>2</sub> disminuyó por debajo de las 300 ppm durante el 60% del día, era cuando el cultivo estaba en su máximo desarrollo. En el invernadero no enriquecido, el promedio de CO<sub>2</sub> durante el día disminuyó, así como el promedio de la mala concentración que era altamente correlacionada con la radiación interceptada por el cultivo, es decir, al potencial de producción de biomasa.



## **2.4. Justificación.**

El conocimiento de los factores que influyen en las fluctuaciones de  $\text{CO}_2$  dentro del invernadero y sus interrelaciones, nos ayuda a la comprensión del fenómeno y luego a tomar decisiones para su control. En países con latitudes extremas la fertilización gaseosa con  $\text{CO}_2$  es una práctica necesaria, para mantener las concentraciones ideales. En climas cálidos no existe mucha información sobre estas prácticas, sin embargo se ha comprobado que manteniendo un nivel de concentración por lo menos igual al exterior en los momentos críticos, se puede incrementar los rendimientos. Los modelos matemáticos son importantes para encontrar los puntos óptimos de las variables que influyen en la concentración de  $\text{CO}_2$ , y de esta manera reducir los costos de suministro de  $\text{CO}_2$  vía artificial. Las limitantes que tenemos son que en nuestro clima es vital la ventilación en los momentos de mayor consumo de este compuesto, por lo que el reto es encontrar el punto de equilibrio entre estos dos fenómenos. En este contexto el papel que juegan los modelos matemáticos para ubicar esos puntos de equilibrio es vital.

## **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

En este capítulo se expone los pasos y los métodos utilizados en la ejecución de este trabajo de investigación. También se expone algunas estrategias realizadas para lograr la medición de algunas variables climáticas. Se hace mención de los programas computacionales que son de mucha utilidad para logara las aproximaciones obtenidas en los modelos.

### **3.1. Localización.**

El presente trabajo se desarrollo en los invernaderos ubicados en el campus amazcla, perteneciente a la facultad de ingeniería, este se encuentra inmerso 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 1920m. (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.

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 Metodología

Para desarrollar el presente experimento y generar los modelos, se utilizaron dos invernaderos tipo capilla con las mismas dimensiones, el área cubierta es de  $108 \text{ m}^2$  (9 m de ancho y 12 m de largo). El invernadero tiene 6.5 m de altura con la canaleta a 4 m. la cumbrera está orientada norte-sur. Todas sus ventanas son del tipo enrollable (Figura 3.1). Para tomar datos de las variables de entrada del modelo se llevo a cabo la plantación del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) el día 22 de mayo del 2008, bajo un sistema hidropónico de cama flotante y para el cultivo del pepino (*Cucumis sativus* L.) se realizo la plantación el día 20 de mayo del 2008 sembrado en suelo y bajo un esquema totalmente orgánico.

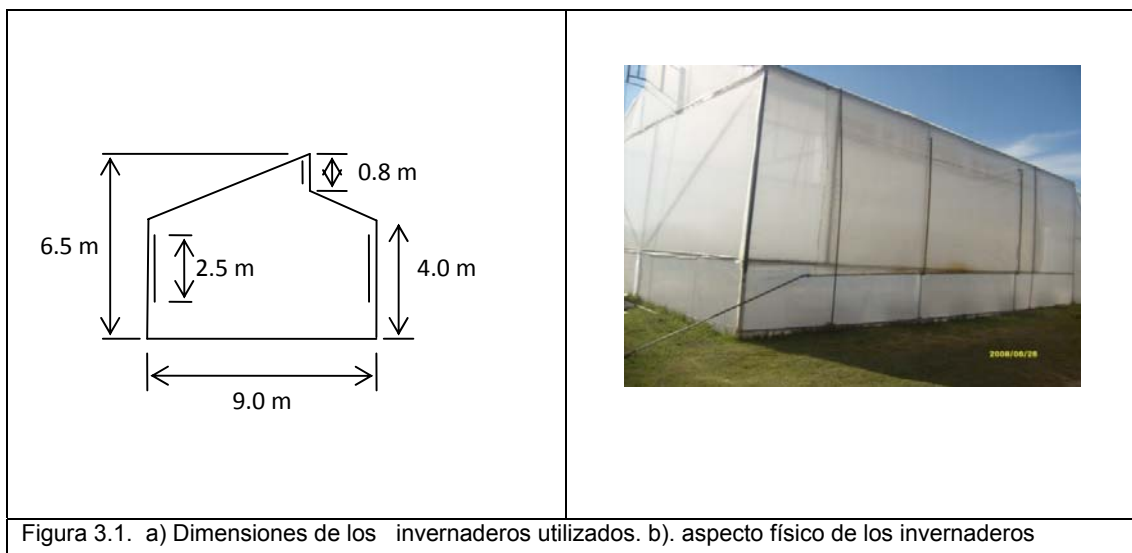


Figura 3.1. a) Dimensiones de los invernaderos utilizados. b). aspecto físico de los invernaderos

### 3.3. Descripción de modelos

A continuación se describen los modelos utilizados para su calibración, se hace mención sobre los principios en que se basan y las variables de entrada que contienen

#### 3.3.1 Nicolet

Para conocer el comportamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> dentro del invernadero, es importante conocer la cantidad de CO<sub>2</sub> que es fijado por el cultivo en cuestión, por lo que para el caso de la lechuga se reporta el modelo conocido como NICOLET B3 (Seginer, 1998), este modelo es utilizado para la evaluación de nitratos.

El modelo NICOLET (Nitrate COntrol in LETtuce), propuesto para el cultivo de lechuga (Seginer *et al.*, 1998), tiene dos variables de estado: contenido de carbono en las vacuolas y contenido de carbono en la estructura celular; el núcleo de este modelo es un balance de flujos de carbono. La concentración de nitratos en las vacuolas se calcula algebraicamente a partir de la correlación negativa entre la concentración de carbono y la concentración de nitrógeno presente en las vacuolas. Las salidas del modelo, como el peso seco de la planta, el peso fresco y el contenido de nitratos, se calculan a partir de los estados mediante ecuaciones algebraicas (Seginer *et al.*, 1998).

El modelo NICOLET B3 está definido por dos ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$\frac{dM_{Cv}}{dt} = F_{Cav} - h_g F_{Cm} - F_{Cg} - F_{Cvs} \quad (1)$$

$$\frac{dM_{Cs}}{dt} = F_{Cvs} - (1 - h_g) F_{Cm} \quad (2)$$

Donde  $M_{Cv}$  [mol(C) m<sup>-2</sup> (suelo)] representa la variable de estado carbono de las vacuolas y  $M_{Cs}$  [mol (C) m<sup>-2</sup> (suelo)] representa la cantidad de carbono en la estructura  $h_g$  [adimensional] es una función de inhibición del crecimiento de la planta. El flujo de carbono  $F_{cm}$  [mol (C) m<sup>-2</sup> (suelo) s<sup>-1</sup>] del aire a las vacuolas (tasa de fotosíntesis) se calcula con la función:

$$F_{Cav} = p\{I, C_{Ca}\} f\{M_{Cs}\} h_p\{C_{Cv}\} \quad (3)$$

Donde la función de fotosíntesis total sin inhibición del dosel  $p\{I, C_{Ca}\}$  [mol (C) m<sup>-2</sup> (suelo) s<sup>-1</sup>] depende de las variables de entrada radiación PAR ( $I$ , mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) y concentración de CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero ( $C_{Ca}$ , mol m<sup>-3</sup>), y es calculada con la ecuación hiperbólica:

$$p\{I, C_{Ca}\} = \frac{\epsilon I \sigma (C_{Ca} - C_c)}{\epsilon I + \sigma (C_{Ca} - C_c)} \quad (4)$$

Con los parámetros de eficiencia fotosintética  $\epsilon$  [mol (C) mol<sup>-1</sup> (PAR)], el parámetro de conductancia foliar de CO<sub>2</sub>  $\sigma$  [m s<sup>-1</sup>], y la concentración de CO<sub>2</sub> en el punto de compensación  $C_c$ , (mol m<sup>-3</sup>).

Para los fines de este trabajo, la ecuación número cuatro, es la que se utilizo para determinar la cantidad de CO<sub>2</sub> fijada por la planta de lechuga.

### 3.3.1 Modelo empírico para pepino.

Para la determinación de CO<sub>2</sub> fijado por el pepino por unidad de área foliar se utilizo un modelo empírico probado por (Klaring *et al.*, 2007). Este modelo está constituido de la siguiente manera.

$$P_{net} = a_0 [f_I(I) f_C(C) f_{TP}(T) + f_{TR}(T)] f_L(LAI)$$

$$\text{Con } f_I(I) = 1 - e^{-a_1 I},$$

$$f_C(C) = 1 - e^{-a_2 C},$$

$$f_{TP} = T + a_3 T^2,$$

$$f_{TR} = a_4 T + a_5 T^2,$$

$$f_L(LAI) = \frac{LAI}{1 + a_6 LAI^2}$$

Donde I (  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ) es la radiación fotosintéticamente activa (PAR), C ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) es la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire, T ( °C ) es la temperatura del aire, LAI ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) es el índice de área foliar del cultivo, a<sub>0</sub>, a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>, a<sub>4</sub>, a<sub>5</sub>, a<sub>6</sub> son parámetros empíricos, los cuales son estimadas en forma matemática.

### 3.4 Monitoreo de variables

Las variables monitoreadas en ambos cultivos fueron los siguientes: CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero (CO<sub>2inv</sub>, ppm), para lo cual se utilizó un sensor de CO<sub>2</sub> de la marca watchdog, con rango de lectura de 0 a 4000 ppm, con batería de 6 v, el sensor se ubicó a una altura del piso de 1.5 m.

La temperatura del aire dentro del invernadero (T<sub>inv</sub>, °F) y la humedad relativa dentro del invernadero (HR<sub>inv</sub>, %), fueron medidas utilizando un sensor a (dataloger) de la marca Watchdog modelo 450, el cual tiene integrado el sensor de temperatura y humedad. El sensor se ubicó a 1.5 m de la altura del piso (figura 3.2)

La radiación solar dentro del invernadero (R<sub>inv</sub>, W m<sup>-2</sup>) fue medida utilizando un sensor piranómetro de silicón de la marca Spectrum Technologies. Inc, modelo 3670I, el cual mide rangos de radiación entre 300-1100 nanómetros (1-1250 W .m<sup>2</sup>). El sensor se ubicó a 1.5 metros de altura.



Figura 3.2. Sensores de CO<sub>2</sub>, Temperatura, Humedad relativa y radiación.

La cantidad de  $\text{CO}_2$  fijado por las plantas ( $\text{CO}_{2\text{fij}}$ ,  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ) dentro del invernadero fue medida por un monitor de fotosíntesis automático, modelo PTM-48M de manufactura Israelí, el cual cuenta con cuatro cámaras para registrar el intercambio gaseoso (figura 3.3)



Figura 3.3 a) Medidor de fotosíntesis utilizado en los cultivos de lechuga y pepino b) Cámaras del medidor de fotosíntesis.

Además de las variables medidas al interior del invernadero, se registraron en el exterior de este, las variables  $\text{CO}_2$  del exterior ( $\text{CO}_{2\text{ext}}$ , ppm), ( $\text{HR}_{\text{ext}}$ , %) con sensores de las mismas características de los utilizados en el invernadero.

La radiación exterior ( $R_{\text{ext}}$ ,  $\text{W m}^{-2}$ ), la temperatura exterior ( $T_{\text{ext}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), y la velocidad del viento exterior ( $VV$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ) fue medida con una estación meteorológica de la marca DAVIS, modelo Vantage Pro 2, de manufactura estadounidense, ubicada a escasos 20 metros de los invernaderos.

Todos los sensores se sincronizaron en tiempo con la misma computadora para registrar los valores de las variables cada 30 minutos, excepto la estación meteorológica que estuvo registrando cada cinco minutos.



Los periodos utilizados para el monitoreo de estas variables fueron para lechuga del 23 al 27 de Junio del 2008 y para pepino del 3 al 8 de julio del 2008.

### 3.5. Calibración de los modelos mecánicos.

La calibración de los modelos de fotosíntesis neta tanto para lechuga como para pepino.

$$P_{net} \{I, C_a\} = \frac{\varepsilon I \sigma (C_{Ca} - C_C)}{\varepsilon I + \sigma (C_{Ca} - C_C)} \quad (\text{Fotosíntesis neta para lechuga})$$

$$P_{net} = a_0 [f_I(I) f_C(C) f_{TP}(T) + f_{TR}(T)] f_L(LAI) \quad (\text{Fotosíntesis neta para pepino})$$

Inicio con un análisis dimensional para determinar la consistencia dimensional de las funciones, con el objeto de ver cuáles variables de entrada tendrían que transformarse o convertirse, para que las unidades de salida fueran como las reportaba la fórmula  $[\text{mol (C) m}^{-2} (\text{suelo) s}^{-1}]$ .

Las variables de entrada  $C_{Ca}$  para lechuga y la  $C$  para pepino, que corresponde a la concentración de  $\text{CO}_2$  en el interior del invernadero ( $\text{CO}_2_{inv}$ ), se transformaron de ppm a  $\text{mol (C) m}^{-3}$ , dicha transformación se realizó con la fórmula:

$$M = (c / 22.4) \cdot (273.13 / T) \cdot (p / 101.325) \cdot 10^{-3}$$

Donde M = concentración molar de CO<sub>2</sub> (mol m<sup>-3</sup>)

c = Fracción molar (μ mol mol<sup>-1</sup>) = fracción volumétrica (cm<sup>-3</sup> m<sup>-3</sup> o vmp)

p = presión del gas (kPa)

T = Temperatura absoluta del gas (°K)

La variable ( I ) tanto para lechuga y pepino, que corresponde a la Radiación Fotosintéticamente activa (PAR) cuyas unidades están dadas en mol (PAR) m<sup>-2</sup> [suelo] s<sup>-1</sup> se obtuvieron de la radiación total dentro del invernadero el cual es reportado por el sensor en W m<sup>-2</sup>, esta transformación se realiza considerando que 1 W m<sup>-2</sup> (radiación total) = 2.778 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (PAR).

La variable temperatura (T) para el modelo de pepino únicamente se transformo de grados Fahrenheit a grados Celsius. Para la obtención de la LAI, en la formula de pepino fue necesario conocer el área foliar de la planta, esta se obtuvo con la siguiente formula (Klaring *et al.*, 2007).

$$AL = 1.75 LL^{2.34}$$

Donde AL es área foliar en m<sup>2</sup> y LL es la longitud de la hoja en m.



Figura 3.4. Medición de la longitud de la hoja, para obtener el área foliar.

Los parámetros para lechuga de eficiencia fotosintética [ $\epsilon$ ,  $0.04 \text{ mol ( C ) mol}^{-1} (\text{PAR})$  ], conductancia foliar de  $\text{CO}_2$  [ $\sigma$ ,  $1.4 \text{ e}^{-3} \text{ m s}^{-1}$ ] y la concentración de  $\text{CO}_2$  en el punto de compensación [ $C_c$ ,  $1.1 \text{ e}^{-3} \text{ mol ( C ) m}^{-3}$ , ] se obtuvieron de los trabajos realizados por (Seginer *et al.*, 1998).

Para los parámetros utilizados en la formula de pepino se utilizaron los reportados por ( Klaring *et al.*, 2007),  $a_0 = 2.63$ ,  $a_1 = 0.00196$ ,  $a_2 = 0.00370$ ,  $a_3 = -0.0191$ ,  $a_4 = -0.0448$ ,  $a_5 = -0.00392$ ,  $a_6 = 0.1$

Ya transformados y convertidos las unidades de las variables y parámetros, se capturo los modelos de fotosíntesis neta en el ambiente MATLAB-Simulink, para que este ejecutara la simulación.

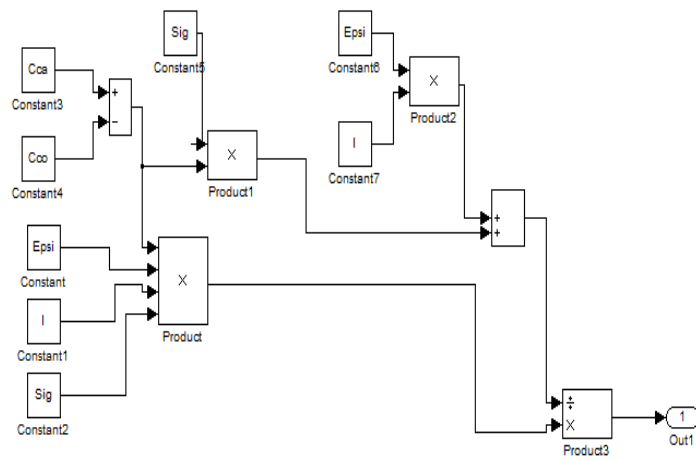


Figura 3.5. Programa de fotosíntesis neta para lechuga en el ambiente MATLAB (simulink.).

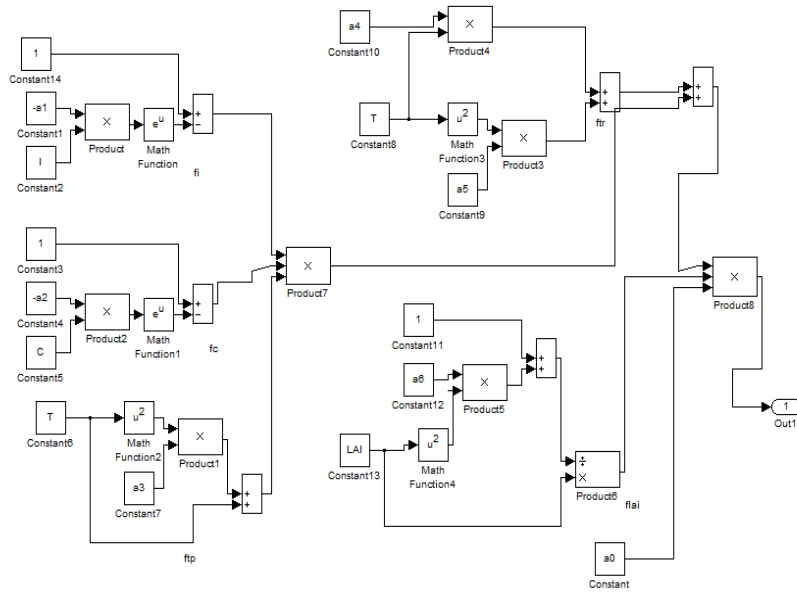


Figura 3.6. Programa de fotosíntesis neta para pepino, en ambiente MATLAB (simulink).

La calibración de un modelo significa encontrar los mejores parámetros, que te arrojen la  $r^2$  (coeficiente de determinación) más cercano a uno. Para encontrar estos parámetros se utilizó el programa SAS (Statistical Analysis System) en el procedimiento MODEL (OLS), el cual utiliza el procedimiento de mínimos cuadrados para regresiones no lineales.

### **3.6. Obtención de modelos de regresión para la variable CO<sub>2</sub> dentro del invernadero.**

En esta etapa se corrieron modelos de regresión lineal simple, cuadrática, cúbica y modelos de regresión múltiple para ambos cultivos, utilizando las variables monitoreadas para la calibración de los modelos de pepino y lechuga.

También se utilizaron en esta etapa los valores de las variables externas, las cuales fueron monitoreadas por los sensores externos y la estación meteorológica. Para los modelos de regresión múltiple se utilizó el procedimiento Stepwise para la selección de variables, el cual selecciona el mejor modelo que se ajuste a los datos.

Para concluir se realizó para cada cultivo un análisis de correlación canónica, esta es una técnica de análisis multivariado, cuyo objetivo es explicar la relación entre dos grupos de variables, usando un pequeño número de combinaciones lineales para cada grupo, buscando que exista la correlación más alta posible entre dichos grupos. El CANCECORR como se le llama se basa en la estimación de componentes de una matriz de correlación, que incluye dos grupos

de variables: a) P variables predictoras (independientes) y b) Q variables criterio (dependientes).

Para el caso del cultivo de la lechuga y el pepino en condiciones de invernadero se tenía el interés de saber la relación que existe entre el CO<sub>2</sub> exterior y el CO<sub>2</sub> del interior del invernadero. Se sabe que cada una de estas variables está influenciada por otras variables.

Para el cultivo de la lechuga se propusieron los dos grupos de variables de la manera siguiente:

**I. Variables predictivas (independientes) para el CO<sub>2</sub> externo.**

- a. Velocidad del viento exterior (VV)
- b. Humedad relativa exterior (HR<sub>ext</sub>)
- c. Radiación solar exterior (R<sub>ext</sub>)
- d. Temperatura exterior (T<sub>ext</sub>)

**II. Variables criterio (dependientes). CO<sub>2</sub> dentro del invernadero**

- a. CO<sub>2</sub> fijado por la planta (CO<sub>2</sub> fij)
- b. Radiación solar dentro del invernadero (R<sub>inv</sub>)
- c. Humedad relativa dentro del invernadero (HR<sub>inv</sub>)
- d. Temperatura del aire dentro del invernadero (T<sub>inv</sub>)

Para el cultivo del pepino se propusieron los siguientes grupos de variables

## **I . Variables predictivas (independientes) CO<sub>2</sub> exterior**

- a. Temperatura exterior (  $T_{ext}$  )
- b. Humedad relativa exterior (  $HR_{ext}$  )
- c. Radiación solar Exterior (  $R_{ext}$  )

En este caso no se tomo las mismas variables que la de la lechuga ya que el procedimiento stepwise no arrojó significancia para tales variables.

## **II. Variables criterio (dependientes) CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero.**

- a. Radiación fotosintéticamente activa (PAR inv)
- b. temperatura en el interior del invernadero (  $T_{inv}$  )
- c. Índice de área foliar (LAI)
- d. Humedad relativa dentro del invernadero (  $HR_{inv}$  )
- e. CO<sub>2</sub> fijado por la planta (CO<sub>2</sub> fij)

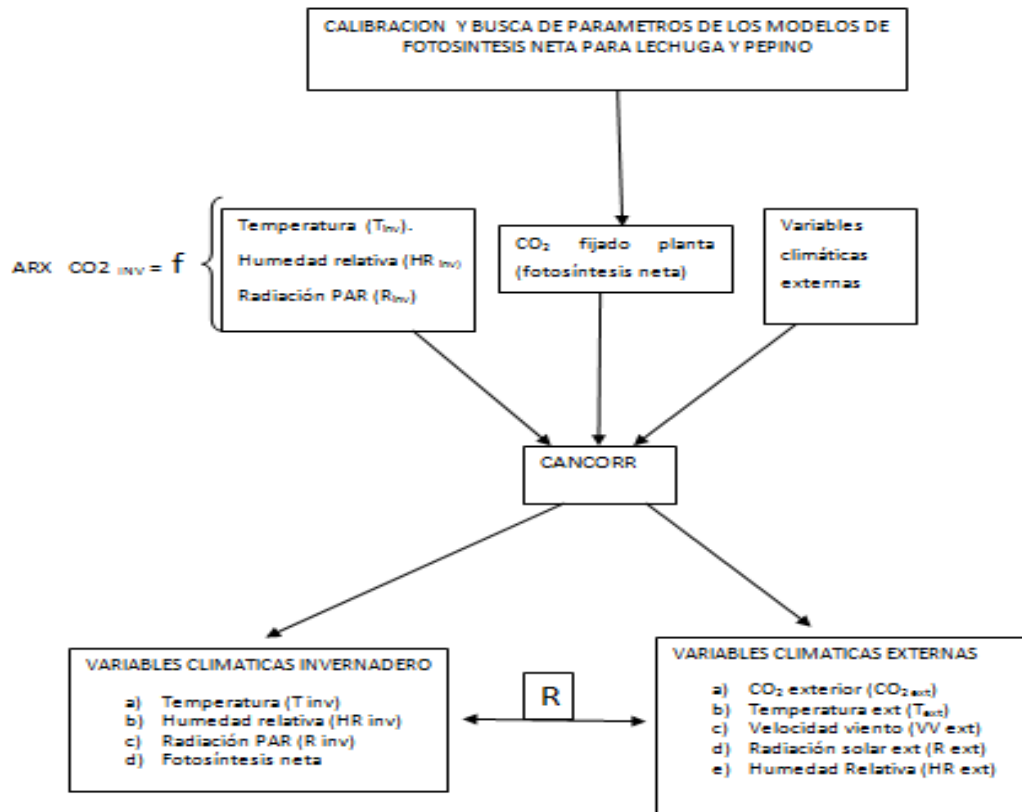


Figura. 3.7. Secuencia esquemática de la metodología, utilizada para la obtención de modelos.



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación se exponen los resultados obtenidos en la calibración de los modelos mecanicistas de fotosíntesis neta tanto para lechuga, como para el cultivo del pepino. Posteriormente se presentan modelos de tipo caja negra (ARX), para predecir la cantidad de CO<sub>2</sub> al interior del invernadero.

### 4.1 Calibración del modelo de fotosíntesis neta para lechuga.

Para obtener los mejores parámetros de la función de fotosíntesis neta en lechuga se utilizó el paquete estadístico SAS, utilizando el procedimiento MODEL (OLS). A continuación se presentan los resultados obtenidos en el cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Resumen de errores residuales por el método MODEL (OLS) no lineal

Modelo	Grados libertad modelo	Grados de libertad del error	Suma de cuadrados del error	Suma de cuadrados medios del error	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustada
$p\{I, C_{ca}\} = \frac{\varepsilon I \sigma (C_{ca} - C_c)}{\varepsilon I + \sigma (C_{ca} - C_c)}$	3	190	1.63 E <sup>-9</sup>	8.58 E <sup>-9</sup>	0.8906	0.8894

El análisis de errores residuales reporta que un 89.06 % de la variación del CO<sub>2</sub> fijada por la planta de lechuga es explicada por el modelo el cual incluye las variables independientes: Radiación fotosintéticamente activa (I) y la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero (C<sub>ca</sub>), lo que da una gran confianza en el modelo de predicción.

El modelo inicialmente fue corrido con los parámetros reportados por Seginer y colaboradores (1998), sin embargo para calibrar el modelo fue necesario estimar los parámetros que se adecuen a nuestros datos e intrínsecamente a nuestras condiciones climáticas. Por lo que a continuación se expone en el cuadro 4.2 los parámetros estimados para  $\epsilon$  (eficiencia fotosintética),  $\sigma$  (Conductancia foliar) y  $C_c$  (concentración de  $CO_2$  en el punto de compensación).

Cuadro 4.2. Parámetros estimados para el modelo de fotosíntesis neta del cultivo de lechuga, utilizando MODEL (OLS)

Parámetro	Estimación	Valores de parámetros reportados *	Error estándar aproximado	Valor de T	Aproximado $Pr >  t $
$\epsilon$	0.074181	0.04	0.00661	11.22	< 0,0001
$\sigma$	0.005812	0.0014	0.00170	3.42	0.0008
$C_c$	0.002392	0.0011	0.00128	1.87	0.0630

$Pr > |t|$  : Nivel de significancia

\*Seginer et al ., 1998

Se puede observar que el parámetro que más aporta al modelo es la eficiencia fotosintética ( $\epsilon$ ) ya que tiene una probabilidad menor de (0.0001), seguida de la conductancia foliar ( $\sigma$ ) que reporta una probabilidad de 0.0008 y por último la concentración de  $CO_2$  en el punto de compensación ( $C_c$ ) el cual rebasa el nivel de significancia de la prueba (0.05). Esto quiere decir que  $C_c$  en el modelo aporta una mínima parte en la explicación de la cantidad de  $CO_2$  fijada por la planta de lechuga bajo invernadero y en un sistema hidropónico.

Por lo tanto el modelo propuesto quedaría de la siguiente manera.

$$p\{I, C_{Ca}\} = \frac{(0.074181)I(0.005812)(C_{Ca} - 0.002392)}{(0.074181)I + 0.005812(C_{Ca} - 0.002392)}$$

El valor estimado de 0.074 181 para  $\epsilon$  (eficiencia fotosintética ), concuerda con los valores reportados por (Lambers, 1998) el cual indica que los valores típicos andan alrededor de 0.06 mol-CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> -fotón, en condiciones favorables y concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono; otros estudios indican valores de 0.078 mol -CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>- fotón para begonia (Giaglaras, 1995), para tomate se señalan valores de 0.081, con un coeficiente de absorción por las hojas de 0.062, a 350 μ mol mol<sup>-1</sup> de concentración de CO<sub>2</sub> (Heuvelink,1996 a); para pepino de 0.09 a 0.11 y para pimiento de 0.08 a 0.098 (Nederhoff y Vegter, 1994); o bien un promedio constante para especies C3 de 0.73 mol -CO<sub>2</sub>- mol<sup>-1</sup> - fotón como lo reporta (Giaglaras *et al*, 1995), aunque otros autores indican para este tipo de especies C3 un valor típico de 0.05 mol CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>- fotón (Lawlor, 1993).

Para el caso del parámetro conductancia foliar ( $\sigma$ ), se reportan valores entre 0.01 m s<sup>-1</sup> en cultivos de tomate (Stanghellini, 1987) y 0.025-0.05 m s<sup>-1</sup> en cultivos de campo abierto; también se señalan valores de 10 mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (0.24 m s<sup>-1</sup>) a velocidades de viento de 5 m s<sup>-1</sup> (Lambers *et al*, 1998); o valores de 0.2 a 4 mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (0.0048- 0.01 m s<sup>-1</sup>) a velocidades entre 0.5 y 2 m s<sup>-1</sup> (Lawlor, 1993); este último valor se acerca mucho al estimado en el modelo, si consideramos que en trabajos realizados sobre ventilación en este invernadero por Rico (2008) , se reportan velocidades entre 0 y 2 m s<sup>-1</sup>.

fotosíntesis neta lechuga

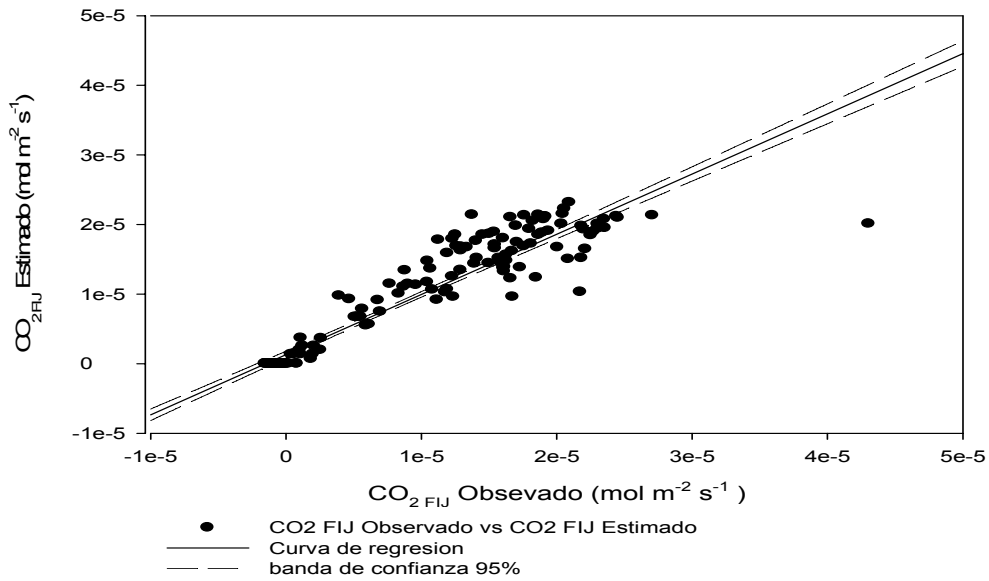


Figura 4.1.a Comparación de la cantidad de CO<sub>2</sub> fijada por la planta, medida por el fitómetro, contra la cantidad estimada por el modelo.

fotosíntesis neta lechuga

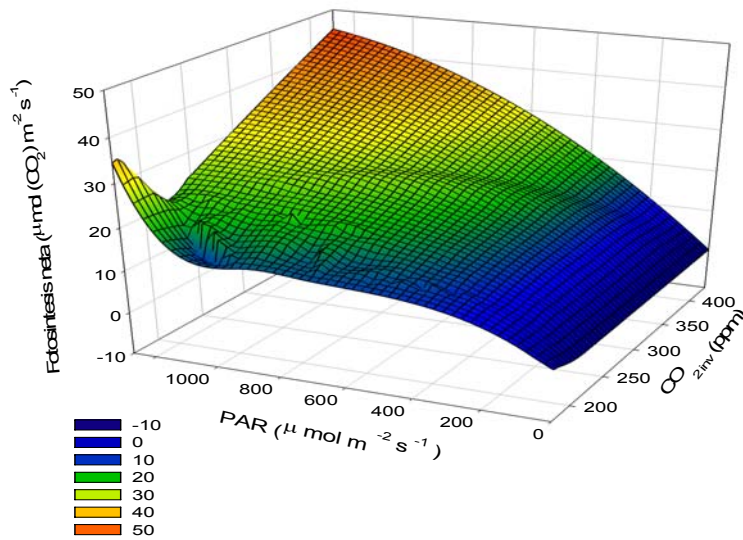


Figura 4.1.b. Sensibilidad de la fotosíntesis neta a las variables PAR y CO<sub>2</sub> inv para el cultivo de la lechuga.

La figura 4.1.b muestra la respuesta que tiene la fotosíntesis, a los incrementos de radiación y concentración de CO<sub>2</sub>, se observa que a concentraciones de 340 ppm, el incremento de la fotosíntesis únicamente está en función de la variable PAR. Esta combinación de valores óptimos para incrementar la fotosíntesis tal vez sea la óptima para la lechuga, como lo menciona Both y colaboradores (1997), ellos afirman que los rendimientos pueden incrementarse por dos vías una por iluminación adicional y enriquecimiento carbónico y otra buscando una combinación óptima entre la variable PAR y la concentración de CO<sub>2</sub>. Esta última es la más adecuada y la más viable de aplica en condiciones de ventilación natural, ya que con este argumento se podrían diseñar invernaderos que cumplieran con las condiciones óptimas de luz y CO<sub>2</sub>. El enriquecimiento de CO<sub>2</sub> en climas cálidos es muy difícil debido a que existe la necesidad de ventilar, sin embargo se proponen dos estrategia, la primera es realizar un enriquecimiento continuo sin ventilación durante las primeras horas de la mañana (7-10 h) y al inicio de la tarde (15-16.3 h) (Loslovich *et al.*, 1995), la otra alternativa es el enriquecimiento intermitente alternado con la ventilación varias veces por hora (Enoch, 1984).

#### **4.2. Modelos ARX (caja negra), para estimar la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero para el cultivo de lechuga.**

Los métodos auto regresivos permiten construir modelos usando la relación entre la entrada  $u(t)$  y la salida  $y(t)$  del sistema utilizando técnicas de identificación de parámetros, como los modelos auto regresivos con entrada externa (ARX) y los modelos auto regresivos de promedio móvil con entrada externa (ARMAX). Uchida *et al.* (2003).

Un modelo general ARX (Ljung. 1998-2005, Aguado y Martínez.2003 y López *et al.* 2007) con una entrada y una salida se describe mediante la ecuación en diferencias lineales:

$$Y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{na} y(t-na) =$$

$$b_1 u(t-nk) + b_2 u(t-nk-1) + \dots$$

$$+ b_{nb} u(t-nk-nb+1) + e(t)$$

Donde ,  $y(t)$  es la salida del modelo ARX para  $t= 1, t-1, \dots, t-na$ ;  $u(t)$ : es la entrada del modelo ARX para  $t=t-nk, t-nk-1, \dots, t-nk-nb+1$ ;  $na$  es el numero de pasos de tiempo de la salida en el pasado;  $nb$  es el numero de pasos de tiempo de la entrada en el pasado;  $nk$  es el retardo de la entrada  $u(t)$  con respecto a la salida  $y(t)$ ;  $e(t)$  es ruido blanco asociado con la variable de salida.

Un modelo para estimar la concentración de CO<sub>2</sub> en un invernadero se requiere más de una variable de entrada por lo que se debe ajustar el modelo ARX con una sola entrada y una sola salida (SISO) en un modelo ARX con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), las entradas y salidas están definidas por la ecuación.

$$A(q) y(t) = B(q) u(t) + e(t)$$

La simulación dinámica del CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero para el cultivo de lechuga se realizo utilizando el programa SAS. A continuación en el cuadro 4.3

se presentan los resultados de los mejores modelos obtenidos con regresiones lineales simples, cuadráticas y cúbicas.

Cuadro 4.3. Modelos de regresión para la variable CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero, con sus coeficientes de regresión, errores estándar de los parámetros y su nivel de significancia

Modelo ARX	R <sup>2</sup>	Error estándar de los parámetros estimados	Pr >  t
$\text{CO}_{2 \text{ inv}} = 236.49 - 0.7184(\text{CO}_{2 \text{ ext}}) + 0.00192(\text{CO}_{2 \text{ ext}})^2$ Modelo 1	0.8339	Ind=14.57	<0.0001
		Lin=0.08233	<0.0001
		Cua=0.00013	<0.0001
$\text{CO}_{2 \text{ inv}} = 235.44 - 1.1058(\text{HR}_{\text{ext}}) + 0.01751(\text{HR}_{\text{ext}})^2$ Modelo 2	0.59	Ind=20.48	<0.0001
		Lin=0.7555	0.1466
		Cua=0.00619	0.0057
$\text{CO}_{2 \text{ inv}} = 44.37 + 10.02(\text{HR}_{\text{ext}}) - 0.18083(\text{HR}_{\text{ext}})^2 + 0.00110(\text{HR}_{\text{ext}})^3$ Modelo 3	0.6330	Ind = 61.81	0.4746
		Lin= 3.49	0.0050
		Cua= 0.0611	0.0039
		Cub= 0.00033	0.0016
$\text{CO}_{2 \text{ inv}} = 269.27 - 1.8134(\text{CO}_{2 \text{ ext}}) + 0.00668(\text{CO}_{2 \text{ ext}})^2 - 5.5 \text{E}^{-6}(\text{CO}_{2 \text{ ext}})^3$ Modelo 4	0.8515	Ind= 16.94	<0.0001
		Lin=0.3354	<0.0001
		Cua=0.0014	<0.0001
		Cub= 1.64 E <sup>-6</sup>	0.0011

Ind: parámetro independiente; lin: parámetro lineal; Cua: Parámetro cuadrático; Cub: Parámetro Cubico; Pr > |t| : Nivel de significancia( valores >0.05 no son significativas),R<sup>2</sup> : Coeficiente de determinación.

Como se puede observar los mejores modelos que se adaptan al fenómeno son de tipo cuadrático y cubico, esta se explica por la naturaleza del fenómeno, el cual se comporta como una hipérbola. Otra característica a señalar es que el CO<sub>2</sub> externo es definitivamente un variable de entrada, que aporta significativamente al modelo.

A pesar de que en trabajos anteriores (López *et al.*, 2007) se menciona que para la simulación del CO<sub>2</sub> es necesario tener varias variables de entrada ( CO<sub>2 ext</sub>, T<sub>ext</sub>, VV, HR<sub>ext</sub>), el modelo cubico con el CO<sub>ext</sub>, tiene una buena aproximación al fenómeno estudiados, como se puede observar en el cuadro anterior donde se reporta una R<sup>2</sup> de 0.85.

Aun que se tiene conocimiento de que el fenómeno no se comporta como línea recta, se realizaron varias regresiones múltiples con el objetivo de encontrar algún modelo que explique el fenómeno estudiado.

Al inicio de la regresión se introdujeron todas las variables monitoreadas, que sabe tienen relación con el CO<sub>2</sub> dentro del invernadero, para este caso se utilizo el método stepwise del programa SAS, con el fin de obtener las mejores variables que influyeran en la explicación del fenómeno en estudio. El modelo se presenta en el cuadro 4.4 con sus respectivos estadísticos que validan el modelo.



Cuadro 4.4. Modelo de regresión múltiple para predecir la variable  $CO_{2\text{ inv}}$ , para cultivo de lechuga.

Modelo	$R^2$	$R^2$ parciales	Pr >  t
$CO_{2\text{ inv}} = 89.06 + 0.223 (CO_{2\text{ ext}}) + 895429 (CO_{2\text{ fij}}) + 0.9860 (HR_{\text{ inv}}) + 0.01337 (R_{\text{ ext}})$ Modelo 5	0.75	$CO_{2\text{ ext}} = 0.1318$	<0.0001
		$CO_{2\text{ fij}} = 0.0353$	<0.0001
		$HR_{\text{ inv}} = 0.5684$	0.0200
		$R_{\text{ ext}} = 0.0145$	<0.0001
		TOTAL = 0.75	0.0217

Nota: el  $CO_{2\text{ fij}}$  ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

Para este modelo en particular la variables que más aporta a la explicación del fenómeno en particular es la humedad relativa interior ( $HR_{\text{ inv}}$ ) con un 56.84 %, seguida del  $CO_2$  exterior ( $CO_{2\text{ ext}}$ ) con 13.18%, el  $CO_2$  fijado por la planta ( $CO_{2\text{ fij}}$ ) explica un 3.5% y por último la variable que menos aporta a la explicación del fenómeno es la radiación exterior ( $R_{\text{ ext}}$ ) con un 1.4%.

Una observación que hay que hacer sobre estos modelos, es que hay que tomar en cuenta la variables  $CO_{2\text{ fij}}$ , si el procedimiento stepwise lo selecciono es por que influye en la predicción del fenómeno, por lo que esta variable depende del cultivo y de su estado fenológico. No es posible generalizar con una formula de fotosíntesis neta, porque de esta manera se está incrementando los errores de la predicción. En la figura 4.2 se hace la comparación de los dos modelos con mejor ajuste ( $R^2$ ), con los datos observados en de  $CO_2$  dentro del invernadero.

## CO<sub>2</sub> Invernadero de lechuga

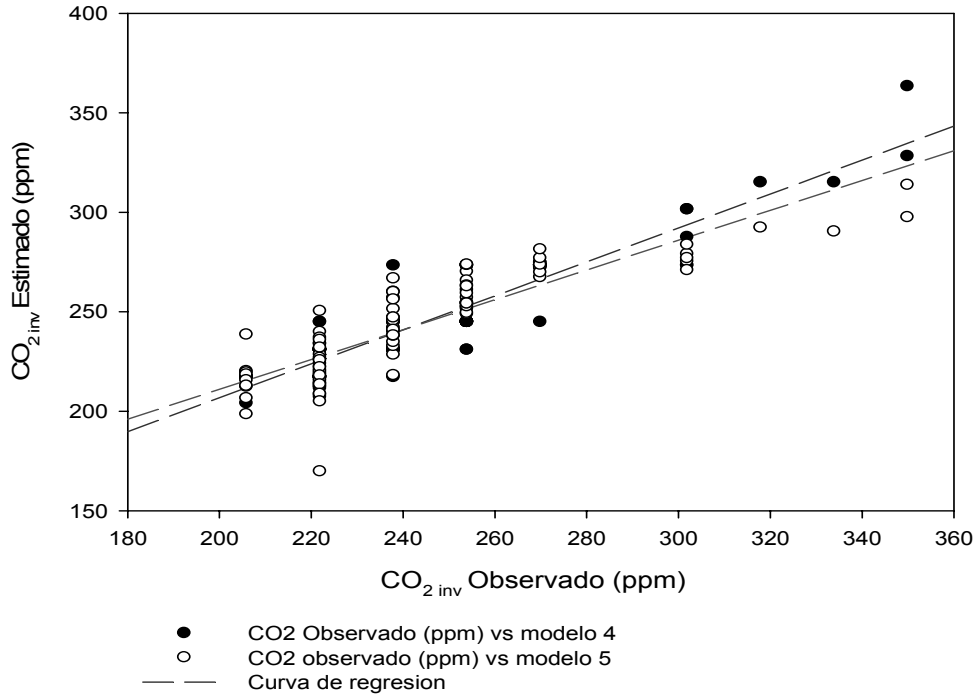


Figura 4.2 Comparación de dos modelos de regresión, con los concentraciones observados de CO<sub>2</sub> dentro del invernadero, en el cultivo de lechuga.

### 4.3 Análisis de correlación canónica para clima de invernadero (CANCORR).

El resultado del análisis canónico entre las variable del clima externo y las variables del clima del invernadero arrojan la siguiente variable canónica.

$$\text{Clima Inv (V1)} = 0.8608 (\text{CO}_{\text{fij}}) - 0.7268 (\text{CO}_{2 \text{ innv}}) + 0.7728 (\text{R}_{\text{innv}}) - 0.99 (\text{HR}_{\text{innv}}) + 0.9649 (\text{T}_{\text{innv}}).$$

Los valores de correlación canónica de las variables del clima del interior del invernadero se presenta en el cuadro siguiente.

Cuadro 4.5. Correlaciones entre clima del invernadero y sus variables canónica.

Variable climática del invernadero	Variable canónica del interior invernadero (V1)
CO <sub>2</sub> fijado planta (CO <sub>2</sub> <sub>fij</sub> )	0.8608
CO <sub>2</sub> Interior del Invernadero (CO <sub>2</sub> <sub>inv</sub> )	-0.7268
Radiación solar invernadero (R <sub>inv</sub> )	0.7728
Temperatura Invernadero (T <sub>inv</sub> )	0.9649
Humedad Relativa invernadero (HR <sub>inv</sub> )	-0.9979

Se puede apreciar que las variables que más influyen en el clima del invernadero son la temperatura (0.9649) y la humedad relativa (-0.9979), estas dos variables son las que hay que tomar en cuenta para realizar un buen manejo de control climático. La variable CO<sub>2</sub> fij, a pesar de tener un correlación alta, no es posible manejarla ya que va depender del cultivo establecido en el interior del invernadero.

Por otra parte también es importante saber cómo las variables del clima exterior influyen en el clima interior del invernadero, para lo cual en el siguiente 4.6 cuadro se presenta los resultados de la correlación canónica.

Cuadro 4.6. Correlación entre Variables de clima exterior y la variable canónica de clima de invernadero.

Variabes del clima exterior	Variable canónica (V1)
Temperatura exterior ( $T_{ext}$ )	0.8456
Velocidad viento ext (VV)	0.4823
Radiación Solar ext ( $R_{ext}$ )	0.5681
CO <sub>2</sub> del exterior (CO <sub>2 ext</sub> )	-0.4523
Humedad Relativa (HR <sub>ext</sub> )	-0.9660

Se observa en el cuadro anterior que de nuevo las variables que tiene mayor influencia en el clima del invernadero es la temperatura (0.8456) y la humedad relativa (-0.9660), de nuevo estas variables hay que tenerlas en cuenta, cuando sus condiciones en el exterior no sean las adecuadas para los cultivos de invernadero. Por último el análisis de redundancia canónica reporta que el clima del invernadero en condiciones de ventilación natural está influenciada por un 73.56 % por el clima del exterior, la otra parte está influenciada por las variables internas del invernadero que dependen del cultivo y su manejo.

#### **4.4. Calibración del modelo de fotosíntesis neta para el cultivo de pepino.**

El resultado del ajuste del modelo empírico del cultivo del pepino se expone en el cuadro siguiente. El ajuste se llevo a cabo utilizando el paquete estadístico SAS, en el modo MODEL (OLS).

Cuadro 4.7. Análisis de residuales para el modelo de fotosíntesis neta para el cultivo del pepino, utilizando MODEL (OLS)

Modelo	Grados libertad modelo	Grados de libertad del error	Suma de cuadrados del error	Suma de cuadrados medios del error	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustada
$P_{net} = a_0[f_I(I)f_C(C)f_{TP}(T) + f_{TR}(T)]f_L(LAI)$	7	232	732.9	3.1580	0.9476	0.9462

El modelo propuesto para el cultivo de pepino, para estimar la fotosíntesis neta, se presenta en el cuadro anterior, esta función cuenta con siete grados de libertad, lo más relevante de enfatizar es el alto nivel de predicción de este modelo, como se puede notar en el coeficiente de determinación (0.9476). Esto quiere decir que 94.76 % de la variación de CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero cultivado con pepino, es explicada por el modelo que incluye las variables Intensidad de radiación PAR ( I ), CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero (CO<sub>2 inv</sub>) y Temperatura del aire al interior del invernadero ( T<sub>inv</sub>).

Los parámetros de este modelo fueron estimados con la paquetería SAS en el modo MODELO (OLS), los parámetros para esta función son adimensionales debido a que se trata de una función empírica. Los valores estimados para los parámetros se reportan en el cuadro 4.7.

Cuadro 4.8. Parámetros estimados para el modelo de fotosíntesis neta del cultivo de pepino cultivada en invernadero, utilizando MODEL (OLS)

Parámetro	Estimación	Valores de parámetros reportados*	Error estándar aproximado	Valor de T	Aproximado Pr>  t
a <sub>0</sub>	1.1457	2.63	0.2754	4.16	< 0,0001
a <sub>1</sub>	0.003748	0.00196	0.000406	9.24	<0.0001
a <sub>2</sub>	1.3894	0.00370	0.0		.
a <sub>3</sub>	0.001877	-0.0191	0.00850	0.22	0.8253
a <sub>4</sub>	0.313891	-0.0448	0.1611	1.95	0.0526
a <sub>5</sub>	-0.02037	-0.00392	0.00981	-2.08	0.0390
a <sub>6</sub>	0.33389	0.1	0.0645	5.18	<0.001

Pr> |t| : nivel de significancia .  
 \* Klaring *et al.*, 2007

Como se puede observar los parámetros que mejor fueron ajustados son a<sub>0</sub>, a<sub>1</sub> y a<sub>6</sub> los cuales son estimados con un nivel de significancia menor de 0.0001, siguiéndole los parámetros de a<sub>5</sub> y a<sub>4</sub>, en cuanto a los demás parámetros superan el nivel de significancia preestablecido de 0.05, esto quiere decir que hay que tomarlas con mucha reserva.

El modelo de pepino para fotosíntesis neta queda como sigue.

$$P_{ney} = 1.1457 \left[ \frac{(1 - e^{-0.003748(I)})(1 - e^{1.3894(C)})(T - 0.001877 T^2) + (0.313891 T - 0.02037 T^2)}{1 + 0.33389 LAI^2} \right]$$

La ventaja de este modelo es que no se necesita de aparatos sofisticados para predecir la cantidad de  $\text{CO}_2$  que es fijada por el cultivo, y son modelos que nos pueden dar pauta para saber cuánto de  $\text{CO}_2$  está fijando la planta, para reponerla por medios artificiales o por medio de alguna modificación a la estructura del invernadero.

Este modelo ya fue probado en Europa como lo indica Klaring y colaboradores (2007), para el cultivo del pepino, y ayudó a incrementar el rendimiento hasta en un 35%. En la figura 4.3 se hace la comparación del modelo propuesto con los valores de fotosíntesis neta observados en el cultivo del pepino.

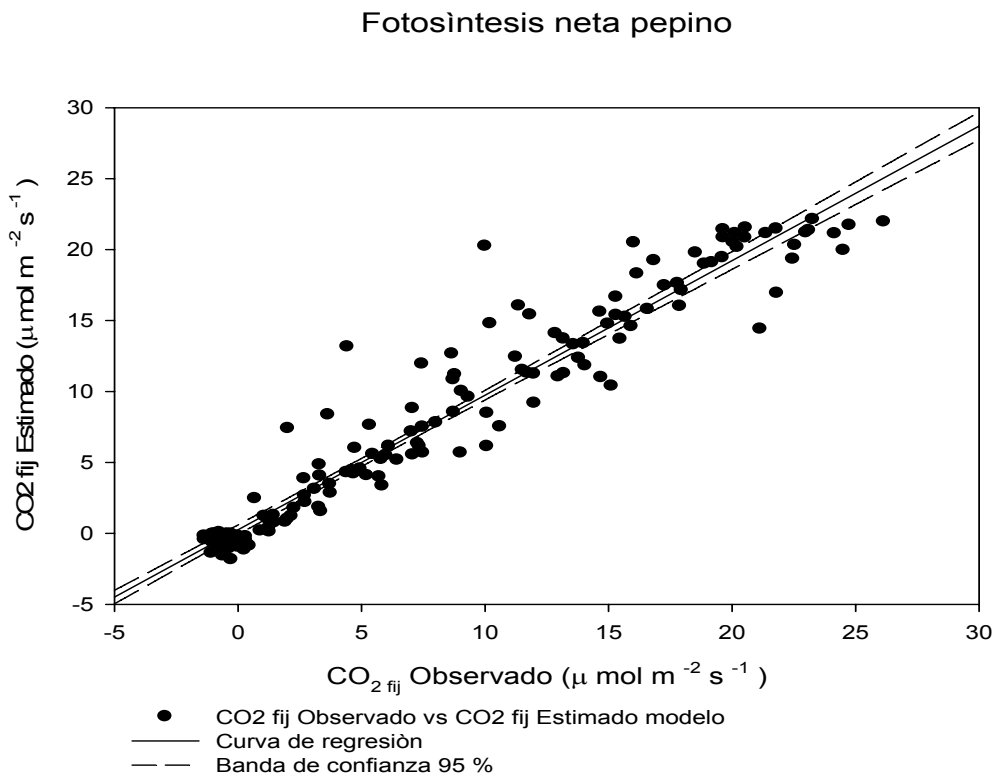


Figura 4.3. Comparación entre los valores de fotosíntesis neta observados y los estimados por el modelo.

Este modelo incluye en sus variables de entrada la radiación PAR, la temperatura del aire dentro del invernadero, el índice de área foliar y la concentración de CO<sub>2</sub> dentro del invernadero, por lo que es importante visualizar como se da la relación de estas variables con la fotosíntesis neta. En la figura 4.4, 4.5 , 4.6, y 4.7 se señalan estas relaciones.

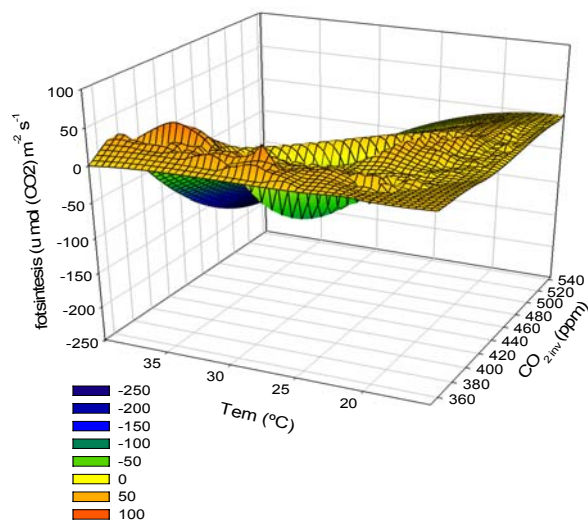


Figura 4.4. Sensibilidad de la fotosíntesis neta con la variable temperatura y concentración de CO<sub>2</sub> invernadero, en cultivo de pepino



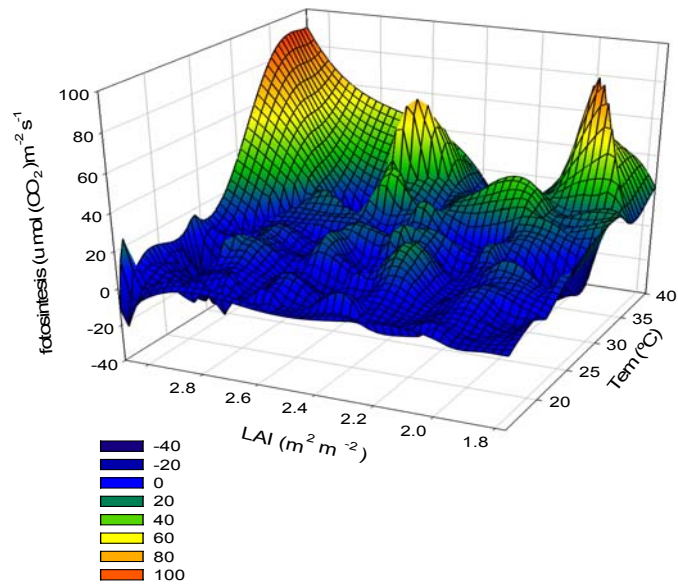


Figura 4.5. Sensibilidad de la fotosíntesis neta en pepino, con la variable LAI y la Temperatura del invernadero.

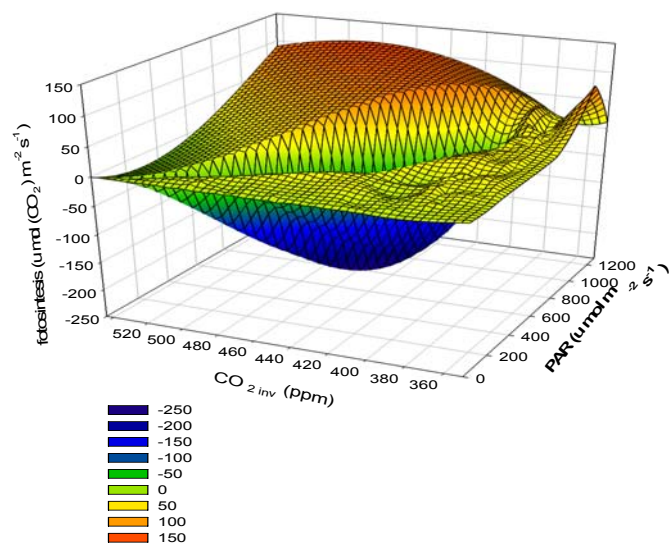


Figura 4.6. Sensibilidad de la fotosíntesis neta en pepino, a las variables PAR y a la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero.

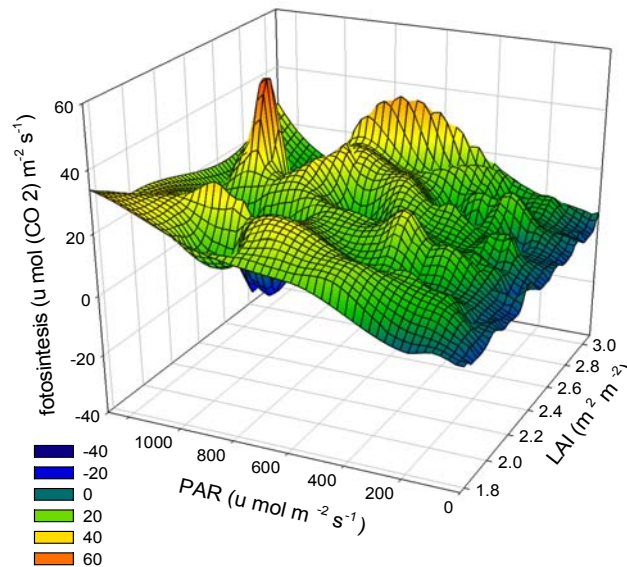


Figura 4.7. Sensibilidad de la fotosíntesis neta en pepino, a las variables LAI y PAR.

En la figura 4.4 se observa que la mayor fotosíntesis se da a temperatura mayor a 35 °C y con concentraciones de CO<sub>2</sub> que andan en el rango de 360 a 400, se nota que a concentración mayor de CO<sub>2</sub> y a altas temperaturas se da una declinación de la fotosíntesis. Esto se debe a que a altas temperaturas la reacción de oxigenación de la enzima rubisco incrementa más que la reacción de carboxilación, y la fotorespiración viene a ser proporcionalmente más importante. Esto es parcialmente causado porque la solubilidad del CO<sub>2</sub> disminuye más acentuadamente que la solubilidad del O<sub>2</sub>, además la temperatura ejerce efecto sobre las propiedades cinéticas de rubisco, por lo que la fotosíntesis neta declina a altas temperaturas (Lawlor, 1993; Lambers *et al.*, 1998).

La figura 4.5 muestra como la mayor fotosíntesis se da a temperaturas entre 30 y 35 °C y va incrementando conforme incrementa también la LAI, esto se

debe a que mientras más se incrementa el área foliar, se absorbe mayor cuantos luminosos y la actividad fotosintética se incrementa (Marcelis *et al.*, 1998).

En la figura 4.6 se observa que la radiación es proporcional a la actividad fotosintética, sin embargo se puede notar que la concentración de CO<sub>2</sub> en los rangos entre 380 a 440 ppm, son los que proporcionan mejor fotosíntesis. Esta respuesta de la planta también va depender del factor de eficiencia fotosintética (rendimiento cuántico fotoelectroquímico) el cual es característico de cada especie, en pepino se reporta de 0.09 a 0.11 mol-CO<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup>-fotón (Nederhoff y Vegter, 1994).

La figura 4.7. Únicamente comprueba lo ya señalado por muchos autores, la proporcionalidad del índice de área foliar y la PAR, con la fotosíntesis, se nota como a medida que va incrementando la LAI y la PAR se incrementa la fotosíntesis en la planta (Lambers *et al.*, 1998).

#### **4.5. Modelos ARX (caja negra), para estimar la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero para el cultivo de pepino.**

Los modelos ARX, que se obtuvieron para pepino, fueron obtenidos mediante regresiones lineales y múltiples, son funciones empíricas que nos modelan con un grado de nivel de cofinancia del 95%. Estas tienen la ventaja de poder ser generadas con los datos del experimento. En el siguiente cuadro se presentan algunas de los mejores modelos obtenidos.

Cuadro 4.9. Modelos de regresión para la variable CO<sub>2</sub> en el interior del invernadero, con sus coeficientes de determinación, errores estándar de los parámetros y su nivel de significancia

Modelo ARX	R <sup>2</sup>	Error estándar de los parámetros estimados	Pr >  t
$CO_{2\text{ inv}} = 4630.4 - 591.48(T_{\text{ext}}) + 27.32(T_{\text{ext}})^2 - 0.419(T_{\text{ext}})^3$ Modelo 1	0.6345	Ind=718.68	<0.0001
		Lin=113.12	<0.0001
		Cua=5.86	<0.001
		Cub= 0.10	<0.0001
$CO_{2\text{ inv}} = 881.22 - 3.26(CO_{2\text{ ext}}) + 0.00499(CO_{2\text{ ext}})^2$ Modelo 2	0.6716	Ind=261.31	<0.0009
		Lin=1.14	0.0047
		Cua=0.00125	< 0.0001
$CO_{2\text{ inv}} = 15792 - 102.05(CO_{2\text{ ext}}) + 0.222(CO_{2\text{ ext}})^2 - 0.0001581(CO_{2\text{ ext}})^3$ Modelo 3	0.7236	Ind = 2327.24	<0.0001
		Lin= 15.37	<0.0001
		Cua= 0.0337	<0.0001
		Cub= 0.00002	<0.0001
$CO_{2\text{ inv}} = 229 - 54 + 9.77(HR_{\text{inv}}) - 0.1963(HR_{\text{inv}})^2 - 0.00124(HR_{\text{inv}})^3$ Modelo 4	0.6762	Ind=40.48	<0.0001
		Lin=2.25	<0.0001
		Cua=0.0379	<0.0001
		Cub= 1.9 E <sup>-4</sup>	0.0011

Ind: parámetro independiente; lin: parámetro lineal; Cua: Parámetro cuadrático; Cub: Parámetro Cubico; Pr > |t| : Nivel de significancia (valores >0.05 no son sig), R<sup>2</sup> : Coeficiente de determinación.

El modelo de regresión múltiple para estimar la concentración de CO<sub>2</sub> dentro del invernadero es el siguiente.

Cuadro 4.10. Modelo de regresión múltiple para predecir la variable  $CO_2_{inv}$ , para cultivo de pepino.

Modelo	$R^2$	$R^2$ parciales	Pr >  t
$CO_2 = 93.56 + 1.237 (CO_2_{ext}) - 13.19 (LAI) - 3.252 (T_{inv}) - 2.9737 (CO_2_{fij}) - 1.42 (HR_{ext}) + 0.0599 (R_{ext})$ Modelo 5	0.808	$CO_2 = 0.6524$	<0.0001
		$CO_2_{fij} = 0.1020$	<0.0001
		$HR_{ext} = 0.0220$	<0.0001
		$LAI = 0.0128$	0.0002
		$R_{ext} = 0.0088$	0.0017
		$T_{inv} = 0.0105$	0.0005

Tanto en las regresiones lineales simples como en las múltiples con mayor  $R^2$  se nota que el  $CO_2$  del exterior es el que mayor explica el contenido del  $CO_{2inv}$ . En la regresión múltiple tiene una explicación del 65.24, mientras que las otras variables se quedan muy por debajo. Tomando en cuenta que se trata de variables que por su naturaleza son muy fluctuantes, el valor de  $R^2$  es muy bueno, por lo que este modelo explica en un 80% la fluctuación de  $CO_2$  dentro del invernadero. La elevada correlación que existe entre el  $CO_2$  del exterior y el  $CO_2$  del interior del invernadero, también es reportado por (López, 2008) en su trabajo, el reporta una predicción del 10.41%, dicho autor utiliza las mismas variables excepto una de más que es la velocidad de viento. Sin embargo el método stepwise descarto esta variable.

En la figura 4.7, se comparan los dos modelos ARX, con mayor coeficiente de regresión, contra el valor de  $CO_2$  medido en el invernadero.

### CO<sub>2</sub> inv para pepino

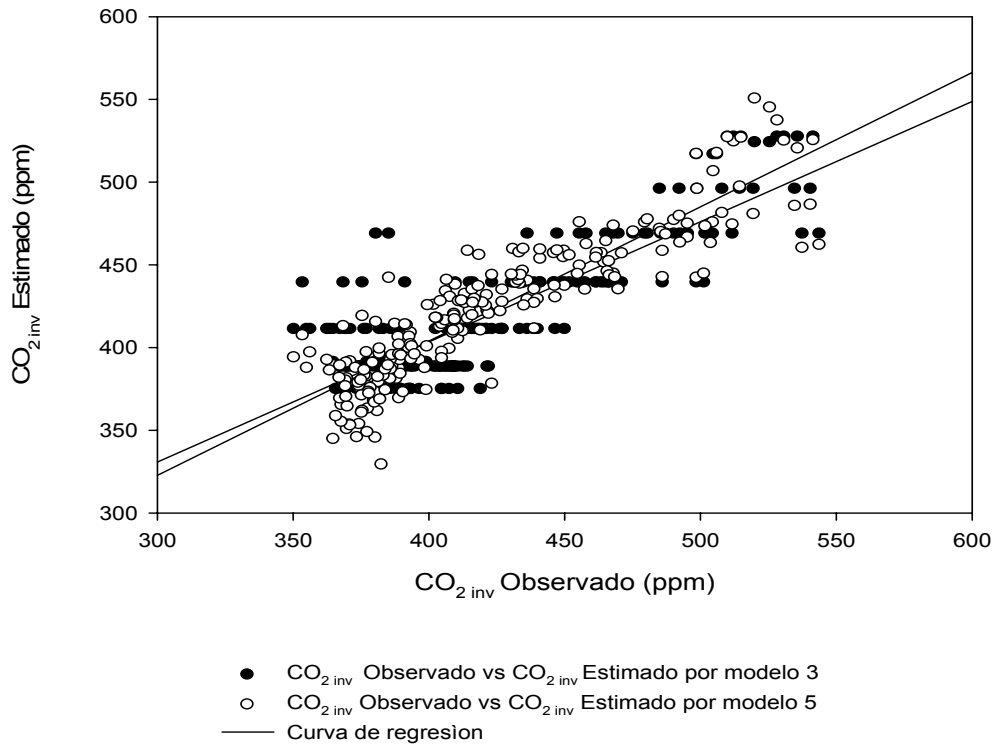


Figura 4.8. Comparación de dos modelos de regresión, para estimar la concentración de CO<sub>2</sub> dentro del invernadero.

## 5. CONCLUSIONES

Las fluctuaciones de CO<sub>2</sub> en el invernadero de lechuga, están directamente influenciadas por la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y la concentración de CO<sub>2</sub> dentro del invernadero. A niveles mayores de 340 ppm el incremento de la fotosíntesis está en función de la PAR. La humedad relativa es la variable que influye más en el contenido de CO<sub>2</sub> del invernadero, según la regresión lineal múltiple ( $R^2$  parcial de 56.84), seguida de la variable CO<sub>2</sub> externa. La variable que mas predice el CO<sub>2</sub> del invernadero en una función cubica es el CO<sub>2</sub> externo ( $R^2 = 85\%$ ).

En el cultivo de pepino, la variable que mayor aporta a la explicación del CO<sub>2</sub> inv en la regresión múltiple es el CO<sub>2</sub> del exterior ( $R^2$  parcial de 0.6524) también esta misma variables es la que correlaciona mejor en la regresión lineal cubica, con  $R^2 = 0.72$ .

El modelaje de fenómenos tan complejos, como es el CO<sub>2</sub> dentro de los invernaderos, es ya una necesidad en los invernaderos mexicanos.

El modelo mecanicistas de fotosíntesis neta para lechuga, predijo con un 89% de certeza, la asimilación de CO<sub>2</sub> dentro del invernadero, mientras que el mejor modelo ARX lo predijo con un 85 %, ambos con un nivel de significancia de 0.05.

El modelo empírico probado para pepino explico un 94 % la variación de la fotosíntesis neta de este cultivo en nuestras condiciones climáticas, mientras que el mejor modelo ARX lo explico en un 80 %.

El análisis de correlación canónica indica que la temperatura y la humedad relativa dentro del invernadero son las variables que mejor correlacionan con las otras en el interior del invernadero, por lo que hay que tenerlas en cuenta en el momento que se quiera establecer un sistema de control climático. Esta relación inversamente proporcional se explica por las propiedades de los gases, ya que a mayor contenido de agua en el ambiente la temperatura disminuye.

El análisis de redundancia canónico indica que las variables climáticas dentro del invernadero son explicadas en un 73.56 % por las variables del clima exterior, la otra parte está influenciada por el cultivo y su manejo.

Los modelos mecánicos son una buena opción para ser utilizados en un programa de control climático, sin embargo sus costos son elevados para generarlos, ya que necesitan de investigaciones que avalen sus principios.

Para las condiciones de nuestro país, es importante iniciar con el manejo del control climático, y una buena opción es el uso de modelos ARX.

El conocimiento de las interacciones de las variables radiación Solar, Temperatura del aire, concentración del CO<sub>2</sub> dentro del invernadero, ayudan a entender las fluctuaciones de la fotosíntesis neta de los cultivos dentro del invernadero.



## 6. SUGERENCIAS.

Se recomienda que para darle continuidad a este trabajo, se realice el monitoreo de mas variables climáticas dentro del invernadero, como son temperatura del suelo, humedad del suelo y temperatura de las hojas, en todo el ciclo del cultivo, para tener un modelo más completo de las fluctuaciones del CO<sub>2</sub>. Es importante generar más modelos para nuestros cultivos, los cuales nos van a dar un entendimiento mejor del comportamiento de este, con relación a las variables climáticas.

Los modelos de simulación en todas las ramas de la ingeniería, han demostrado su eficiencia en la predicción de fenómenos muy complejo, que por su naturaleza son difícil de entender y resolver con las herramientas normales. EL clima entra dentro de estos fenómenos muy difícil de comprender y de modelar debido a que existen una infinidad de variables que influyen sobre su comportamiento. El clima en el interior de un invernadero a pesar de que es unos recintos cerrados, termodinámicamente es un sistema abierto en donde ocurre intercambio de energía, por lo que caracterizar este fenómeno es muy complicado. De los factores externos que más influyen en el clima de un invernadero son la radiación solar, la temperatura, la velocidad del viento, la humedad relativa y la Concentración de CO<sub>2</sub>. Este ultimo acapara nuestra atención, ya que es el sustrato que la planta utiliza, para desarrollar la fotosíntesis y crear sus reservas energéticas. EL conocimiento del comportamiento de esta variable dentro del invernadero, es de capital importancia, ya que conlleva a entender los factores que influyen para que la planta asimile más este compuesto y de esta manera incrementar su biomasa y su rendimiento agrícola. Una de las estrategias para conocer la dinámica del CO<sub>2</sub> dentro del invernadero es conocer cuánto es lo que fija o absorbe el cultivo (fotosíntesis neta), y como este CO<sub>2</sub> es repuesto por el

exterior , y que variables influyen para que este no baje a puntos críticos. Por lo que este trabajo tiene como objetivo validar modelos de fotosíntesis neta para el cultivo de lechuga y pepino, por otro generar modelos de regresión que expliquen las fluctuaciones del  $\text{CO}_2$  dentro del los invernaderos, con estos cultivos, para explicar cómo interactúan las variables que interviene en estos modelos.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, P., Meneses J. F., Gary, C. 2001. Tompouse: a Model of yield prediction for tomato crops. Calibration study for unheated plastic greenhouse, *Acta Horticulture* 519: 141-150.
- Bakker, J., G. Bot, H. Challa, and N. V. deBraak. 1995. *Greenhouse Climate Control: An Integrated Approach*. Wageningen Press. The Netherlands. 279 p.
- Bakker, J., G. Bot, H. Challa, and N. V. de Braak. 1995. *Greenhouse Climate Control: An Integrated Approach*. Wageningen Press. The Netherlands. 279 p.
- Boaventura-Cunha, J., A. E. B. Ruano, and C. Couto. 1996. Identification of greenhouse climate dynamic models. Sixth International Conference on computers in agriculture. Cancún, México. pp: 161-171
- Bot, G. P. A. 1983. *Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model*. PhD Thesis. Wageningen. The Netherlands. 240 p.
- Both A. J., Albright L. D. y langhans R.W., 1997. Considered management of daily PAR integratal and carbon dioxide of hydroponic lettuce production. *Acta Horticulture*, 456: 45-51.
- Castañeda, M. R., E.J. Ventura., R. R. Peniche y G. Herrera. 2007. Análisis y simulación del modelo físico de un invernadero bajo condiciones climáticas de la región central de Mexico. *Agrociencias*. 41:317-335.
- Challa, H. 1990. Crop growth models for greenhouse climate control. *Theoretical Production Ecology*, pp: 125-145.
- Dayan, E., Van Keulen, H., Jones, J. W., Zipori, I.; Shmuel, D.; Challa, H. 1993a . Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model. I. Description of the model. *Agricultural system* 43: 145-164.
- Dayan, E., Van Keulen, H., Jones, J. W., Zipori, I., Shmuel, D., Challa, H. 1993a . Development, calibration and validation of a greenhouse tomato growth model. II. Field calibration and Validation, *Agricultural Systems* 43: 165-183.
- De Koning, A.N.M. 1994. *Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach*. PhD thesis. Wageningen Agricultural University. Wagening. The Netherlands. 240 p.

- De Visser, C.L.M. 1994. ALCEPAS, an onion growth model based on SUCROS87: Development of the model. *Journal of Horticulture cultural Science*. 69: 501-518.
- Deltour, J., D. de Halleux, J. Nijskens, S. Coutisse, and A. Nisen 1985. Dynamic modelling of heat and mass transfer in greenhouses. *Acta Horticulturae* 174: 119-126.
- Enoch H. Z., 1984 1984. Carbon dioxide uptake efficiency in relation to crop intercepted.
- El siglo de Torreón, 06 de febrero de 2008. Nota periodística por Virginia Hernández.
- Heuvelink E. 1996. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. Ph. D. Thesis. Wageningen University. The Netherlands. 326 pp.
- INEGI. Marco Geoestadístico, 2000. Fuente [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)
- Ioslovich I., Seginerl., Gutman P. O. y Borshchevsky M., 1995. Sub-optimal CO<sub>2</sub> enrichment of greenhouses. *J. Agric. Engng Res.*, 60: 117-136.
- Gálvez, L. J., y J.A. Salinas. 1996. Sistemas de producción e incidencia ambiental del cultivo en suelos enarenados y en sustratos. Fundación Argentina- Visor distribuciones. 294 pp.
- Gary, C., Barczi, J.F., Bertin, N., Tchamitchian, M. 1995. Simulation of individual organ growth and development on a tomato plant: a model and a user-friendly interface. *Acta Horticulture*. 399: 199-205.
- Gary, C., Jones, J.W., Tchamitchian, M. 1998. Crop modeling horticulture: state of the art. *Science Horticulture* 74:3- 20.
- Giaglaras P., Baille M., Baille A. 1995. Net photosynthesis response to light and air CO<sub>2</sub> concentration of *Begonia xhiemalis*: whole plant measurements and modeling. *Scientia Horticulturae* 63:83-100.
- Gijzen H. 1995. Short term crop responses. In: *Greenhouse Climate control, an Integrated Approach*. Eds. Bakker, J.C., Bot G.P.A., Challa, H., van de Braak, N.J., Wageningen Press. pp. 16-35.
- Gijzen, H., Heuvelink, E., Marcelis, L.F.M., Dayan, E., Cohen, S., Fuchs, M., Challa, H. 1998. HORTISIM: a model for greenhouse crops and greenhouse climate, *Acta Horticulture* 456: 441-450.

- Heuvelink, E. 1996. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. PhD thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen. The Netherlands. 326 p.
- Jimenez, M.O. 1994. Invernaderos (Diseño, establecimiento y manejo) Antología. Subsecretaria de Educación e Investigación Tecnológica. México D.F.
- Jones, J. W., Dayan, E., Allen, L. H., Van Keulen H., Challa, H. 1991. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). Transaction of the ASAE 3(2): 663-672.
- Jones, J. W., Kening, A., Vallejos, C. E. 1999. Reduced State- variables tomato growth model. Transaction of the ASAE 42 (1): 255-265.
- | Kool, M. T. N.; De Koning, J. C. M. 1996. Analysis of rose crop production. Acta Horticulture 424: 79-86.
- Lambers H., Chapin S., Pons T. 1998. Plant physiological ecology. Springer-Verlag. 567 pp
- Lawlor D. 1993. Photosynthesis. Longman Scientific and Technical. 318 pp
- Ljung, L. 1999. System Identification. Theory for the User. Prentice Hall, New Jersey, USA. 609 p.
- LEIDLO (Dutch Agricultural Economics Research Institute). 1996. Holland Statistics. The Netherlands. 24 p.
- López, I., Rojano A., Ojeda W. y Salazar R. (2007). Modelos ARX para Predecir la Temperatura del Aire de un Invernadero: Una Metodología. Agrociencia 41; 181-192.
- López, C. I. L., B. vanThoor, y A. Rojano A. 2004. Modelos dinámicos mecanicista y empírico para predicción de la temperatura en un invernadero Mexicano. VI Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola. Noviembre 22-24. San José Costa Rica. 14 p.
- Marcelis, L. F. M. 1994b. Fruit and dry matter partitioning in cucumber. PhD thesis. Wageningen University. Wageningen, the Netherlands. 173p.
- Marcelis, L.F.M. 1994a. A simulation model for dry matter partitioning in cucumber. Annals of Botany 74: 43-52.
- Marcelis L.F.M., Heuvelink E., Goudriaan J. 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae* 74:83-111

- Nederhoff E.M., De Graaf R. 1993. Effects of CO<sub>2</sub> on leaf conductance and canopy transpiration rate of greenhouse grown cucumber and tomato. *Journal of Horticultural Science* 68:925-937.
- Nederhoff E.M., Vegter J.G. 1994. Canopy photosynthesis of tomato, cucumber and sweet pepper in greenhouses: measurements compared to models. *Annals of Botany* 73:421-427.
- Presnov, E.; Dayan, E.; Fuchs, M.; Plaut, Z.,; Matan, E. 2000 Rose Flowers production in greenhouse. *Acta Horticulture* 534: 335-341.
- Ramírez, A. J.A. 2005. Control Jerárquico multiobjetivo de crecimiento de cultivo bajo invernadero. Tesis de Doctorado. Universidad de Almería Escuela politécnica superior, Departamento de Ingeniería Rural.
- Robledo, De P, F y Martin, V. L.1981. Aplicación de los plásticos a la Agricultura. Editorial Mundi-prensa. Madrid, España.
- Seginer, I., Buwalda, F., Strateng, G. Van. 1998. Nitrate concentration in greenhouse lettuce: a modeling study. *Acta Horticulture* 456: 189-197.
- Seginer, I., Van Straten, G., Buwalda, F., 2000. Lettuce groth limited by nitrate suplyy. *Acta Horticulture* 507: 141-148.
- Stanghellini C. 1987. Transpiration of greenhouse crops: An aid to climate management. Ph. D. Thesis. Wageningen University. The Netherlands. 150 pp.
- Sun G., Zhao P., Zeng X., Peng S. 2001. Influence of elevated atmosferic CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis and leaf nitrogen partition in process of photosynthetic carbon cycle in *Musa paradisiaca*. *The Journal of Applied Ecology* 12:429-434.
- Sweeney, D. G; Hand, D. W., Slack, G.,Thornley, J. H.M. 1981. Modeling the growth of winter lettuce. In: *Mathematics in Plant Phisiology*. Rose, D.A.; Charles- Edwards, D.A. (Eds). Academic Press- London. 217-229.
- Uchida-Frausto, H., J. G. Pieters, and J.M. Deltour. 2003. Modelling greenhouse temperature by means of auto regressive models. *Biosystems Eng.* 84(2): 147-157.