

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

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

**TASAS DE VENTILACIÓN NATURAL EN DOS
INVERNADEROS MEDIANTE MODELOS TÉORICOS Y
TÉCNICA DE GASES TRAZADORES**

TESIS
QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA ORIENTACIÓN BIOSISTEMAS

PRESENTA:
DANIEL ESPEJEL TRUJANO



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

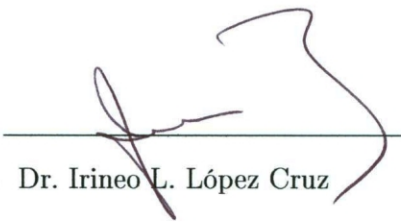
DICIEMBRE DE 2010
Chapingo, Estado de México

**TASAS DE VENTILACIÓN NATURAL EN DOS
INVERNADEROS MEDIANTE MODELOS TEÓRICOS Y
TÉCNICA DE GASES TRAZADORES**

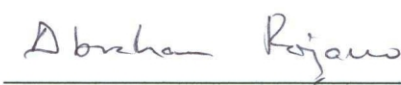
Tesis realizada por **Daniel Espejel Trujano** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA ORIENTACIÓN BIOSISTEMAS**

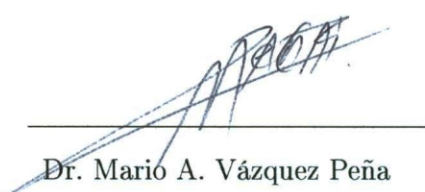
DIRECTOR:


Dr. Irineo L. López Cruz

ASESOR:


Dr. Abraham Rojano Aguilar

ASESOR:


Dr. Mario A. Vázquez Peña

AGRADECIMIENTOS

Por este medio deseo agradecer a las personas e instituciones que hicieron posible mi formación y la realización del presente trabajo, entre ellos:

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de maestría.

Al programa de posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, por brindarme la oportunidad de realizar los estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

Al Dr. Irineo L. López Cruz, que con su acertada dirección, consejo y sugerencias hizo posible la culminación de éste trabajo.

Al Dr. Abraham Rojano Aguilar y Dr. Mario A. Vazquez Peña, por el paciente trabajo de revisión y atinadas sugerencias para mejorar el mismo.

Al Dr. J. Armando Ramirez Arias por su apoyo económico y sus consejos en la realización de la fase experimental de este trabajo.

A mi familia y mi novia por su apoyo moral y confianza que depositaron en mi para la culminación de ésta meta.

A mis compañeros y amigos de IAUIA por la amistad y apoyo que me brindaron.

A todos los profesores de IAUIA que han contribuido con su esfuerzo a mi formación.

A todas aquellas personas que de manera desinteresada me brindaron su apoyo en la realización del presente trabajo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Nace el 25 de octubre de 1985 en la comunidad de San Luis Huexotla, Texcoco en el estado de México. Realiza sus estudios de preparatoria agrícola y licenciatura en la Universidad Autónoma Chapingo, obteniendo el título de Ingeniero en Irrigación en el año 2008.

Sus áreas de investigación son el diseño de sistemas de riego y la modelación en biosistemas.

TASAS DE VENTILACIÓN NATURAL EN DOS INVERNADEROS MEDIANTE MODELOS TEÓRICOS
Y TÉCNICA DE GASES TRAZADORES

NATURAL VENTILATION RATES IN TWO GREENHOUSES USING THEORETICAL MODELS AND
TRACER GAS TECHNIQUES

Daniel Espejel Trujano¹
Irineo L. López Cruz²

La mayoría de los invernaderos en México utilizan la ventilación natural como mecanismo principal de controlar el clima del invernadero. Las tasas de ventilación natural tienen un efecto directo en el intercambio de masa y energía con el ambiente exterior dependiendo de la velocidad del viento y la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del invernadero. La cuantificación de las tasas de ventilación es difícil porque estas dependen del efecto de variables tales como fluctuación de viento, resistencia de las ventanas al paso del aire y geometría del invernadero en el campo de presiones del viento sobre la estructura. El objetivo del presente trabajo fue determinar las tasas de ventilación natural en dos tipos de invernaderos mediante el método dinámico de técnica de gases trazadores. Se analizaron tres configuraciones de ventilación: ventanas laterales, ventanas cenitales y ventanas laterales y cenitales, además de las condiciones ausencia y presencia de cultivo. Se compararon las mediciones contra predicciones de modelos teóricos de la ventilación natural bajo los tres escenarios de ventilación y se analizó el efecto de la velocidad del viento sobre las tasas de ventilación. Los invernaderos estudiados tienen una orientación SO-NE y están ubicados en el campo experimental San Ignacio en la Universidad Autónoma Chapingo, en Chapingo, México. Un invernadero es de tipo capilla y el otro tipo sierra con 180 y 1110.2 m² de área de suelo respectivamente. Se diseñó un sistema cerrado para distribuir el gas y se utilizaron ventiladores para poder homogeneizarlo. Durante el periodo de medición, el invernadero tipo capilla estuvo libre de cultivo y en el tipo sierra se tuvo un cultivo de tomate. Debido a la disponibilidad del gas como del equipo de medición, el gas trazador utilizado fue el dióxido de carbono (CO₂). Para la estimación de los parámetros, de los modelos de ventilación se usó el algoritmo de mínimos cuadrados no lineales. Los resultados obtenidos mostraron que las tasas de ventilación son dependientes de la velocidad del viento y de la configuración de ventanas que se tenga. Las tasas de ventilación más altas se observaron cuando ambas ventanas laterales y cenitales estuvieron abiertas. Los modelos teóricos predijeron de manera aceptable las tasas de ventilación tomando en cuenta los valores de los estadísticos coeficientes de determinación y cuadrado medio de error, así como el comportamiento de la línea 1:1 entre predicciones y mediciones.

In Mexico, most greenhouses use natural ventilation as the main mechanism to control greenhouse climate. Natural ventilation rates directly affect mass and energy exchange with the outdoor environment, depending on wind velocity and the temperature differential between the inside and outside of the greenhouse. Quantification of the natural ventilation rates is a difficult task since they are affected by several variables such as wind fluctuation, window resistance to air flow and greenhouse geometry in the wind field pressures on the structure. The objective of this work was to determine the natural ventilation rates of two types of greenhouses using the dynamic method of the tracer gas techniques. Three ventilation configurations were analyzed: side-vents, roof-vents and side plus roof ventilation, as well as conditions without and with crop. The measurements were compared against predictions provided by theoretical ventilation models for the three ventilation scenarios and also the effect of the wind velocity on the ventilation rates was analyzed. The studied greenhouses are oriented SW-NE and are located at the San Ignacio experimental facilities of the University of Chapingo, in Chapingo, México. One greenhouse is chapel type and the other one is saw type, with an area of 180 m² and 1110.2 m², respectively. A closed system was designed in order to apply the tracer gas and fans used to make its distribution homogeneous. During the intervals of the measurements, the chapel type greenhouse was free of crop and the saw type greenhouse was occupied by a tomato crop. Because of the availability of both the tracer gas and the measurement equipment, carbon dioxide (CO₂) was used as tracer in this study. The nonlinear least squares algorithm was used to estimate the parameters of the ventilation models. The obtained results showed the dependence of greenhouse ventilation rates on wind speed and vent configuration. The highest ventilation rates were observed when both side-vents and roofs vents were open. Theoretical models predicted ventilation rates properly taking into account values of statistics determination coefficients and mean squared error, as well as the behavior of 1:1 line among predictions and measurements.

Palabras clave: Tasas de ventilación de invernaderos, método de la caída de la concentración, gases trazadores, modelos de ventilación.

Keywords: Greenhouse ventilation rates, concentration decay method, tracer gas, ventilation models.

¹Tesista

²Director

ÍNDICE GENERAL – *Continuación*

3.3. Diseño de los experimentos	43
3.4. Técnica de gases trazadores	45
3.5. Modelos de ventilación	47
3.6. Estimación de parámetros de los modelos	50
3.6.1. Coeficiente de descarga	51
3.6.2. Coeficiente debido al viento	52
3.7. Análisis de datos	53
Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
4.1. Efecto del viento sobre la tasa de ventilación	55
4.2. Estimación de las Tasas de Ventilación en el Invernadero Tipo Capilla	57
4.2.1. Ventilación Cenital	58
4.2.2. Ventilación Lateral	59
4.2.3. Ventilación Cenital y Lateral	60
4.3. Estimación de las Tasas de Ventilación en el Invernadero Tipo Sierra	61
4.3.1. Efecto de la fotosíntesis sobre la tasa de ventilación	62
4.3.2. Ventilación Cenital	64
4.3.3. Ventilación Lateral	66
4.3.4. Ventilación Cenital y Lateral	68
Capítulo 5. Conclusiones	70
Bibliografía	72
Apéndice A. Implementación de los modelos	79
Apéndice B. Función Tasa	82

ÍNDICE DE CUADROS

2.1. Parámetros empíricos para la estimación de la asimilación neta para un cultivo de tomate.	34
3.1. Sensores dentro y fuera del invernadero.	42
3.2. Coeficientes de descarga C_d determinados por diferentes autores .	52
3.3. Coeficientes debido al viento C_w determinados por diferentes autores	53
4.1. Valores promedios de los parámetros climáticos para el invernadero tipo capilla	54
4.2. Valores promedios de los parámetros climáticos para el invernadero tipo sierra	55
4.3. Resultados de las tasas de ventilación medida tomando en cuenta el efecto de las plantas	63

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Comparación de temperaturas durante varios días dentro y fuera de un invernadero localizado en Chapingo, México, durante el mes de Marzo de 2007	4
2.1. Esquema de la localización de las mediciones de las condiciones ambientales dentro y fuera del invernadero	10
2.2. Representación de los flujos de calor sensible y latente considerados para el balance de calor del aire dentro del invernadero	11
2.3. Esquema de la distribución de presión y de la velocidad del aire en ambos lados de la apertura.	19
2.4. Esquema del efecto estacionario y turbulento del viento.	21
2.5. Representación de la Ecuación 2.42 y la medición de sus parámetros	32
3.1. Dimensiones del invernadero tipo capilla.	41
3.2. Dimensiones del invernadero tipo sierra.	41
3.3. Esquema de la posición de los sensores.	42
3.4. Esquema de distribución del gas.	44
3.5. Configuración de los experimentos.	44
3.6. Esquema de la gráfica de la concentración del gas trazador con respecto al tiempo para el método dinámico.	46
3.7. Esquema de la gráfica del logaritmo natural de la concentración del gas trazador con respecto al tiempo para el método dinámico.	47
4.1. Efecto del viento sobre las tasas de ventilación para ambos invernaderos	56
4.2. Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para las ventanas cenitales para el invernadero tipo capilla.	58

ÍNDICE DE FIGURAS – *Continuación*

4.3. Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para las ventanas laterales para el invernadero tipo capilla.	59
4.4. Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para todas las ventanas para el invernadero tipo capilla.	60
4.5. Tasa de fotosíntesis para diferentes índice de área foliar	62
4.6. Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para las ventanas cenitales para el invernadero tipo sierra considerando el efecto del cultivo de tomate.	64
4.7. Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para las ventanas cenitales para el invernadero tipo sierra considerando el efecto del cultivo de tomate.	65
4.8. Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para las ventanas laterales para el invernadero tipo sierra considerando el efecto del cultivo de tomate.	66
4.9. Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para las ventanas laterales para el invernadero tipo sierra considerando el efecto del cultivo de tomate.	67
4.10. Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para todas las ventanas para el invernadero tipo sierra considerando el efecto del cultivo de tomate.	68
4.11. Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para todas las ventanas para el invernadero tipo sierra considerando el efecto del cultivo de tomate.	69

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La ventilación es el resultado de la interacción de diferencia de presiones creadas a través de la apertura de ventilación y las características de esta. Existen dos formas de clasificar la ventilación en un invernadero: la ventilación forzada y la ventilación natural. La ventilación forzada es cuando se actúa activamente en el movimiento del aire del invernadero utilizando una serie de ventiladores y la ventilación natural es cuando el viento natural renueva el aire dentro del invernadero por medio de las aperturas de ventilación o ventanas del invernadero.

La ventilación es una de las herramientas más importantes para controlar el clima dentro del invernadero. La ventilación tiene un efecto directo en el intercambio de masa y energía con el ambiente exterior. En consecuencia, un buen diseño de los sistemas de ventilación puede mejorar tanto el control climático como el uso de energía (Montero et. *al.*, 2010). El intercambio de aire entre el interior y el exterior del invernadero influye en las condiciones ambientales como la temperatura, humedad y dióxido de carbono. Durante el invierno, la ventilación debe remover el exceso de humedad y proporcionar un buen ambiente dentro del invernadero, mientras que durante el verano, la principal razón para la ventilación es para enfriar y remover la humedad dependiendo de las condiciones interiores del invernadero (Baptista et. *al.*, 1999).

La ventilación natural es el método más utilizado, económico y práctico para garantizar unas condiciones microclimáticas óptimas durante el verano e invierno (Pérez et. *al.*, 2003). La eficiencia de la ventilación natural depende de la velocidad del viento y la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del invernadero (Katsoulas et. *al.*, 2006).

Se han usado varias técnicas para la medición y predicción de las tasas de ventilación y de infiltración, como la técnica de gases trazadores, balance de energía y medición de diferencias de presiones entre el interior y el exterior (Baptista et. *al.*, 1999). La técnica de gases trazadores se basa en el balance de masas de los componentes naturales o artificiales del aire del invernadero (Boulard y Draoui, 1995). La técnica de balance de energía está basada en el hecho de que la ventilación elimina energía del invernadero como camino de prevención de temperaturas excesivamente altas (Baptista et. *al.*, 1999). La medición de diferencias de presiones entre el interior y el exterior está basado en que la ventilación tiene dos principales fuerzas motrices las cuales son el efecto térmico (o flotabilidad) y el efecto debido al viento (Kittas et. *al.*, 1997).

Aunque los fundamentos de la ventilación natural están claramente establecidos, todavía no es posible predecir en todos los casos cual va a ser la tasa de ventilación de un invernadero determinado, ni cuál será el movimiento de aire en su interior. Ello se debe a la dificultad del fenómeno en estudio, en el que influyen un buen número de factores entre los que pueden destacarse el carácter fluctuante del viento, la resistencia que oponen las ventanas al paso del aire, y el efecto de la geometría del invernadero (pendiente del techo, anchura de las naves, anchura

del invernadero, posición y forma de las ventanas, etc.) en el campo de presiones del viento sobre la estructura (Montero et. *al.*, 2010).

En México, desde 1990 diferentes proyectos de invernaderos, algunos ya no en operación, han sido construidos en todo el país. La tecnología y los diferentes tipos de estructuras de invernaderos son importados de Israel, Holanda, Canadá y España y adaptados a condiciones ambientales diferentes, con diferentes grados de éxito. La actual área bajo producción refleja la importancia de los diferentes ambientes utilizados, y aunque inicialmente los proyectos fueron construidos en áreas cercanas a los océanos, particularmente en Sinaloa, desde 1995, aproximadamente, se ha visto la expansión de la industria hacia las zonas más elevadas, donde se tiene un clima más moderado, mejores condiciones de luz, y menor presión por plagas y enfermedades (Steta, 1999).

Actualmente, la producción de hortalizas en invernadero se localiza en zonas desérticas del norte y centro del país, donde se presenta escasez de agua de riego. De acuerdo con la Asociación Mexicana de Productores de Hortalizas en Invernadero, la infraestructura de invernaderos ha tenido un gran crecimiento, en el año 2000 había aproximadamente 721 ha de superficie cultivada en invernaderos, en 2005 se incrementó a 3,214 ha y para el 2008 ya había 9,948 ha, mayormente con tecnologías alta y media, del cual más del 50 % se encuentran en Sinaloa y Baja California (SAGARPA, 2008). Esto se explica por la demanda de productos hortícolas de alta calidad de Estados Unidos, Canadá y el norte de Europa, principalmente durante los meses de invierno, cuando las condiciones de luz y temperatura limitan la producción agrícola en esos países (Zuñiga et. *al.*, 2004).

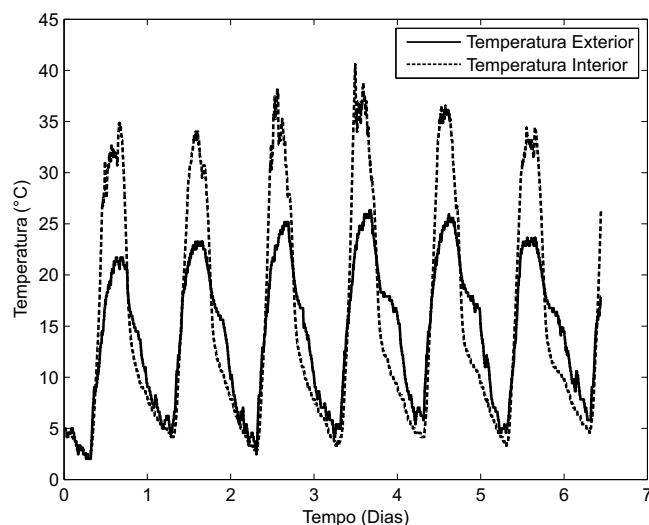


Figura 1.1: Comparación de temperaturas durante varios días dentro y fuera de un invernadero localizado en Chapingo, México, durante el mes de Marzo de 2007

Según SAGARPA (2008) el tomate y pimiento ocupan el 37.9 % y 16 % respectivamente, del volumen producido en invernadero, el pepino 10.8 %, ornamentales y melón un 2.8 % y forrajes y cítricos, bajo malla sombra principalmente, con un 32.6 %.

La mayoría de los invernaderos utilizan solo ventilación natural debido a que el sistema de ventilación forzada es costoso, y por tanto se tienen problemas sobre el control óptimo del clima del invernadero, como se muestra en la Figura 1.1 las temperaturas dentro del invernadero están más de 10°C por encima de la temperatura ambiente. Para mejorar estas condiciones lo ideal es renovar todo el aire que rodea a un cultivo intensivo en un invernadero, unas 45 veces en una hora, pero este óptimo es bastante difícil de conseguir, pues deberíamos de tener una gran superficie de ventanas y unas circunstancias climáticas exteriores óptimas (velocidad del viento).

Este trabajo tiene como objetivos: (1) medir las tasas de ventilación en dos invernaderos con dimensiones diferentes con el método dinámico de gases trazadores bajo tres condiciones de ventilación diferentes poniendo especial atención en la influencia del cultivo, (2) comparar los resultados obtenidos con la técnica de gases trazadores y los modelos teóricos, (3) estudiar la relación que existe entre las tasas de ventilación y la velocidad del viento.

Capítulo 2

REVISION DE LITERATURA

2.1. VENTILACIÓN EN INVERNADEROS

Existen dos formas de clasificar la ventilación en invernaderos de acuerdo a la forma en que se realiza la renovación del aire la cual es la ventilación forzada y la ventilación natural.

La ventilación forzada es aquella en la cual se actúa activamente en el movimiento del aire del invernadero, utilizando una serie de ventiladores.

La ventilación pasiva o natural en cambio, es aquella en la que se realiza una serie de aperturas o ventanas en el invernadero, y el viento natural que se produce en la zona en que se encuentre la explotación, va renovando el aire del invernadero.

La ventilación natural es el proceso de intercambio de aire cálido y húmedo del invernadero con el aire frío y seco del exterior de un invernadero. El flujo entrante y saliente del aire pasa a través de aperturas rectangulares de ventilación las cuales se encuentran uniformemente espaciados sobre el techo del invernadero así mismo en las paredes laterales del invernadero. Cuando las ventanas no están abiertas estas son cerradas con aletas las cuales están sujetas con bisagras a la pared, canaletas o a la cumbrera del invernadero. El flujo de aire que pasa a través de la apertura de ventilación depende de las características del flujo en la ventana y de la magnitud de la diferencia de presiones que es creada por ésta (Bailey, 2000).

La ventilación natural en un invernadero es inducida por los efectos del viento y la temperatura que afectan directamente a las condiciones ambientales tal como la temperatura, humedad y concentración de dióxido de carbono, por lo que es el principal mecanismo para el control del clima del invernadero (Kittas et. *al.*, 2002). La ventilación es importante para transportar el vapor de agua y otros gases como el dióxido de carbono (CO_2), y en verano es primordial para disminuir la temperatura, lo que influye de un modo determinante en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Nederhoff et. *al.*, 1985; Montero et. *al.*, 2010).

Durante el invierno, la ventilación debe remover el exceso de humedad y proporcionar un buen clima dentro del invernadero, mientras que durante la primavera, las principales razones para la ventilación son para enfriar y remover la humedad dependiendo de las condiciones en el interior (Baptista et. *al.*, 1999).

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

En segundo lugar, la falta de ventilación incide negativamente en la composición del aire interior, principalmente al producirse déficits en la concentración de CO_2 . Ello se debe a que la entrada de aire externo es la principal fuente de CO_2 de los cultivos en aquellos invernaderos que no cuentan con enriquecimiento

carbónico.

El tercer factor climático que queda afectado por la ventilación es la humedad. La falta de ventilación, sobre todo en los meses fríos, provoca excesos de humedad, favoreciendo la condensación en la cara interior de las cubiertas y el goteo sobre el cultivo. Esto se traduce en una disminución en la transmisión de radiación solar con la consecuente pérdida de producción. La humedad excesiva favorece el desarrollo de enfermedades criptogámicas y puede originar deficiencias minerales en los cultivos (Montero et. *al.*, 2010).

La ventilación en invernaderos se debe al flujo del viento por las ventanas y a la infiltración. El flujo de viento que pasa por las ventanas o también llamado tasas de ventilación se puede medir en el número de cambios de el volumen de aire del invernadero en cada hora (h^{-1}). Otra forma de medir las tasas de ventilación es en $m^3 s^{-1}$. Cuando las ventanas del invernadero están completamente cerradas la infiltración se debe a fugas de aire debido al viento a través de huecos dejados en las uniones de las estructuras como por ejemplo las hendiduras que se encuentran en la puerta de acceso (Bailey, 2000).

Diferentes técnicas han sido utilizadas para la medición de las tasas de ventilación e infiltración tal como la técnica de gases trazadores (Nederhoff et. *al.*, 1985; Boulard y Draoui, 1995; Kittas et. *al.*, 1996; Baptista et. *al.*, 1999; Bailey, 2000), y su predicción como la medición de diferencia de presiones (Boulard y Baille, 1995; Kittas et. *al.*, 1996, 1997, 2002; Baptista et. *al.*, 1999; Roy et. *al.*, 2002; Wang y Boulard, 2000; Katsoulas et. *al.*, 2006) y balance de energía (Fernández y Bailey, 1992; Dermati et. *al.*, 2001; Majdoubi et. *al.*, 2007). Recientemente se

ha utilizado CFD por sus siglas en ingles (Computacional Fluid Dynamics) para estudiar las tasas de ventilación en invernaderos (Romero, 2005; Romero et. *al.*, 2008, 2010; Flores, 2010).

2.2. MODELOS TEÓRICOS PARA VENTILACIÓN

2.2.1. Balance de energía

La técnica de balance de energía está basada en el hecho de que la ventilación elimina energía del invernadero como camino de prevención de temperaturas excesivamente altas (Baptista et. *al.*, 1999).

El principio básico del balance de energía de un invernadero se encuentra en el cálculo de la energía de entrada que es igual a la suma de la energía perdida y la energía transitoria contenida en el invernadero. La energía de entrada es el resultado principalmente de la absorción de la radiación de onda corta y larga. Puede ser estimada por la radiación neta R_{net} (Wm^{-2}) medida por un radiómetro neto instalado entre la cubierta del plástico y el cultivo (Figura 2.1). Esta radiación neta es absorbida en parte por el cultivo protegido $R_{A,v}$ (Wm^{-2}) y parte por la superficie del suelo del invernadero $R_{A,s}$ (Wm^{-2}), la vegetación y el suelo se denotan por subíndices v y s , respectivamente:

$$R_{net} = R_{A,v} + R_{A,s} \quad (2.1)$$

La radiación absorbida por el cultivo y el suelo contribuye al calentamiento del aire interior (denotado por el subíndice i) $q_{Sv,i}$ (Wm^{-2}) y $q_{Ss,i}$ (Wm^{-2}), para aumentar el contenido de vapor de agua en el aire interno $q_{Lv,i}$ y $q_{Ls,i}$ (Wm^{-2}), y para calentar la masa térmica del cultivo y del suelo (Figura 2.2).

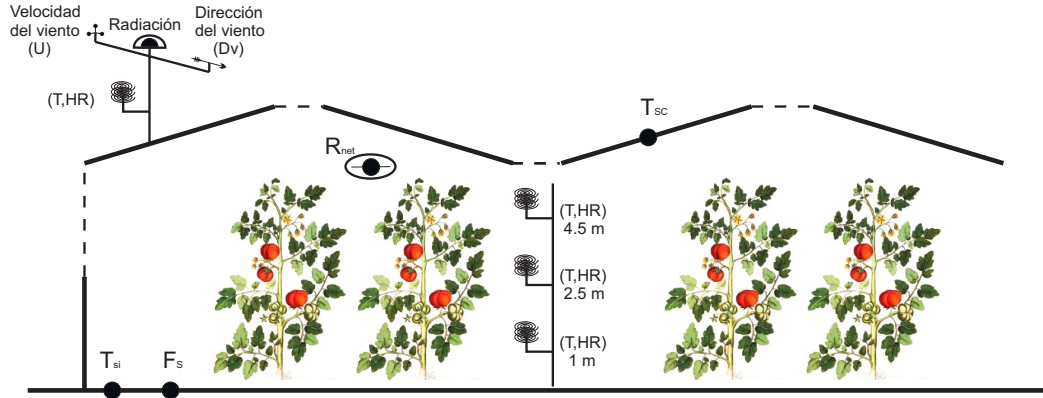


Figura 2.1: Esquema de la localización de las mediciones de las condiciones ambientales dentro y fuera del invernadero (3 m sobre el techo del invernadero).

El balance térmico del cultivo es:

$$R_{A,v} = q_{Sv,i} + q_{Lv,i} + \rho_v c_v l_v \frac{dT_v}{dt} \quad (2.2)$$

donde: $q_{Sv,i}$ (Wm^{-2}) es el intercambio de flujo de calor sensible entre el cultivo y el aire interior; $q_{Lv,i}$ (Wm^{-2}) es el intercambio de flujo de calor latente entre el cultivo y el aire interior; l_v (m) es la altura media del cultivo; ρ_v (kgm^{-3}) es la densidad del cultivo; c_v ($Jkg^{-1}K^{-1}$) es el calor específico del cultivo; T_v ($^{\circ}C$) es la temperatura del cultivo; y t (s) es el tiempo.

Similarmente, el balance térmico nocturno de la superficie del suelo es:

$$R_{A,s} = q_{Ss,i} + q_{Ls,i} + F_s + \rho_s c_s l_s \frac{dT_s}{dt} \quad (2.3)$$

donde: $q_{Ss,i}$ (Wm^{-2}) es el intercambio de flujo de calor sensible entre el suelo y el aire interior; $q_{Ls,i}$ (Wm^{-2}) es el intercambio de flujo de calor latente entre el suelo y el aire interior; l_s (m) es el espesor de la capa de la superficie de suelo; ρ_s (kgm^{-3}) es la densidad del suelo; c_s ($Jkg^{-1}K^{-1}$) es el calor específico del suelo; F_s

del tamaño de paso considerado en el balance de calor y del agua es más grande que 1 h (Kittas et. *al.*, 1995; Boulard et. *al.*, 1996). El balance de energía puede ser expresado como sigue:

$$R_{net} = q_{Si,e} + q_{Si,c} + q_{Si,w} + q_{Li,e} + F_s \quad (2.5)$$

donde el subíndice c denota cubierta.

Estimación de parámetros

Los principales términos del balance de energía representados en la Ecuación 2.5 se determinan como sigue:

El flujo de calor sensible extraído por la ventilación ($q_{Si,e}$) (Wm^{-2}) se considera proporcional a la diferencia de temperaturas (ΔT) ($^{\circ}C$) entre el interior y el exterior, multiplicado por la tasa de ventilación (G):

$$q_{Si,e} = K_s(T_i - T_e) \quad (2.6)$$

donde K_s (Wm^{-2}) es el coeficiente de transferencia de calor sensible dado por la ventilación y está dado por:

$$K_s = \rho_a c_p G / A_s \quad (2.7)$$

donde A_s (m^2) representa la superficie del suelo del invernadero; ρ_a (kgm^{-3}) es la densidad del aire; c_p ($Jkg^{-1}K^{-1}$) es el calor específico del aire a presión constante; G (m^3s^{-1}) es la tasa de flujo volumétrica.

El flujo de calor latente extraído por la ventilación ($q_{Li,e}$) se considera proporcional a la diferencia del contenido de vapor de agua dentro y fuera y la tasa de ventilación:

$$q_{Li,e} = K_L * \Delta H_A \quad (2.8)$$

donde H_A ($kgkg^{-1}$) es la diferencia de humedad absoluta entre el aire interior y exterior; K_L (Wm^{-2}) es el coeficiente de calor latente dado por la ventilación y está dado por:

$$K_L = \rho_a LG / A_s \quad (2.9)$$

donde L representa el calor latente de vaporización del agua en Jkg^{-1} . El flujo de calor sensible intercambiado por convección entre el aire interior y la cubierta del invernadero ($q_{Si,c}$) es considerado proporcional a la diferencia de temperaturas entre la temperatura de la cubierta plástica y la del aire interno:

$$q_{Si,e} = (A_c C_h / A_s) (T_c - T_i) \quad (2.10)$$

donde A_c y A_s (m^2) son el área de la cubierta y del suelo respectivamente; C_h ($Wm^{-2}K$) es el coeficiente de intercambio de calor convectivo entre el aire interno y la cubierta plástica; y T_c y T_i son, respectivamente, las temperaturas del aire interior y de la cubierta. Para convección natural y flujo turbulento C_h está dado por la siguiente relación (Wang y Deltour, 1996):

$$C_h = 1.759(T_c - T_i)^{0.333} \quad (2.11)$$

La pérdida total de calor sensible a través de las paredes ($q_{Si,w}$) puede ser estimado con la siguiente expresión:

$$q_{Si,w} = K\Delta T \quad (2.12)$$

donde K es el coeficiente de la perdida global de calor sensible a través de la cubierta plástica, considerado como proporcional a la velocidad del viento:

$$K = a + bu \quad (2.13)$$

donde u (ms^{-1}) es la velocidad del viento, a y b son constantes. Estas dos últimas constantes se determinan multiplicando la relación entre el área de ventanas y superficie del suelo A_v/A_s por los coeficientes encontrados por Baille *et. al.* (1983).

Después de substituir y reordenar las diferentes relaciones en la Ecuación 2.5, el flujo de ventilación G se deduce de distintas estimaciones o mediciones de parámetros:

$$G = \frac{A_S(R_{net} - F_s) - A_S[K\Delta T + (A_c/A_S)C_h\Delta T_c]}{\rho[C_p\Delta T + L\Delta H_A]} \quad (2.14)$$

donde ΔT_c ($^{\circ}C$) es la diferencia de temperaturas entre el aire interior y la cubierta plástica (Dermati *et. al.*, 2001; Majdoubi *et. al.*, 2007).

2.2.2. Medición de diferencias de presiones

Dos fenómenos crean una diferencia de presión que producen los flujos de ventilación, el hecho de que existe una diferencia de temperaturas entre el interior y exterior del invernadero la cual crea una diferencia de densidad y en consecuencia una diferencia de presión (comúnmente conocido como el efecto de flotabilidad), y el viento el cual crea una distribución de presión sobre la superficie del invernadero (Kittas et. *al.*, 1997; Bailey, 2000). Este último usualmente se divide en dos componentes, un estado estacionario y un efecto turbulento (Papadakis et. *al.*, 1996).

El flujo de aire a través de una apertura es causado por diferencia de presiones. La ecuación de Bernoulli generalmente es usada para describir la relación entre la caída de presión y la velocidad del aire a través de una apertura. Asumiendo que el aire es incompresible, tenemos:

$$\Delta P(y) = \frac{1}{2} \rho \zeta v^2(y) \quad (2.15)$$

donde $\Delta P(y)$ y $v(y)$ son respectivamente el perfil vertical de la caída de presión y la velocidad del aire a través de la apertura, ρ la densidad del aire y ζ el coeficiente de caída de presión. Definiendo C_d , el coeficiente de descarga de la apertura como:

$$C_d = \frac{1}{\zeta^{0.5}} \quad (2.16)$$

La distribución de la velocidad del aire $v(y)$ a través de la apertura puede ser deducido de Ecuaciones 2.15 y 2.16, conociendo ΔP :

$$v(y) = \frac{|\Delta P(y)|}{\Delta P(y)} C_d \left(\frac{2}{\rho} |\Delta P(y)| \right)^{0.5} \quad (2.17)$$

donde el signo de la relación $|\Delta|/\Delta P$ dada la dirección del flujo de aire $v(y)$ a través de la apertura. La tasa de flujo de aire $G(m^3 s^{-1})$ puede ser deducida integrando la Ecuación 2.17 sobre la altura vertical de la apertura, H . Si L es la longitud de la apertura de la superficie $S(S = LH)$, entonces tenemos:

$$G = L \int_0^H v(y) dy \quad (2.18)$$

Si consideramos una sola apertura, la superficie total será dividida en una superficie interior $S/2$ y una superficie exterior $S/2$ dispuesto, en cuanto a las fuerzas de empuje, en la parte de baja y superior de la apertura, entonces:

$$G = L \int_0^{H/2} v(y) dy \quad (2.19)$$

Las Ecuaciones 2.17 y 2.19 permite determinar la tasa de intercambio de aire a partir de la distribución de la presión entre el interior y el exterior, y el coeficiente de descarga, C_d (Boulard y Baille, 1995).

2.2.2.1. Efecto térmico de flotabilidad

El efecto chimenea es debido a la flotabilidad térmica como resultado de la diferencia entre la temperatura externa e interna la cual crea una distribución de presión entre y sobre las ventanas en dirección vertical (Pérez et. *al.*, 2004). Por ello, es posible considerar las ventanas cenitales como aperturas verticales. El nivel de referencia es en la mitad de la apertura donde la presión de entrada

y salida son iguales y no hay intercambio de aire. En la mitad inferior, la presión de afuera es mayor que la presión dentro. Como un resultado, el aire frío entra por la mitad inferior y el aire caliente sale por la mitad superior (Baptista et. *al.*, 1999).

Si la diferencia de presiones a nivel del suelo (ΔP_0), y la distribución de la temperatura del aire son conocidas, podemos deducir, usando la aproximación Boussinesq, la distribución vertical de la diferencia de presiones. Si asumimos, con el fin de simplificar el problema, que ese campo de temperaturas es homogénea dentro y fuera, entonces:

$$\Delta P(y) = \Delta P_0 - \rho g \left(\frac{\Delta T}{T} \right) y \quad (2.20)$$

donde $T(^{\circ}K)$ es la temperatura del aire interior y $\Delta T(^{\circ}K)$ es la diferencia de temperatura entre afuera y adentro. Entonces, la Ecuación 2.17 será:

$$v(y) = \frac{|\Delta P(y)|}{\Delta P(y)} C_d \left[\frac{2}{\rho} \left(\Delta P_0 - \rho g \left(\frac{\Delta T}{T} \right) y \right) \right]^{0.5} \quad (2.21)$$

Integrando la Ecuación 2.19 con $v(y)$ dada por la Ecuación 2.21 se obtiene G , el flujo de aire.

Se puede considerar dos principales hipótesis con respecto al flujo de aire a través de la apertura: (1) se puede asumir, para simplificar la forma del modelo, que la velocidad de entrada y salida son constantes, y (2) $v(y)$ en la Ecuación 2.21 es integrada sobre la altura de la apertura. Estas dos aproximaciones son llamadas enfoques de primer y segundo orden respectivamente (Boulard y Baille, 1995; Roy et. *al.*, 2002).

Enfoque de primer orden

En el caso de una sola apertura, la Ecuación 2.21 puede ser simplificada si se asume que la velocidad del aire tiene un valor constante v sobre toda la superficie de entrada y $-v$ por la de salida (Figura 2.3).

Entonces, si h es la altura del centro geométrico de la superficie de entrada:

$$v = \frac{|\Delta P|}{\Delta P} C_d \left[\frac{2}{\rho} \left(\Delta P_0 - \rho g \left(\frac{\Delta T}{T} \right) h \right) \right]^{0.5} \quad (2.22)$$

Si h_0 es la altura del plano neutral correspondiente a la altura donde las presiones dentro y fuera son iguales, entonces: $\Delta P = 0$ y $v = 0$. Para $v = 0$ la Ecuación 2.22 da:

$$\Delta P_0 = \rho g \left(\frac{\Delta T}{T} \right) h_0 \quad (2.23)$$

sustituyendo la nueva expresión de ΔP_0 en la Ecuación 2.22 obtenemos:

$$v = \frac{|\Delta P|}{\Delta P} C_d \left[2g \left(\frac{\Delta T}{T} \right) (h_0 - h) \right]^{0.5} \quad (2.24)$$

Entonces, sustituyendo v en la Ecuación 2.19 e integrando de 0 a $H/2$ (superficie o flujo de entrada) o $H/2$ a H (superficie o flujo de salida) obtenemos:

$$G = \frac{A_T}{2} C_d \left[\left(2g \frac{\Delta T}{T} \frac{H}{4} \right) \right]^{0.5} \quad (2.25)$$

donde A_T (m^2) es el área efectiva de ventanas.

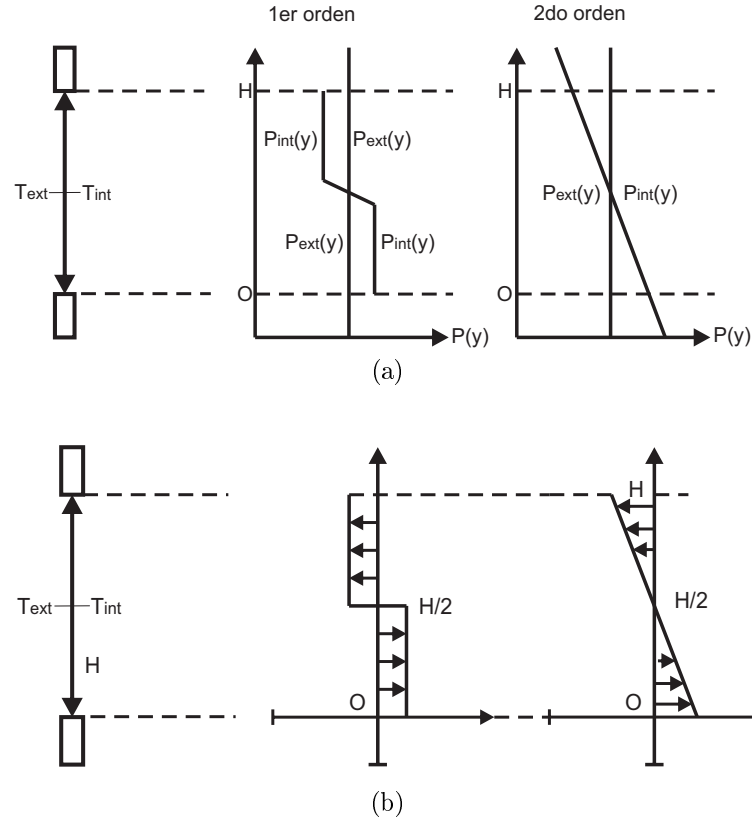


Figura 2.3: Esquema de la distribución de presión (a) y de la velocidad del aire (b) en ambos lados de la apertura. La aproximación de segundo orden considera una distribución vertical de la presión la cual está dada por la Ecuación 2.20, mientras que la aproximación de primer orden considera los valores ajustados de la presión y la velocidad del aire arriba $(+\Delta P, +v)$ y abajo $(-\Delta P, -v)$ del plano neutral de la diferencia de presiones ($H/2$). Fuente: (Boulard y Baille, 1995)

Enfoque de segundo orden

Integrando la velocidad del flujo de aire $v(y)$ dado por la Ecuación 2.21 sobre la superficie interna en la parte baja de la apertura o sobre la superficie externa en la parte superior obtenemos:

$$G = \frac{LC_d}{3(\Delta T/T)g} \left[\left[2g \left(\frac{\Delta T}{T} \right) \left(\frac{H}{2} \right) \right]^{3/2} \right] \quad (2.26)$$

donde L es la longitud de la ventana y H la altura vertical de la apertura.

Caso de dos aperturas

De igual manera, cuando se considera dos aperturas con áreas A_s (abajo) y A_R (arriba) separadas por una altura vertical h' y un coeficiente idéntico de descarga C_d , la ecuación de Bernoulli y la ecuación de continuidad con la hipótesis del enfoque de segundo orden ayuda a determinar la tasa de ventilación G intercambiado entre A_s y A_R inducido por una diferencia de temperaturas ΔT entre el aire interior y exterior (Roy et. al., 2002).

Kittas et. al. (1997) señala que si el viento es paralelo al cenit, entonces los coeficientes de presión del viento estático de las aperturas cenitales son cercanamente iguales (C_R); lo mismo es válido para las aperturas laterales las cuales se caracterizan por un coeficiente común de presión del viento estático (C_s):

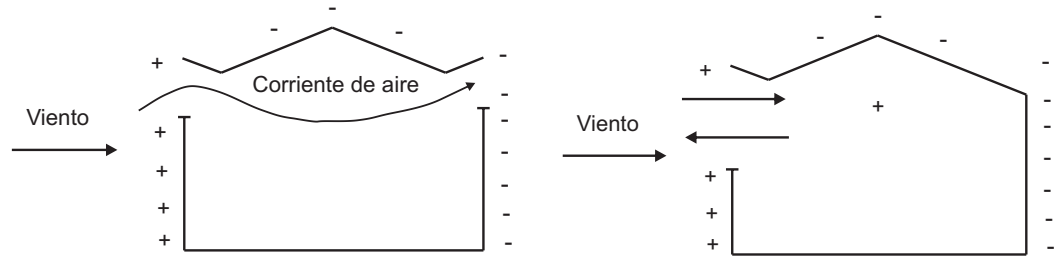
$$G = C_d \frac{A_R A_s}{\sqrt{A_R^2 + A_s^2}} \left[2g \frac{\Delta T}{T} h + (C_R - C_s) V^2 \right] \quad (2.27)$$

donde V es la velocidad del viento (ms^{-1}), si se asume que $C_R - C_s = K$, entonces:

$$G = C_d \frac{A_R A_s}{\sqrt{A_R^2 + A_s^2}} \left[2g \frac{\Delta T}{T} h + K V^2 \right] \quad (2.28)$$

2.2.2.2. Efecto del viento

Las fuerzas debido al efecto viento alrededor de una construcción crean un campo de presiones a las aperturas y por lo tanto produce un flujo de aire a través de ellas. Estas presiones pueden ser positivas, cuando los flujos de aire entran a la construcción, o negativos (succión) cuando los flujos de aire salen



(a) Dirección de la corriente de aire generada por una diferencia de presiones entre una apertura en el sotavento y otra en el barlovento.

(b) Corriente de aire generada por una fluctuación de la velocidad del viento en una sola apertura.

Figura 2.4: Esquema del efecto estacionario y turbulento del viento. Ejemplo de distribución de los signos de los coeficientes de presión, $\bar{C}$ sobre las paredes y techo del invernadero de acuerdo a la orientación del viento (signo positivo significa una presión y un signo negativo significa succión). Fuente: (Boulard y Baille, 1995)

(Baptista et. al., 1999). El efecto debido al viento usualmente se divide en dos componentes: El primero de ellos es el efecto "estacionario" producido por medio de la distribución de presión, relacionado con la media de la velocidad del viento V , por un coeficiente de presión adimensional, $\bar{C}$:

$$\Delta \bar{P} = \frac{1}{2} \rho \bar{C} V^2 \quad (2.29)$$

Un esquema de distribución del signo de la presión promedio inducida por el viento sobre las paredes y el techo de un invernadero se muestra en la Figura 2.4 (a). Es claro, para esta figura que un invernadero equipado con ventanas del lado del viento y del lado contrario a éste serán atravesada por un flujo medio de aire que va de las aperturas situadas en el área con un positivo $\bar{C}$ a el área de un negativo $\bar{C}$ (Boulard y Baille, 1995).

Un viento paralelo a una continua apertura extendida a lo largo de la fachada de la construcción da lugar a un campo de presión estática cercana al cenit de la

construcción, el cual induce una entrada estática al sotavento y una salida a la parte del barlovento de la apertura (Kittas et. *al.*, 1997). El llamado efecto "pared lateral" es vinculado a un gradiente de presión a lo largo de la apertura. Esta relativa importancia al flujo total de ventilación es inversamente proporcional al tamaño del invernadero.

El segundo componente es un efecto turbulento del viento inducido por la fluctuación de la distribución de la presión, descrito por el coeficiente de fluctuación de presión, $\tilde{C}$. Considerando el caso de un invernadero multicapillas, equipado con solo ventanas cenitales, todas abiertas en la misma dirección (Figura 2.4 (b)). El coeficiente de presión, $\bar{C}$, es el mismo para cada apertura entonces el intercambio de aire no puede ser inducido por las diferencias de $\bar{C}$ y el intercambio de aire es inducido por la fluctuación del viento creando fluctuación de presión que depende de las características de la turbulencia del viento en interacción con el mismo invernadero o con sus alrededores inmediatos. En este caso, el intercambio de aire a través de las ventanas son impulsadas por dos mecanismos: (1) las variaciones de presión causadas por un cambio de presiones debido a la compresibilidad del aire (este es el caso para aperturas pequeñas frente del viento); (2) una difusión turbulenta, en aperturas grandes, generalmente por la fluctuación espacial de presión, causando el aire para ser intercambiado entre el lado exterior e interior, este es similar a un flujo de dos maneras a través de la misma apertura.

A pesar de la complejidad del fenómeno turbulento, consideraremos que un solo parámetro $\tilde{C}$ es capaz de describir el efecto de la fluctuación de la presión del viento:

$$\Delta\tilde{P} = \frac{1}{2}\rho\tilde{C}V^2 \quad (2.30)$$

con

$$\Delta\tilde{P} = \left((\Delta P(t) - \Delta\bar{P})^2 \right)^{0.5} \quad (2.31)$$

Pocos valores de $\tilde{C}$ son disponibles en la literatura. Como los valores de $\tilde{C}$ y $\bar{C}$ son linealmente independientes en V^2 . Usaremos la siguiente notación C_w (representando los efectos $\tilde{C}$ y/o $\bar{C}$), y ΔP_w (representando los efectos $\Delta\tilde{P}$ y $\Delta\bar{P}$, incluyendo ambos estados (por ejemplo el efecto "pared lateral" con nuestra configuración de ventanas) y efectos turbulentos, con:

$$\Delta P_w = \frac{1}{2}\rho C_w V^2 \quad (2.32)$$

sustituyendo la expresión de la caída de presión dado en la Ecuación 2.32 en la Ecuación 2.17 e integrando el flujo sobre el área de entrada o salida ($A/2$), la siguiente relación simplificada para flujo de ventilación puede ser descrita como sigue:

$$G = \frac{A_T}{2} C_d \sqrt{C_w} V \quad (2.33)$$

Esta expresión es similar a la dada por diferentes autores (Boulard y Baille, 1995; Papadakis et. *al.*, 1996; Kittas et. *al.*, 1996, 1997; Baptista et. *al.*, 1999; Roy et. *al.*, 2002) para invernaderos con solo ventilación cenital.

2.2.2.3. *Efecto combinado del viento y las fuerzas de flotabilidad térmica*

En la ventilación natural, las fuerzas del viento y flotabilidad usualmente están presentes. En áreas donde el viento es fuerte, este efecto es más importante que la diferencia de temperaturas pero domina el efecto de flotabilidad cuando el viento es más débil. Meneses y Raposo (1987) citado por Baptista et. *al.* (1999) consideraron que, para velocidades del viento de 0.5-1.5 , la diferencia de temperaturas domina a el efecto del viento en invernaderos con aperturas localizadas en el techo y en las paredes laterales y para velocidades de 1.5 a 2.5 el efecto es combinado. En las velocidades más grandes, ocurre lo opuesto y la influencia térmica puede ser ignorada. Sin embargo, estas limitaciones dependen sobre la geometría del invernadero, la posición de las ventanas y la diferencia de temperaturas entre lo interior y el exterior (Baptista et. *al.*, 1999).

Cuando ambas fuerzas actúan juntas, Boulard y Baille (1995); Kittas et. *al.* (1997); Roy et. *al.* (2002), consideraron que el resultado del flujo de aire no es igual a la suma de los dos valores separados. El flujo a través de cualquier apertura está dado por una suma vectorial:

$$G = \sqrt{G_w^2 + G_s^2} \quad (2.34)$$

donde G_w es el flujo debido al viento y G_s debido a las diferencias térmicas.

De acuerdo con (Roy et. *al.*, 2002), la hipótesis de un complemento de flujo en lugar de diferencias de presión individuales conduce a un error del orden del 10 % en la estimación del flujo combinado.

Boulard y Baille (1995); Boulard et. *al.* (1996); Kittas et. *al.* (1996, 1997) estudiaron diferentes modelos para predecir tasas de ventilación y propusieron modelos para invernaderos con solamente ventilación cenital, con solamente ventilación lateral y para invernaderos con ventilación lateral y cenital.

2.3. MÉTODOS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR TASAS DE VENTILACIÓN

2.3.1. Gases trazadores

Una de las técnicas más importantes para medir las tasas de ventilación e infiltración es la técnica de gases trazadores (Baptista et. *al.*, 1999). La técnica es basada en un balance de masas de un gas trazador el cual es uniformemente mezclado totalmente en el espacio ventilado (Bailey, 2000). Hay dos métodos principales de medición de las tasas de ventilación e infiltración con un gas trazador, la inyección continua o método estático y la inyección de pulso o método dinámico.

Para ambos métodos, la selección del gas trazador es muy importante. Un gas trazador ideal debe tener las siguientes características: sea seguro para las personas, no esté presente en la atmósfera, sea inerte, no interactúe con las plantas, no debe reaccionar con ningún compuesto presente en el aire, no debe ser un constituyente normal del aire. Aunque estos criterios definen un gas trazador ideal para una perspectiva teórica, consideraciones prácticas tal como el costo del gas y la necesidad de instrumentación serán un factor decisivo para la elección de este (Sherman, 1990; Bailey, 2000).

Muchos gases han sido utilizados como gas trazador en estudios de ventilación en invernaderos como metano (CH_4), hidrogeno (H_2), argón 41, kriptón

85, dióxido de carbón (CO_2) y óxido nitroso (N_2O), éste último es el mejor porque cumple con todos los requerimientos. El dióxido de carbón puede ser usado, pero es necesario medir la concentración de CO_2 en el aire externo y la tasa que libera el suelo. En un invernadero cultivado el N_2O es el mejor de los dos porque la concentración no es influenciada por la fotosíntesis y respiración de las plantas (Baptista et. *al.*, 1999).

Todos los métodos están basados en la ley de la conservación para los gases trazadores, los cuales son formulados en términos de flujos volumétricos (Sherman, 1990; Bailey, 2000):

$$V \frac{dC_g}{dt} + G(C_g - C_e) = v_g \quad (2.35)$$

donde V es el volumen del invernadero, G la tasa del flujo volumétrico del aire entrante y saliente del invernadero, C_g la concentración del gas trazador dentro del invernadero, C_e la concentración del gas trazador fuera del invernadero y v_g el volumen suministrado del gas trazador.

El mezclado uniforme del gas trazador con el aire del invernadero es un requerimiento esencial para mediciones más preciso. Hay antecedentes que en un invernadero con ventanas cerradas las velocidades del aire son de 0.2 a 0.3 ms^{-1} creado por la convección natural y la convección forzada de las fugas del aire debido al viento a través de los huecos dejados en las uniones de las estructura, etc. Este movimiento del aire es el mejor mecanismo de mezcla para proporcionar un transporte más rápido que el molecular o un remolido de difusión. Se han utilizado ventiladores para mejorar el proceso de mezclado antes de empezar las

mediciones de la ventilación. El mezclado puede ser mejorado usando múltiples puntos de inyección (Bailey, 2000).

Básicamente se utilizan tres métodos diferentes para evaluar los caudales de aire mediante gases trazadores: el método de la caída de la concentración, el método de la emisión constante y el método de la concentración constante.

2.3.1.1. Método de la caída de la concentración

El método más comúnmente utilizado para determinar las tasas de ventilación en invernaderos ha sido midiendo la tasa del decaimiento de la concentración del gas trazador siguiendo la relación de la cantidad de gas dentro del invernadero (Bailey, 2000). En este caso, el gas trazador es inyectado y distribuido uniformemente en el invernadero hasta que una concentración predeterminada sea alcanzada y se detiene la inyección, y el decaimiento de la concentración del gas trazador es medido (Sherman, 1990). Cuando la concentración ha caído un 80 – 90 % del valor inicial, nuevamente el gas es inyectado, y otra caída es medida (Baptista et. al., 1999). La concentración es monitoreada cuando no se inyecta el gas trazador y entonces durante este periodo se obtiene la tasa de ventilación (Sherman, 1990). La Ecuación 2.35 puede ser integrada para dar una expresión para la cual la tasa de ventilación en el intervalo de tiempo t_1 a t_2 horas puede ser obtenido (Bailey, 2000):

$$\frac{(C_{g1} - C_e)}{(C_{g2} - C_e)} = \exp \left(\frac{G}{V} (t_2 - t_1) \right) \quad (2.36)$$

El método de análisis es la aplicación de la regresión linear del logaritmo natural de la relación de la concentración del gas de la Ecuación 2.36 nuevamente

el tiempo expresado en horas, el gradiente de la línea de regresión es igual a la tasa de ventilación, es decir, $-\frac{G}{V}$ expresada en cambios de aire por hora h^{-1} (Bailey, 2000). La tasa de ventilación en m^3s^{-1} está dado por:

$$\frac{G \cdot V}{3600} \quad (2.37)$$

Según Nederhoff et. *al.* (1985), Baptista et. *al.* (1999) y Bailey (2000) el método del decaimiento de la concentración tiene necesidades más simples de instrumentación, requiere solo un analizador de gases, es muy simple de analizar, bajos consumos de gases, relativamente periodos cortos de medición, puede ser usado para medir un amplio rango de tasas de ventilación.

Debido a que la mezcla del gas trazador y del aire del invernadero nunca será perfecto, es deseable tomar varias muestras de gas trazador en diferentes puntos en el invernadero lo cual permite variaciones espaciales en las tasas de ventilación. Los muestreos pueden ser mezclados y determinar una sola tasa, pero esto está sujeto a un error dependiente del tiempo como la tasa media que tiende hacia el valor más lento. Alternativamente la tasa puede ser encontrada por cada punto muestreado y determinar su media; esto da un valor más confiable. El método de la caída de la tasa también requiere conocer el volumen del invernadero. Aunque el volumen físico puede ser determinado con una buena precisión, no es fácil identificar el volumen del aire interno que interviene en el proceso de ventilación. Esto es especialmente pertinente cuando hay plantas en el invernadero como tomate o pepino.

Las principales ventajas de este método son que se utiliza menos gas y puede

ser usado para medir sobre un ancho rango de tasas de ventilación y sus desventajas es la dificultad para obtener una concentración uniforme del gas trazador dentro del invernadero, y para altas tasas de ventilación la concentración del gas decrece rápidamente y los datos obtenidos para el análisis pueden ser insuficientes (Bailey, 2000).

2.3.1.2. Método del flujo constante

Un método alternativo es el suplemento del gas trazador a una tasa constante. Este método se utiliza principalmente para medir velocidades de ventilación, caudales de aire en los conductos o efectuar un seguimiento de la contaminación existente. Consiste en liberar el gas trazador en el recinto a una velocidad constante a lo largo de todo el periodo de medida. Cualquier cambio que se presente en la concentración de gas trazador estará relacionado con la velocidad de renovación. Bajo esta condición, la integración de la Ecuación 2.35 para el tiempo t_1 a t_2 da la tasa media de ventilación durante el intervalo de tiempo:

$$G = \overline{\left(\frac{v_g}{C_g - C_e} \right)} - \frac{V}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{C_{g2}}{C_{g1}} \right) \quad (2.38)$$

donde la línea superior indica el tiempo promedio de los valores. En este método el volumen del invernadero solo aparece en un término de corrección que da cuenta de los cambios en el efecto del gas trazador en el aire del invernadero. Sin embargo, el requisito de instrumentación es mayor porque la tasa de suministro de gas trazador debe ser medida pero el método es más adecuado para el control automático. La concentración sustancialmente constante del gas trazador mejora la precisión de las mediciones comparado con el método de la caída de la

concentración.

La principal desventaja de este método es la necesidad de asegurar la uniformidad de la distribución del gas trazador, como esto no es posible se utilizan ventiladores para mezclar el aire del invernadero sin afectar el proceso de ventilación. Muestreos múltiples del aire del invernadero nuevamente son deseables (Bailey, 2000).

2.3.1.3. Método de la concentración constante

Es el método más costoso de los tres y no se tienen registros de su utilización en invernaderos pero permite medir la renovación media del aire en periodos largos de tiempo con variaciones en la renovación y podemos obtener detalles de estas. Puede aplicarse en los mismos casos que el método del flujo constante. En este método el gas trazador se "dosifica" para mantener su concentración constante C_g .

Cuando se usa este método, la concentración de gas es medido por un monitor de gas. Esta información es enviada a una computadora que controla la cantidad de gas trazador "dosificado" dentro de la zona para mantener la concentración constante. Con ayuda de un pequeño ventilador se puede mezclar el gas trazador con el aire interior. Siempre que la concentración del gas trazador en la habitación sea constante en todo el tiempo de la prueba, la Ecuación 2.35 se reduce a:

$$G = \frac{\overline{v_g}}{V \cdot C_g} \quad (2.39)$$

Donde $\overline{v_g}$ es el volumen promedio del gas trazador inyectado al cuarto o invernadero.

Este método ofrece dos grandes ventajas: no solo puede ser usado para obtener una tasa de renovación de aire promedio muy exacto a largo plazo en situaciones donde las tasas varían, por ejemplo en construcciones ocupadas, pero también puede ser usado para registrar o documentar estas variaciones a detalle. Como en el método de flujo constante, el costo del gas trazador puede ser de importante consideración (Sherman, 1990).

2.3.1.4. *Efecto del cultivo*

Cuando se utiliza CO_2 como gas trazador y un cultivo está presente en el invernadero la concentración está fuertemente influenciada por la fotosíntesis (consumo de CO_2 en el día) y respiración (emisión de CO_2 en la noche) de las plantas. Por lo tanto la caída de la concentración es el resultado de la tasa de ventilación G y el efecto de la planta P_g (Nederhoff et. al., 1985). Para estas condiciones se puede estimar la tasa de ventilación de la siguiente manera:

$$G = G_a - kP_g \quad (2.40)$$

donde G_a es la tasa de ventilación aparente y es calculada de acuerdo al método utilizado con la Ecuación 2.36, 2.38 o 2.39, el cual no toma en cuenta el efecto del cultivo. k se puede estimar de la siguiente manera:

$$k = [C_{g0} - C_{g1}] \cdot \left\{ \ln \left[\frac{C_{g0} - C_e}{C_{g1} - C_e} \right] \cdot (C_{g0} - C_e) \cdot (C_{g1} - C_e) \cdot \bar{h} \cdot \rho_{CO_2} \cdot 10^{-3} \right\}^{-1} \quad (2.41)$$

donde $\bar{h}$ (m) es la altura media del invernadero; ρ_{CO_2} es la densidad del CO_2 (1.87 kgm^{-3}).

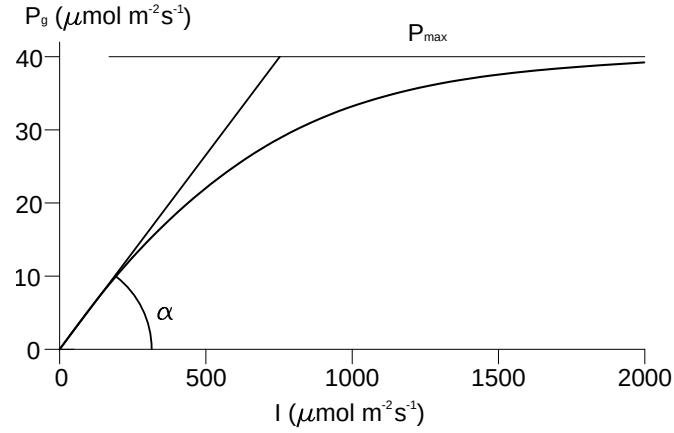


Figura 2.5: Representación de la Ecuación 2.42 y la medición de sus parámetros

Bontsema et. *al.* (2007) utilizaron un modelo para estimar la tasa de fotosíntesis (P_g) por m^2 de hoja en base a varios factores. Estos factores son también medidos o estimados por datos encontrados en la literatura. Los factores medidos son: Radiación (I), Índice de Área Foliar (IAF) y la concentración de CO_2 en el invernadero. Los factores estimados son: la eficiencia fotosintética (α), la tasa máxima de fotosíntesis del cultivo (P_{max}), la asimilación neta del cultivo (A_{net})(ver Figura 2.5).

$$P_g = P_{max} \left[1 - \exp \left(-\frac{\alpha I}{P_{max}} \right) \right] \quad (2.42)$$

tomando en cuenta que 1 mol CO_2 es 44 g, tenemos:

$$P_g [mgm^{-2}s^{-1}] = 0.044 P_g [\mu molm^{-2}s^{-1}] \quad (2.43)$$

Diferentes autores reportan que para un conjunto de condiciones , la eficiencia fotosintética es constante para especies C_3 (la mayoría de los cultivos en

invernadero). Ésta se incrementa con la concentración de CO_2 , de 0.05 con CO_2 ambiental a 0.08 bajo saturación de CO_2 , con poca influencia (negativa) de la temperatura (-15 % para temperaturas entre 15°C a 30°C). Nederhoff (1994) citado por Bontsema et. al. (2007) obtuvo un α de $0.1 \mu mol mol^{-1}$ (vpm).

La tasa máxima de fotosíntesis P_{max} ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$) bajo condiciones no limitantes de luz, cambia considerablemente entre los cultivos. Así mismo, este es intensamente afectado por el CO_2 , no tanto por la temperatura sino por el contenido de agua y de los nutrientes en la hoja.

$$P_{max} = \frac{A_{max}}{1 + \frac{C_e}{CO_2}} \quad (2.44)$$

El principal problema para cambiar de un modelo de una sola hoja a un modelo de asimilación neta de la planta A_{net} ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$) es predecir la distribución de la luz entre las hojas del cultivo. Nederhoff (1994) citado por Bontsema et. al. (2007) determinó un modelo empírico que contempla la planta completa, parametrizando una relación hiperbólica doble con respecto a la luz y el CO_2 :

$$A_{net} = p_1 + p_2 \frac{I}{I + p_3} \frac{CO_2}{CO_2 + p_4} + p_5 I A F \quad (2.45)$$

donde el parametro p_1 (generalmente negativo), proveniente de la luz y los puntos de compensación de CO_2 , y el parámetro p_5 , representan respiración (el índice de area foliar es usado para representar la biomasa). Los valores de los parámetros de la Ecuación 2.45 para tomate están en el Cuadro 2.1, para otros cultivos se pueden encontrar en Nederhoff (1994, p. 33).

La Ecuación 2.45 tiene muchos parámetros para este propósito. Una forma

Cuadro 2.1: Parámetros empíricos para la estimación de la asimilación neta (Ecuación 2.45) para un cultivo de tomate (Nederhoff, 1994 citado por Bontsema et. al. (2007)). La primera fila son los valores dados por Nederhoff quien determino la asimilación neta en $gm^{-2}h^{-1}$. La segunda fila son los valores de la asimilación neta en $\mu molm^{-2}s^{-1}$. La radiación PAR debe ser en $\mu molm^{-2}s^{-1}$ y el CO_2 en $\mu molmol^{-1}$, que es lo mismo en vpm.

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
$[A_{net}] = gm^{-2}h^{-1}$	$gm^{-2}h^{-1}$	$gm^{-2}h^{-1}$	$\mu molm^{-2}s^{-1}$	vpm	$gm^{-2}h^{-1}$
	-0.78	11.9	577	221	0.18
$[A_{net}] = \mu molm^{-2}s^{-1}$	$\mu molm^{-2}s^{-1}$	$\mu molm^{-2}s^{-1}$	$\mu molm^{-2}s^{-1}$	vpm	$\mu molm^{-2}s^{-1}$
	-4.92	75.1	577	221	1.14

exponencial (Ecuación 2.42), con P_{max} y α modelados por una hipérbola rectangular (Ecuación 2.44) propuestas por Cannel y Thornley (1998) citados por Bontsema et. al. (2007), da los mismos resultados que la Ecuación 2.45 en el rango de CO_2 de 200 a 1000 vpm podría ser:

$$A_{net} = P_{max} \left[1 - \exp \left(-\frac{\alpha I}{P_{max}} \right) \right] \text{ con } P_{max} = \frac{60}{1 + \frac{230}{CO_2}} \text{ y } \alpha = \frac{0.09}{1 + \frac{230}{CO_2}} \quad (2.46)$$

se reduce en:

$$A_{net} = A_{max} \frac{1}{1 + \frac{230}{CO_2}} [1 - \exp(-0.0015I)] \quad (2.47)$$

En el modelo de Nederhoff, A_{max} , la tasa teórica de asimilación máxima cuando ningún factor es limitante debe ser $60 \mu molm^{-2}s^{-1}$. De hecho, debe ser cerca de $45 \mu molm^{-2}s^{-1}$ con saturación de luz a 1000 vpm de CO_2 .

2.4. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Una de las fases del modelado consiste en la calibración o estimación y ajuste de los parámetros característicos del modelo. La teoría y los procedimientos para la calibración de la distribución están bien desarrollados para los modelos que son funciones lineales de sus parámetros, o se pueden aproximar usando funciones lineales de sus parámetros.

La calibración del modelo, es el proceso de alterar parámetros para tener un mejor ajuste entre la simulación y los datos observados. En otras palabras, la calibración involucra un ajuste de parametros del modelo que sistematicamente compara los resultados obtenidos en la simulación con observaciones de las variables de estado. La calibración debe ser conducido solo dentro de los rangos de un conjunto de datos. En muchos casos, la calibración solo es una forma practica de estimar algunos parametros que son usados en modelos biologicos (Peart y Curry, 1998).

Generalmente los parámetros que se eligen para la calibración, son aquéllos que son inciertos, que afectan el comportamiento del modelo (sensibles) y que afectan el comportamiento del modelo, en forma tal, que se obtiene un mejor ajuste entre las mediciones y los datos simulados. Una vez que los parámetros para la calibración han sido seleccionados, ya sea en un camino formal o en razonamiento, éstos son optimizados en el proceso de calibración. En general, la calibración se lleva a cabo con cualquier procedimiento, que permite extraer información cuantitativa con respecto a los parámetros del modelo a partir de las observaciones o mediciones, usando un modelo de simulación completo. General-

mente, el problema de calibración de un modelo dinámico se formula como un problema de optimización, en el cual dados un conjunto de observaciones, el modelo y ciertas restricciones, se trata de ajustar los parámetros seleccionados para calibración en forma iterativa, de tal forma, que se optimiza una función objetivo.

La función objetivo, es la medida de discrepancia que sintetiza una función de todas las diferencias entre los valores medidos y los valores observados, donde estas diferencias son llamadas residuos (Castañeda, 2005).

Generalmente para estudios de calibración, se utiliza un algoritmo de optimización como mínimos cuadrados ordinarios (OLS). Un modelo de cultivo puede ser pensado como una función de respuesta definida por $f(x; \theta)$ donde f es la ecuación del modelo, x es un vector de entradas del modelo y θ es un vector de entradas del modelo. Esta función nunca predice perfectamente las variables de respuesta. El error esta denotado como $\epsilon = y - f(x; \theta)$, es la diferencia entre la predicción y la respuesta observada "y" para una situación dada. ϵ es una suma de dos componentes, uno correspondiente al error de medición y otro debido a la insuficiencia de la función de respuesta.

El método de mínimos cuadrados ordinarios es simple y muy comúnmente utilizado por los modeladores de cultivos. Este método tiene buenas propiedades si los errores del modelo están normalmente distribuidos y son independientes con varianza constante y media cero para todos los valores de x . Suponiendo que una muestra de N mediciones, $(x_i; y_i)$ $i=1, \dots, N$, está disponible para la estimación del parámetro del modelo θ . El método más simple para estimar los parámetros del modelo es aplicar (OLS). La estimación de mínimos cuadrados ordinarios de θ

minimiza la suma de diferencias cuadradas entre las mediciones y las predicciones del modelo.

En el caso de modelos lineales es posible calcular analíticamente los cuadrados mínimos ordinarios. La forma general de un modelo lineal es $f(x_i; \theta) = x_i^T \theta$ donde T es la matriz operador transpuesta. Para este tipo de modelo, el estimador OLS de θ es $\hat{\theta}_{OLS} = (X^T X)^{-1} X^T Y$ donde $Y = (y_1, \dots, y_N)^T$ y X es una matriz que incluye los valores medidos de las variables de entrada. Las líneas de X son $x_1^T, \dots, x_i^T, \dots, x_N^T$. $\hat{\theta}_{OLS}$ está relacionando con las observaciones Y a través de una función analítica simple. Esta función puede ser directamente utilizada para calcular los valores de los parámetros estimados a partir de datos.

Esto generalmente es imposible con modelos no lineales; las estimaciones de los parámetros no pueden ser expresadas como funciones de observaciones. El enfoque habitual es utilizar un algoritmo iterativo para minimizar $Z_{OLS}(\theta)$. El siguiente algoritmo es utilizado para resolver este problema:

1. Definir un valor inicial para θ , denotado como $\hat{\theta}_0$.
2. Linealizar el modelo con la finalidad de sustituir el modelo no lineal por un modelo lineal. En este paso el desarrollo lineal de Taylor se calcula como sigue:

$$f(x; \theta) \approx f(x; \hat{\theta}_0) + \sum_{j=1}^p \left. \frac{\partial f(x; \theta)}{\partial \theta_j} \right|_{\hat{\theta}_0} (\theta_j - \hat{\theta}_{0j}) \quad (2.48)$$

donde p es el número total de parámetros y $\left. \frac{\partial f(x; \theta)}{\partial \theta_j} \right|_{\hat{\theta}_0} (\theta_j - \hat{\theta}_{0j})$ es la derivada de $f(x; \theta)$ con respecto al j -ésimo parámetro tomados en $\hat{\theta}_0$.

3. Calcular la estimación de los mínimos cuadrados ordinarios de θ para el modelo lineal $f(x; \hat{\theta}_0) + \sum_{j=i}^p \frac{\partial f(x; \theta)}{\partial \theta_j} \Big|_{\hat{\theta}_0} (\theta_j - \hat{\theta}_{0j})$. Esta estimación es obtenida mediante la minimización de $\sum_{i=1}^N \left\{ y_i - \left[f(x; \hat{\theta}_0) + \sum_{j=i}^p \frac{\partial f(x; \theta)}{\partial \theta_j} \Big|_{\hat{\theta}_0} (\theta_j - \hat{\theta}_{0j}) \right] \right\}^2$. Ahora como el modelo es lineal, una expresión analítica para el estimador puede ser derivada como se explico arriba. Se obtiene $\hat{\theta}_1 = \hat{\theta}_0 + \Delta_0$, donde $\hat{\theta}_1$ es el nuevo parámetro estimado, $\Delta_0 = (F^T F)^{-1} F^T [Y - F]$, $F = \left[f(x_1; \hat{\theta}_0), \dots, f(x_N; \hat{\theta}_0) \right]^T$, F es una matriz (N x p) cuyos elementos están definidos por $\frac{\partial f(x; \theta)}{\partial \theta_j} \Big|_{\hat{\theta}_0} (\theta_j - \hat{\theta}_{0j})$.
4. Sustituir $\hat{\theta}_0$ por $\hat{\theta}_1$ y regresar al inciso a.

Cuando el numero de parámetros a estimar es elevado surgen problemas numéricos, en algunos casos el algoritmo no converge a un verdadero valor mínimo de $Z_{OLS}(\theta)$ pero si a un mínimo local. Con algunos valores iniciales, el algoritmo converge a un mínimo local y el valor del parámetro resultante difiere de la estimación de los mínimos cuadrados. Para evitar este tipo de problemas, es importante ejecutar el algoritmo sucesivamente con diferentes valores iniciales. Otra solución puede ser la utilización de un algoritmo de optimización global, estos algoritmos son menos sensibles a los valores iniciales que el tipo de algoritmo Gauss-Newton y es más probable que converjan a la solución óptima. Una desventaja importante de estos algoritmos es que por lo general requieren de un largo tiempo de cálculo (Wallach et.al., 2006).

Generalmente este método converge a una solución local y no al óptimo global. Los algoritmos de optimización global son menos sensibles a los valores iniciales

que el tipo de algoritmo Gauss-Newton y es más probable que converjan a la solución óptima. Una desventaja importante de estos algoritmos es que por lo general requieren de un largo tiempo de cálculo.

Capítulo 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS INVERNADEROS

El estudio se realizó en dos invernaderos ubicados en el campo experimental San Ignacio de la Universidad Autónoma Chapingo en Chapingo, Estado de México. Están localizados a $19^{\circ} 29' 17''\text{N}$, $98^{\circ} 53' 16''\text{O}$ y a 2251 msnm. El clima de la localidad es del tipo Cb(Wo)(W)(i')g, que corresponde a un templado subhúmedo con lluvias en verano, una época seca en invierno y con poca oscilación térmica ($5\text{-}7^{\circ}\text{C}$). La temperatura media anual es de 15.5°C ; mayo el mes más caliente y enero el más frío. La precipitación media anual es de 664 mm (García, 1973).

Como se muestra en la Figura 3.1, el invernadero es tipo capilla. Tiene 20 m de largo por 9 m de ancho y 5.8 metros de alto, con orientación SO-NE y con un volumen de 878.458 m^3 . El área total de las ventilas cenitales y de la pared lateral es 17 m^2 y 93 m^2 respectivamente, representando un 61 % del área de la superficie del piso. Las ventanas cenitales están orientadas hacia el Este.

El segundo invernadero es de tipo sierra como se muestra en la Figura 3.2 y tiene 45.5 m de largo por 24.4 m de ancho, una altura máxima de 6.45 m, con orientación SE-NO y con un volumen de 10881.9 m^3 . El área de ventanas laterales de 310.4 m^2 y cenitales de 237.5 m^2 , lo cual representa un 49 % del área de la superficie del piso. Las ventanas cenitales están orientadas hacia el Oeste.

Para ambos invernaderos se usó película de polietileno de una capa calibre

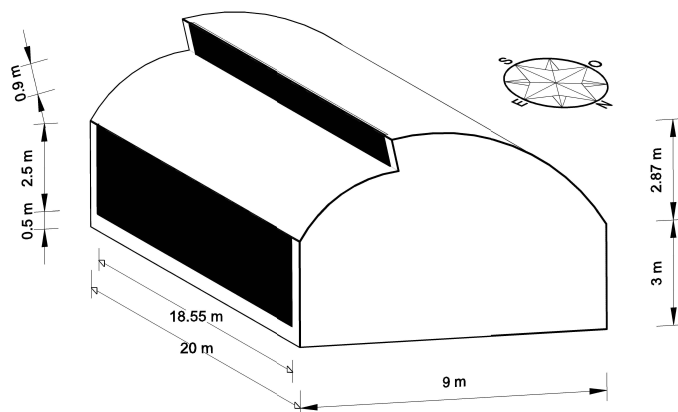


Figura 3.1: Dimensiones del invernadero tipo capilla.

700 ultravioleta con una vida útil recomendada de 2 años. Se instalaron mallas antiáfidos de 45 x 25 hilos, estas ventanas se cierran por medio de malacates tanto en las ventanas laterales como las cenitales. La ventilación natural fue el único mecanismo de enfriamiento.

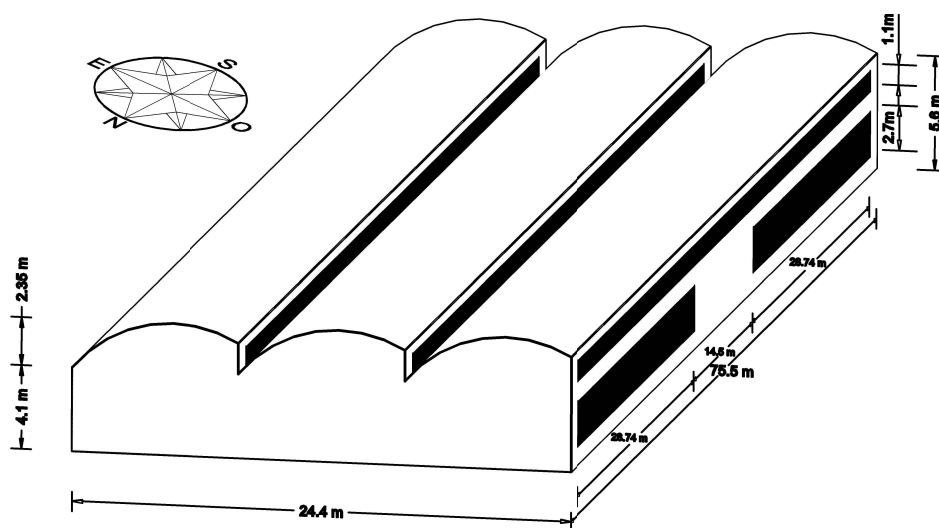


Figura 3.2: Dimensiones del invernadero tipo sierra.

3.2. ADQUISICIÓN DE DATOS

Durante los experimentos, para ambos invernaderos se midieron diferentes variables climáticas dentro y fuera de los invernaderos. Los sensores se instalaron en un data logger HOBO para recolectar los datos periódicamente cada 30 s. Los sensores que se colocaron dentro, se colocaron a una altura de 1.5 m y los de afuera a 2 metros sobre la cumbrera del invernadero como se muestra en la Figura 3.3 , en el Cuadro 3.1 se presentan los sensores así como las unidades de medición.

Cuadro 3.1: Sensores dentro y fuera del invernadero.

Variable	Sensores	Unidad	Dentro	Fuera
Velocidad del viento	Wind Speed Smart Sensor	ms^{-1}		x
Temperatura	Temperature/HR Smart Sensor	$^{\circ}C$	x	x
Humedad relativa	Temperature/HR Smart Sensor	%	x	x
Radiación solar	Silicon pyranometer	Wm^{-2}	x	x
Concentración de CO_2	TES-1370 NDIR CO_2 meter	ppm	x	

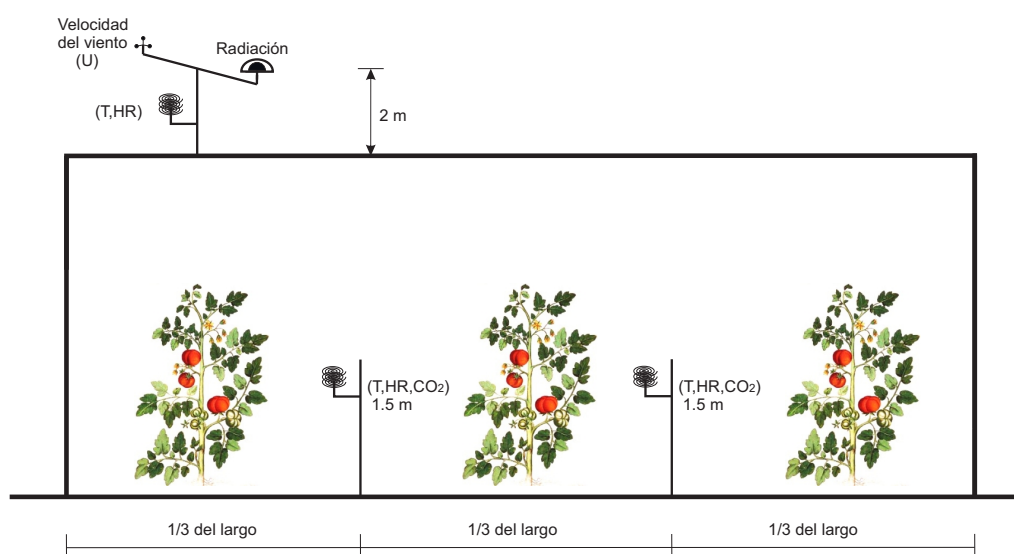


Figura 3.3: Esquema de la posición de los sensores.

Las mediciones se realizaron en los meses de Abril a Septiembre en diferentes días esto para poder tener diferentes condiciones climáticas. La mayoría de las mediciones se realizaron entre 9 am y 2 pm.

3.3. DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS

Durante los días estudiados se registró un amplio rango de velocidades de viento mayores a 4 ms^{-1} y menores a 1.5 ms^{-1} y diferencias de temperatura entre el interior y el exterior mayores a 20°C . El gas utilizado fue dióxido de carbono (CO_2). Para la distribución del gas se utilizó una configuración de tres líneas para el invernadero tipo capilla y cinco para el invernadero tipo sierra de manguera de 0.5 pulgadas en un sistema cerrado (como se muestra en la Figura 3.4) con orificios de 3/32 pulgadas a cada 2 metros. Se utilizaron ventiladores con el objetivo de homogeneizar el gas. El invernadero tipo capilla estuvo libre de cultivo durante la toma de mediciones y en el invernadero tipo sierra se tuvo presencia del cultivo de tomate a diferentes densidades.

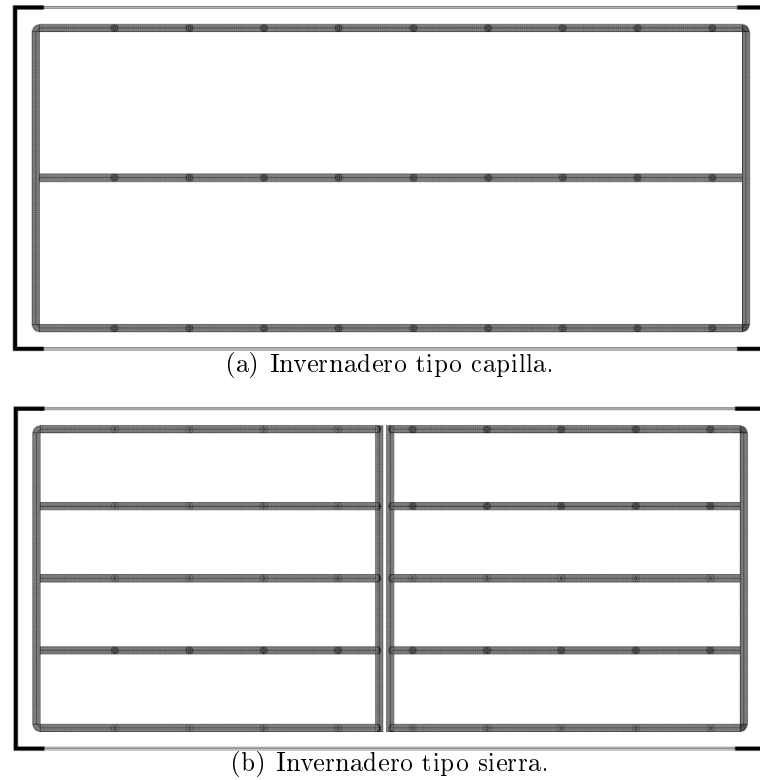


Figura 3.4: Esquema de distribución del gas.

Las mediciones se llevaron a cabo bajo tres configuraciones de ventanas, la primera consideró únicamente la ventilación lateral (Figura 3.5 (a)), la segunda solo la ventilación cenital (Figura 3.5 (b)) y la última utilizando toda la ventilación (ventanas cenitales y ventanas laterales) del invernadero (Figura 3.5 (c)).

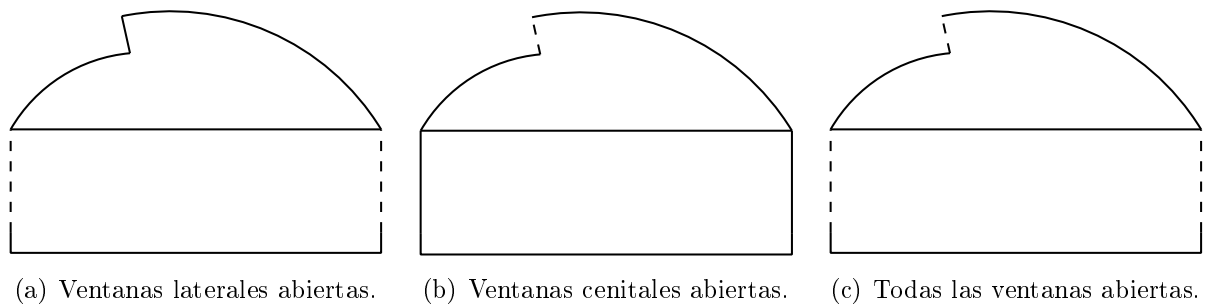


Figura 3.5: Configuración de los experimentos.

3.4. TÉCNICA DE GASES TRAZADORES

El método dinámico del gas trazador fue utilizado para determinar experimentalmente las tasas de ventilación. A continuación los pasos para medir las tasas de ventilación (Romero, 2005):

1. Antes de inyectar el gas trazador, todas las ventanas del invernadero fueron cerradas para evitar el intercambio de gases.
2. El dióxido de carbono (CO_2) fue inyectado hasta que la concentración fuera 1100 ppm aproximadamente.
3. Se encendieron los ventiladores para mover el aire y la concentración del gas fue monitoreado, para asegurar la uniformidad.
4. Una vez que el invernadero fue llenado con CO_2 se dejó de inyectar el gas y se dejaron los ventiladores encendidos entre 10 y 20 min para asegurar su uniformidad en el invernadero.
5. Ya alcanzada la uniformidad, los ventiladores fueron apagados y las ventanas fueron abiertas, y se midió la temperatura del aire, velocidad del viento, radiación y concentración del gas. Se muestreo cada 10 s y se registraron cada 30s.
6. Las ventanas fueron cerradas cuando la concentración del gas llego a 500 ppm.
7. La concentración se incrementó nuevamente hasta que el nivel inicial fue

alcanzado. El experimento se repitió 3 o 4 veces para diferentes condiciones de viento.

En la Figura 3.6 se observa un esquema de la gráfica de la concentración del gas con respecto al tiempo para este procedimiento.

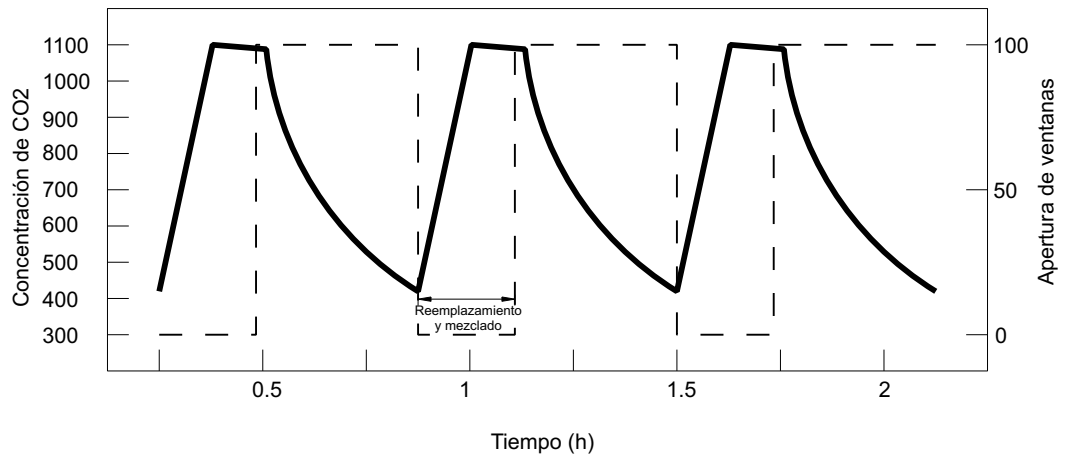


Figura 3.6: Esquema de la gráfica de la concentración del gas trazador con respecto al tiempo para el método dinámico.

Una vez obtenidos los datos de la concentración del gas trazador, la tasa de ventilación se calcula de la siguiente manera (Baptista et. *al.*, 1999):

1. El logaritmo natural de $(C_0 - C_i)$ es graficado contra el tiempo.
2. Un periodo de tiempo t es seleccionado durante el cual el $\ln(C_0 - C_i)$ decrece linealmente (ver Figura 3.7).
3. Una regresión lineal es ajustada a los valores de $\ln(C_0 - C_i)$ sobre este periodo,

$$\ln(C_0 - C_i) = a + Gt \quad (3.1)$$

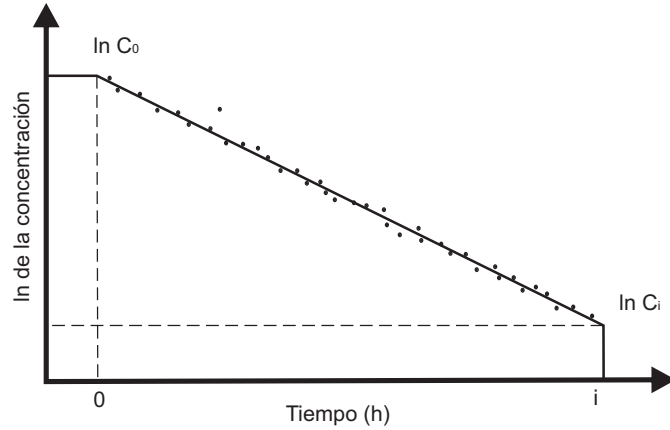


Figura 3.7: Esquema de la gráfica del logaritmo natural de la concentración del gas trazador con respecto al tiempo para el método dinámico.

donde G es la tasa de ventilación en cambios de aire por hora y a es una constante. Esta es negativa porque la concentración del gas decrece durante la medición. G en h^{-1} se calcula con la siguiente Ecuación:

$$G = \frac{\ln(C_0 - C_i)}{t_i - t_0} \quad (3.2)$$

donde t_i y t_0 están en horas. La tasa de ventilación en m^3s^{-1} está dado por $GV/3600$.

4. Se obtienen los valores de la velocidad del viento externa, la radiación y la temperatura interna y externa, sobre el periodo de tiempo seleccionado.

3.5. MODELOS DE VENTILACIÓN

El modelo propuesto por Boulard et. *al.* (1996) para estimar las tasas de ventilación natural en invernaderos usando solo ventanas cenitales se muestra a continuación. El modelo está basado en las dos diferentes fuerzas de la ventilación natural: fuerza de flotabilidad y fuerza del viento. El modelo puede ser escrito de

la siguiente forma (Sase y Reiss, 2002):

$$G = \frac{A_R}{2} C_d \left(2g \frac{\Delta T}{T} \frac{H}{4} + C_w V^2 \right)^{1/2} \quad (3.3)$$

donde G ($m^3 s^{-1}$) es la tasa de ventilación, A_R (m^2) es el área de ventanas cenitales, H (m) es la altura de la ventana a partir del suelo, ΔT (K) es la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del invernadero, T (K) es la temperatura exterior, V (ms^{-1}) es la velocidad del viento a una altura de 8 m, C_d (adimensional) es el coeficiente de descarga, y C_w (adimensional) es el coeficiente del efecto del viento.

Si el invernadero tiene solo ventilación lateral, Kittas et. al. (1996) propuso un modelo que está compuesto por efecto "pared lateral", el cual ocurre cuando un viento paralelo a las ventanas a lo largo de la fachada de un invernadero da un campo de presión estática en los bordes del invernadero, lo que induce un flujo constante en las ventanas que están del lado del sotavento y una salida de flujo por las ventanas que están del lado del barlovento (Kittas et. al., 1997), y efectos turbulentos.

$$G = \frac{A_s}{2} C_d \sqrt{C_w} V \quad (3.4)$$

donde A_s (m^2) es el área de las ventanas laterales, C_d (adimensional) es el coeficiente de descarga, C_w (adimensional) es el coeficiente de presión del viento, y V (ms^{-1}) es la velocidad el viento a 4.5 m a partir del suelo.

Cuando un invernadero está equipado con ventilación cenital y lateral, Kittas et. al. (1997) propuso un modelo que está compuesto del efecto de flotabilidad

debido a la flotabilidad térmica (producido por la diferencia entre la temperatura del aire interior y exterior) y el efecto del viento debido a la acción de la velocidad del viento en la estructura del invernadero (Pérez et. *al.*, 2006).

$$G = C_d \left[\left(\frac{A_R A_S}{\sqrt{A_R^2 + A_S^2}} \right)^2 \left(2g \frac{\Delta T}{T} h \right) + \left(\frac{A_T}{2} \right)^2 C_w V^2 \right]^{1/2} \quad (3.5)$$

donde C_d (adimensional) es el coeficiente de descarga de las ventanas, C_w (adimensional) es el coeficiente de presión del viento, A_S y A_R (m^2) son el área de apertura de las ventanas laterales y cenitales, respectivamente, g (ms^{-2}) es la aceleración de la gravedad, ΔT (K) es la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior, T (K) es la temperatura del aire exterior, h (m) es la distancia vertical ente el punto medio de la ventana lateral y la cenital y V (ms^{-1}) es la velocidad el viento a 4.5 m a partir del suelo.

Según Impron et. *al.* (2007) cuando la reducción de la ventilación por la malla antiáfidos ΔP se conoce, el flujo de aire a través de las ventanas con malla G_{malla} $m^3 s^{-1}$ se estima de la siguiente manera:

$$G_{malla} = G \cdot (1 - \Delta P) \quad (3.6)$$

Romero (2005) determinó experimentalmente la reducción de la ventilación de la malla antiáfidos como la que se utilizó en nuestros invernaderos, y propuso la siguiente ecuación para determinarla:

$$\Delta P = 1.8565V^2 + 1.9901V \quad (3.7)$$

Para el caso del invernadero tipo sierra que tenemos presencia de un cultivo se consideró su efecto con la siguiente Ecuación para estimar la asimilación de CO_2 por el cultivo:

$$P_g = P_{max} \left[1 - \exp \left(-\frac{\alpha I}{P_{max}} \right) \right] \quad (3.8)$$

Esta ecuación se revisó en el capítulo anterior. Entonces para aplicar la fotosíntesis sobre la tasa de ventilación medida con el método de los gases trazadores se le resta de la siguiente manera:

$$G = G' - k \cdot P_g \quad (3.9)$$

donde G' es la tasa de ventilación aparente y se calcula de acuerdo con las Ecuaciones 3.3, 3.4 o 3.5 las cuales no toman en cuenta el efecto del cultivo; k se puede estimar con la Ecuación 2.41

3.6. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE LOS MODELOS

El coeficiente que describe el efecto del viento C_w y el coeficiente de descarga C_d son los dos principales coeficientes en los modelos que estamos estudiando que debemos determinar para cada ventana y tipo de invernadero. La tasa de ventilación generalmente se determina mediante un flujo volumétrico y parámetros climáticos como la temperatura externa, la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior del invernadero, la velocidad del viento y el área de ventanas. Como los parámetros de los modelos son desconocidos, podemos usar diferentes técnicas de regresión lineal o no lineal o simplemente la técnica de mínimos

cuadrados del error como lo es para este caso con la función `lsqnonlin` disponible en Matlab para ajustar las predicciones de las mediciones. Estas técnicas minimizan el error entre los valores medidos y los valores calculados con los modelos descritos por las Ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5.

3.6.1. Coeficiente de descarga

El coeficiente de descarga C_d es función de las características de las ventanas. En el Cuadro 3.2 se presentan los valores para C_d reportados en la literatura, principalmente para ventanas de construcciones verticales continuas o de tipos de invernaderos. Comúnmente los valores para el coeficiente de descarga C_d son de entre 0.6 y 0.8 con un promedio de 0.66. Para éste estudio se tomó dicho rango para la calibración. Bot (1983) experimentalmente determinó la relación de una ventana rectangular sin aletas como sigue:

$$C_d = \left[1.75 + 0.7 \exp \left(- \left(\frac{l_o}{w_o} \right) / 32.5 \right) \right]^{-0.5} \quad (3.10)$$

donde l_o y w_o es el largo y ancho de la ventana respectivamente. Esta Ecuación solo se utilizó para comparar el coeficiente de descarga obtenido con la calibración del modelo.

Sin embargo debe notarse que los valores del coeficiente de descarga corresponden a ventanas sin obstáculos de circulación de aire. Si se consideran obstáculos, el valor de C_d puede decrecer considerablemente como en el caso de la malla antiáfidos empleada por Fantassi et. al. (2002) y Majdoubi et. al. (2007). Un detallado estudio del efecto combinado entre el coeficiente de descarga de las aperturas y de la cubierta vegetal está descrito en Fantassi et. al. (2002).

Cuadro 3.2: Coeficientes de descarga C_d determinados por diferentes autores (Roy et. *al.*, 2002).

Coeficiente de descarga C_d	Condiciones	Fuente
0.6-0.8	Construcción, rectangular	Brown and Solvason (1963)
0.67	Construcción, rectangular	De Gids (1978)
0.6	Construcción, rectangular	Bruce (1978)
0.65-0.7	Invernadero, ventanas cenitales	Bot (1983)
0.63	Construcción, vertical y rectangular	Hellickson y Walker (1983)
0.6-0.7	Construcción, vertical y rectangular	Timmons et. <i>al.</i> (1984)
0.65	Construcción, vertical	Bois et. <i>al.</i> (1988)
0.61	Construcción, vertical y rectangular	Zhang et. <i>al.</i> (1989)
0.65-0.75	Invernadero, ventanas cenitales	De Jong (1990)
0.65	Construcción, rectangular	Randall and Patal (1994)
0.61	Construcción, rectangular	Vandaele y Wouters (1994)
0.644	Invernadero, ventanas continuas	Boulard and Baille (1995)
0.42	Invernadero, con malla antiáfidos	Fatnassi et. <i>al.</i> (2002)
0.25	Invernadero, con malla antiáfidos	Majdoubi et. <i>al.</i> (2007)

3.6.2. Coeficiente debido al viento

El coeficiente C_w corresponde a la influencia del viento sobre la tasa de ventilación y parece ser independiente de la superficie del invernadero (Bailey, 2000) pero es muy dependiente de la dirección del viento. Sin embargo, Boulard y Baille (1995) mostraron que decrece significativamente cuando se incrementa la velocidad del viento. En el Cuadro 3.3 se presentan los valores para C_w reportados en la literatura, principalmente para túneles de áreas muy pequeñas. Comúnmente los valores para el coeficiente de descarga C_d tienen un rango de entre 0.07 y 0.14. Para éste estudio se tomó como rangos para la calibración del coeficiente debido al viento de 0.01 a 0.2.

Cuadro 3.3: Coeficientes debido al viento C_w determinados por diferentes autores (Roy et. *al.*, 2002).

Coeficiente debido al viento C_w	Área del invernadero (m^2) y tipo	Fuente
0.10	416 (2 spans)	Boulard y Baille (1995)
0.14	179 (1 span)	Kittas et. <i>al.</i> (1995)
0.071	900 (túnel)	Kittas et. <i>al.</i> (1996)
0.13	416 (2 spans)	Papadakis et. <i>al.</i> (1996)
0.09	204 (4 spans)	Baptista et. <i>al.</i> (1999)
0.11	38700 (60 spans)	Bailey (2000)
0.11	5600 (Canario)	Fantassi et. <i>al.</i> (2002)
0.14	11250 (Canario)	Majdoubi et. <i>al.</i> (2007)

3.7. ANÁLISIS DE DATOS

Para verificar los resultados, se realizó una comparación entre las tasas de ventilación medidas y calculadas con los modelos. Los valores fueron comparados usando el coeficiente de determinación (r^2), el Cuadrado Medio del Error (CME) y una línea 1:1. Las dos primeras estadísticas son definidos de la siguiente manera:

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G}) (G'_i - \bar{G}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2 \sum_{i=1}^n (G'_i - \bar{G}')^2}} \right)^2 \quad (3.11)$$

y

$$CME = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G}'_i)^2 \right) \quad (3.12)$$

donde G son la tasa de ventilación medido con la técnica de gases trazadores, G' los modelos de las Ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5, n es el número de observaciones.

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los experimentos se realizaron durante 6 meses con el objetivo de tener diferentes condiciones climáticas tanto de temperaturas como de velocidad de viento que son los principales factores que modifican la tasa de ventilación. Así, se midieron tasas de ventilación con velocidades de viento superiores a 4 ms^{-1} e inferiores a 2.5 ms^{-1} y debido a las condiciones de radiación y al tiempo que se mantenía cerrado el invernadero las diferencias de temperatura que fueron de hasta $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ como se muestran en los Cuadros 4.1 y 4.2.

Cuadro 4.1: Valores promedios de los parámetros climáticos durante el periodo de las mediciones para el invernadero tipo capilla. Dentro del paréntesis se da la desviación estándar de los valores.

Configuración del experimento		Temperatura exterior, $^{\circ}\text{C}$	Temperatura interior, $^{\circ}\text{C}$	Velocidad del viento ms^{-1}
Cenital	día 1	23.5 (1.3)	46.0 (2.0)	1.5 (1.3)
	día 2	21.5 (0.9)	31.8 (5.8)	2.0 (0.8)
Lateral	día 1	22.6 (0.5)	38.4 (2.4)	5.4 (0.9)
	día 2	22.89 (1.6)	46.3 (3.7)	1.0 (1.0)
	día 3	21.8 (0.09)	40.6 (0.3)	1.0 (0.7)
Ambos	día 1	21.98 (0.5)	36.69 (2.1)	4.65 (0.9)
	día 2	16.58 (1)	26.26 (3.1)	0.85 (1.3)
	día 3	19.63 (0.75)	34.53 (2.4)	2.58 (0.7)

Para el caso del invernadero tipo sierra se muestra también la radiación solar debido a que se tenía la presencia de un cultivo de tomate y la fotosíntesis de éste afectó a las mediciones de la tasa de ventilación. La fotosíntesis depende principalmente de la radiación PAR que incide al cultivo, de la concentración de CO_2 presente en la atmosfera cercana al cultivo y del índice de área foliar.

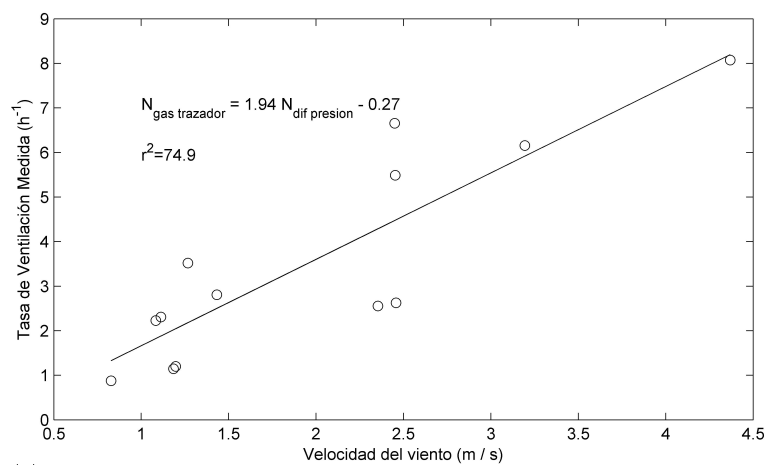
Cuadro 4.2: Valores promedios de los parámetros climáticos durante el periodo de las mediciones para el invernadero tipo sierra. Dentro del paréntesis se da la desviación estándar de los valores.

Configuración del experimento		Temperatura exterior, °C	Temperatura interior, °C	Velocidad del viento ms^{-1}	Radiación PAR interior Wm^{-2}
Cenital	día 1	22.75 (0.85)	32.97 (2.36)	2.82 (1.51)	181.31 (74.15)
	día 2	18.49 (0.37)	23.91 (2.0)	1.11 (0.61)	306.11 (44.45)
	día 3	19.24 (0.58)	19.59 (0.66)	2.82 (1.11)	34.93 (8.12)
Lateral	día 1	21.76 (1.68)	40.98 (4.42)	1.88 (0.99)	733.97 (126.48)
	día 2	18.79 (0.63)	30.64 (2.55)	1.03 (0.80)	605.33 (168.54)
	día 3	18.42 (0.34)	23.89 (0.58)	1.53 (0.82)	384.58 (181.41)
Ambos	día 1	22.61 (1.79)	45.54 (3.94)	3.19 (1.07)	1355.36 (209.28)
	día 2	22.03 (0.31)	33.42 (1.40)	1.65 (0.85)	689.78 (219.90)

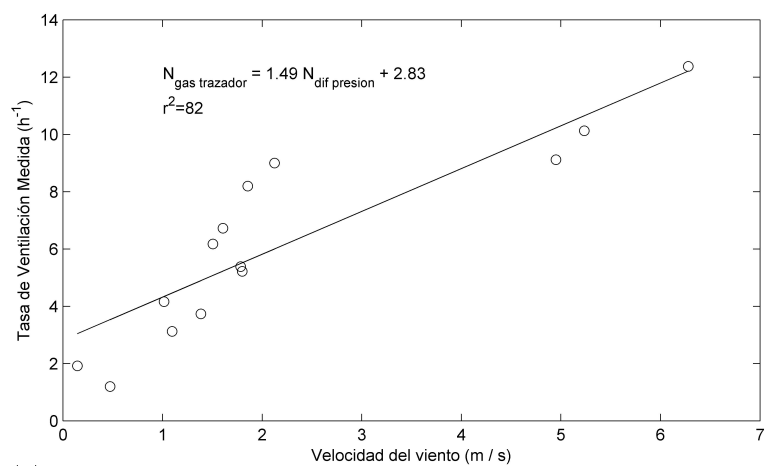
Durante el tiempo de las mediciones, observó un retraso de entre 2 y 4 minutos el efecto de la velocidad del viento.

4.1. EFECTO DEL VIENTO SOBRE LA TASA DE VENTILACIÓN

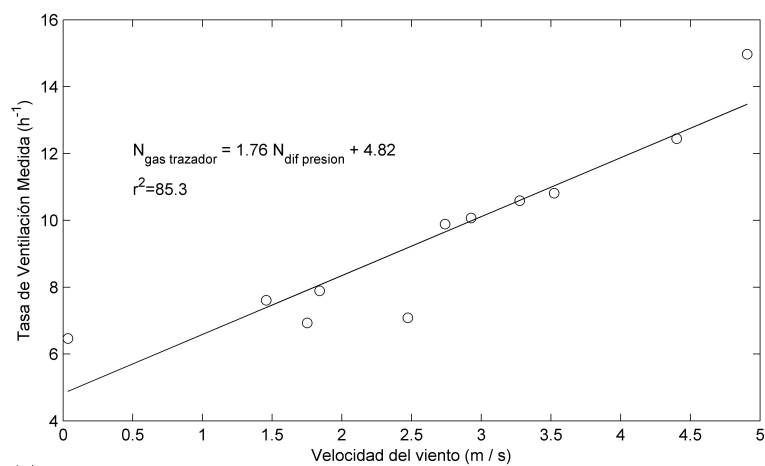
Las tasas de ventilación tienen una alta dependencia de velocidad del viento. Como era de esperarse la tasa de ventilación aumenta conforme se incrementa la velocidad del viento. Por lo que la velocidad del viento es muy importante para la renovación del aire dentro del invernadero y es deseable no tener construcciones fuera del invernadero que obstaculicen este flujo. En la Figura 4.1 se muestra las tasas de ventilación en renovaciones por hora (h^{-1}) en ambos invernaderos para las diferentes condiciones de ventilación donde se puede observar que no importa la configuración de ventanas abiertas que se tenga, la tasa de ventilación siempre es afectada considerablemente por la velocidad del viento en mayor medida para la ventilación lateral.



(a) Tasa de ventilación contra la velocidad del viento para la ventilación cenital.



(b) Tasa de ventilación contra la velocidad del viento para la ventilación lateral.



(c) Tasa de ventilación contra la velocidad del viento para toda la ventilación.

Figura 4.1: Efecto del viento sobre las tasas de ventilación para ambos invernaderos

Katsoulas et. *al.* (2006) muestran que la configuración de ventanas más eficiente es la combinación de ventanas laterales y cenitales y hay una reducción del 4 % cuando solo se utiliza ventanas laterales y de un 71 % cuando solo ventanas cenitales. Para este trabajo se tiene una reducción de 32 % para ventanas cenitales y de 85 % para ventanas laterales.

Sin embargo Papadakis et. *al.* (1996) encontraron que la ventilación más eficiente es cuando se tiene solo ventilación cenital y la peor cuando se tiene solo ventanas laterales.

Bailey (2000) observó que existe una considerable reducción de la velocidad dentro del invernadero con la manera que se coloquen las plantas, teniendo una reducción de 40 % cuando se ponen la filas de plantas perpendiculares a las ventanas y de un 10 a 20 % cuando se ponen paralelas. Para este estudio en el invernadero tipo sierra se tenían las filas de plantas paralelas a las ventanas lo que significó tener muy bajas tasas de ventilación.

4.2. ESTIMACIÓN DE LAS TASAS DE VENTILACIÓN EN EL INVERNADERO TIPO CAPILLA

En el invernadero tipo capilla, como ya se ha mencionado, no se tuvo presencia de cultivo y la tasa de ventilación se modeló sin tomar en cuenta la reducción de la ventilación por la malla antiáfidos, por tanto los coeficientes C_d y C_w fueron calibrados sin tomar en cuenta la resistencia de la malla y ningún obstáculo. Se calculó $C_d = 0.673$ con la Ecuación 3.10 para comparar con lo obtenido después de la calibración.

4.2.1. Ventilación Cenital

Las tasas de ventilación bajo esta configuración se calcularon con la Ecuación 3.3. Se calculó una regresión entre los valores obtenidos con este modelo y los valores obtenidos con la técnica de gases trazadores (Figura 4.2) y se obtuvo un coeficiente de determinación de 92.4 %. Para determinar la precisión del modelo se graficó una recta 1:1 junto con la recta de ajuste de los datos la que nos dio una pendiente de 0.46 y cruza por 0.24 en el eje de los valores estimados, esto nos indica que el modelo está sobreestimando para valores bajos y subestimando para valores altos de tasas de ventilación.

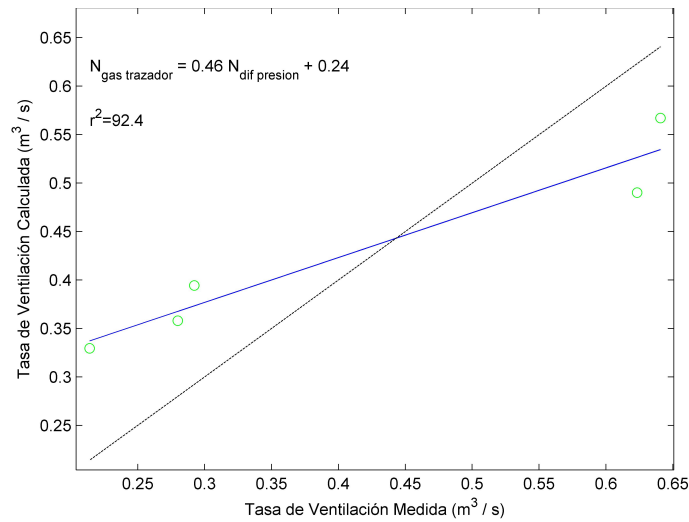


Figura 4.2: Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para las ventanas cenitales para el invernadero tipo capilla.

Además de la línea 1:1 se puede medir la precisión del modelo con el cuadrado medio del error (CME) obtenido con la Ecuación 3.11 que para éste modelo en este invernadero es de 0.01. Los valores de los parámetros obtenidos fueron de $C_d = 0.799$ y $C_w = 0.2$. Como el coeficiente de descarga es mayor que el que se obtuvo con la Ecuación propuesta con Bot (1983) indica que se tiene más obstáculos

que afectan la descarga de las ventanas incluso que la pequeña inclinación de la ventana está afectando. En el caso del coeficiente C_w que resultó ligeramente más alto de los reportados en la literatura.

4.2.2. Ventilación Lateral

Para la configuración de ventanas laterales abiertas se calcularon las tasas de ventilación con el modelo de la Ecuación 3.4 que solo contempla el efecto del viento sobre las tasas de ventilación y no el efecto de la temperatura. En la Figura 4.3 se observa la regresión lineal entre los valores obtenidos entre las tasas de ventilación medidas con la técnica de gases trazadores y calculadas con el modelo obteniendo un coeficiente de determinación de 87.6 %. De acuerdo con la recta de regresión, los valores menores a $2m^3s^{-1}$ son subestimados. Se podrían mejorar los resultados con un modelo que contemple el efecto de temperatura pues a bajas velocidades de viento, es mayor el efecto de la temperatura.

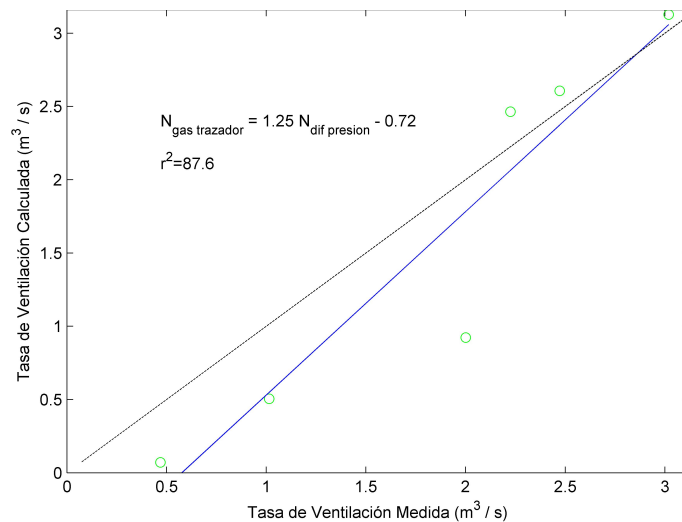


Figura 4.3: Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para las ventanas laterales para el invernadero tipo capilla.

Además de la línea 1:1 se puede medir la precisión del modelo con el cuadrado

medio del error (CME) obtenido con la Ecuación 3.11 que para esta configuración es de 0.28 lo cual significa que se tiene un error promedio de $0.5m^3s^{-1}$ en la precisión de los valores calculados. El valor obtenido mediante la calibración para C_d fue de 0.66 siendo bastante bueno coincidiendo con el modelo experimental y para C_w de 0.06 siendo es un poco bajo en comparación con los reportados en literatura pero parecido a los reportados por Kittas et. *al.* (1996) y Baptista et. *al.* (1999).

4.2.3. Ventilación Cenital y Lateral

En la Figura 4.4 se observa la regresión lineal entre los datos medidos experimentalmente con los valores calculados con la Ecuación 3.5 dando un coeficiente de correlación de 87 % y con la recta de ajuste $N_{gastrazador} = 0.89N_{difpresion} + 0.24$ siendo muy cercana a la recta 1:1, esto significa que el modelo describe muy bien las tasas de ventilación.

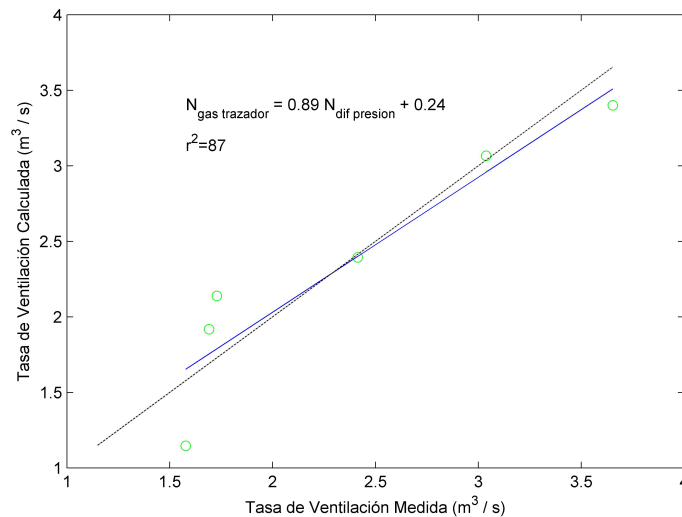


Figura 4.4: Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para todas las ventanas para el invernadero tipo capilla.

Para verificar este buen ajuste se calculó el cuadrado medio del error (CME)

obtenido con la Ecuación 3.11 siendo de 0.078. Este valor corresponde a un error promedio de $0.28 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en los valores calculados. El valor de los parámetros para esta configuración después de la calibración resultaron para C_d de 0.76 y para C_w de 0.05. Como se puede observar C_d es muy alto comparando con el obtenido con la Ecuación 3.10 y como C_w es muy bajo quiere decir que el efecto de la temperatura fue más dominante que el efecto del viento.

4.3. ESTIMACIÓN DE LAS TASAS DE VENTILACIÓN EN EL INVERNADERO TIPO SIERRA

En el caso del invernadero tipo sierra se realizaron dos calibraciones diferentes, la primera fue dejando los parámetros libres, es decir sin poner limitaciones que acoten el rango de posibles valores para los parámetros, y la segunda fue acotando a un rango obtenido de los valores que se encontraron reportados en la literatura mostrados en los Cuadros 3.2 y 3.3.

Para la calibración de los parámetros se tomó en cuenta la reducción de la ventilación debido a la malla y al consumo del gas trazador (CO_2) por la planta. Como los experimentos se realizaron durante varios meses, obviamente tanto la etapa fenológica del cultivo como el índice de área foliar fueron diferentes para cada prueba afectando más las mediciones cuando el cultivo estaba más desarrollado que cuando se realizaron más cercanas a la fecha de trasplante.

El principal problema encontrado durante la realización de los experimentos es la distribución y homogeneización de gas trazador, puesto que se encontraba presente el cultivo de tomate no se podía mantener cerrado por mucho tiempo las ventanas ya que la temperatura se elevaba por arriba de 40°C que esto puede

ser letal para las plantas.

4.3.1. Efecto de la fotosíntesis sobre la tasa de ventilación

Cuando se tiene cultivo dentro del invernadero (en éste caso para el invernadero tipo sierra) y el gas trazador que se utiliza es dióxido de carbono (CO_2), las tasas de ventilación se modifican considerablemente. Este efecto se estimó con la Ecuación 3.8 y a manera de mostrar dicho efecto y la relación que tiene con la radiación PAR y la concentración de CO_2 se presentan la Figura 4.5 donde se muestra la tasa de fotosíntesis por unidad de área con diferentes índices de área foliar. Aquí se puede observar que la fotosíntesis se vuelve asíntota tanto a la radiación como a la concentración de CO_2 pero el nivel de la asíntota depende de otras variables tal como la temperatura y el índice de área foliar (Bontsema et. al., 2007).

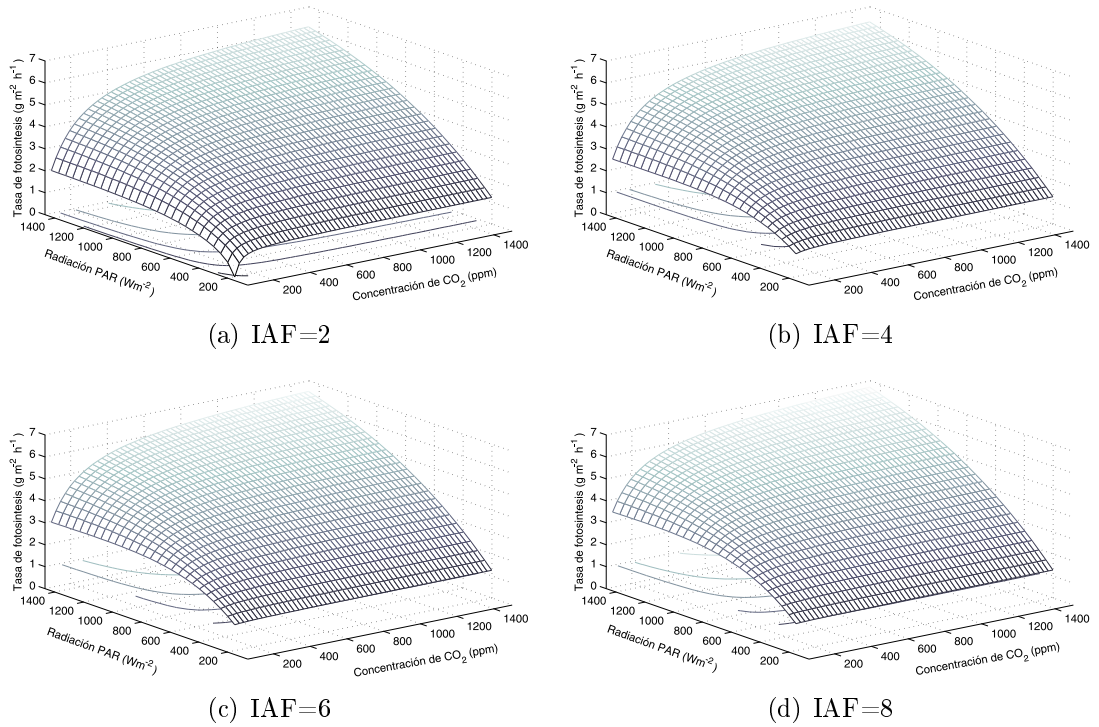


Figura 4.5: Tasa de fotosíntesis para diferentes índice de área foliar

Como el modelo utilizado no contempla el efecto de la temperatura, la tasa de fotosíntesis determinada solo es una aproximación puesto que en los experimentos se realizaron bajo un amplio rango de temperaturas. A pesar de esto los resultados obtenidos están dentro del rango de los que reportan Nederhoff y Vegter (1994) quienes modelaron la fotosíntesis para diferentes cultivos entre ellos el tomate.

En la Cuadro 4.3 se muestra los valores de las tasas de ventilación con el efecto del cultivo comparadas contra los valores despreciando dicho efecto. Como se puede observar la diferencia entre las tasas dependen mucho de la radiación y del índice de área foliar.

Cuadro 4.3: Resultados de las tasas de ventilación medida tomando en cuenta el efecto de las plantas

Configuración del experimento	Tasa de ventilación en m^3s^{-1}		IAF	Radiación PAR interior Wm^{-2}
	Despreciando el efecto de las plantas	Tomando en cuenta el efecto de las plantas		
Cenital	24.03	20.12	1.90	135.24
	28.07	24.41	1.90	253.12
	4.61	1.69	2.55	176.22
	11.54	6.98	3.56	307.01
	13.32	6.74	3.56	295.89
	16.75	10.64	3.56	368.28
	19.14	18.61	4.49	42.22
	16.95	16.59	4.49	27.63
Lateral	29.88	27.21	0.90	562.09
	19.40	15.79	0.90	722.29
	21.63	16.27	0.90	873.84
	17.09	9.44	3.50	374.70
	19.45	11.30	3.50	708.84
	15.31	3.62	3.50	686.90
	22.25	20.34	4.43	162.03
	22.51	18.67	4.43	471.66
Ambas	34.23	30.45	0.47	1451.2
	35.84	32.01	0.47	1102.2
	39.38	32.68	0.47	1333.08
	29.35	23.84	3.61	896.73
	28.84	23.00	3.61	471.34

4.3.2. Ventilación Cenital

En la Figura 4.6 se muestra la regresión lineal de entre los valores medidos con la técnica de gases trazadores y los calculados con la Ecuación 3.3 con los parámetros libres, esto quiere decir que durante la calibración no se pusieron límites para ajustar a un rango los parámetros C_d y C_w obteniendo un coeficiente de determinación de 89.8 %. De acuerdo con la recta de ajuste de regresión el modelo sobreestima los valores menores a $15m^3s^{-1}$ y superiores a ellos subestima.

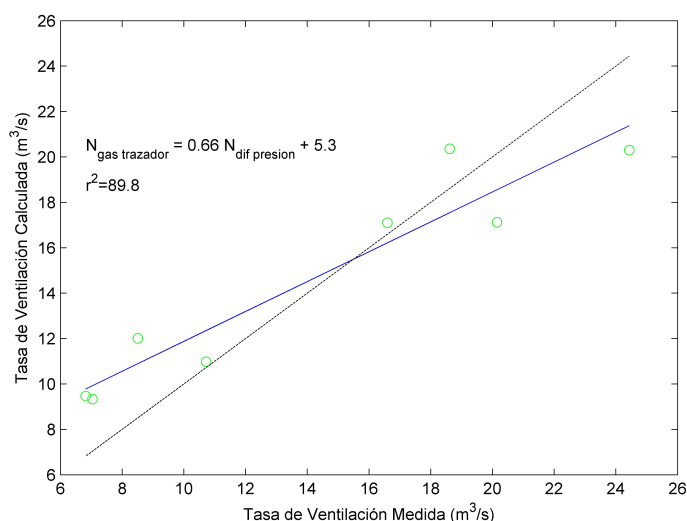


Figura 4.6: Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para las ventanas cenitales para el invernadero tipo sierra considerando el efecto del cultivo de tomate.

Otra forma de medir la precisión es posible con el cuadrado medio del error (CME) que para éste modelo en este invernadero es de 6.83. Lo cual indica un buen ajuste y cercanía a la recta a 45° . Los valores obtenidos de los parámetros en esta calibración son solo para observar el efecto tanto de la velocidad del viento como de la temperatura y no para usarlos en los modelos puesto que incluso para este caso no son lógicos. EL valor de C_d es de 0.37 y el de C_w es de 10, este último llegó al límite que se especificó resultando que el efecto de la velocidad

del viento y la diferencia de temperatura no fue suficiente para provocar estas tasas de ventilación por lo que se puede deducir que existe otro efecto que está modificando las tasas de ventilación, en este caso podrías deberse a la posición de las ventanas cenitales que esta a sotavento creando un efecto de succión y no de empuje como esta descrito en el modelo.

Para el caso en que se usó un rango para los parámetros de acuerdo con los encontrados en la literatura, como era de esperarse disminuyo el grado de ajuste del modelo obteniendo un coeficiente de determinación de 84.9 % (Figura 4.7) que si bien no bajo mucho, la recta 1:1 resulto con una pendiente de 0.16 la cual está muy lejos de 1 subestimando por mucho las tasas de ventilación.

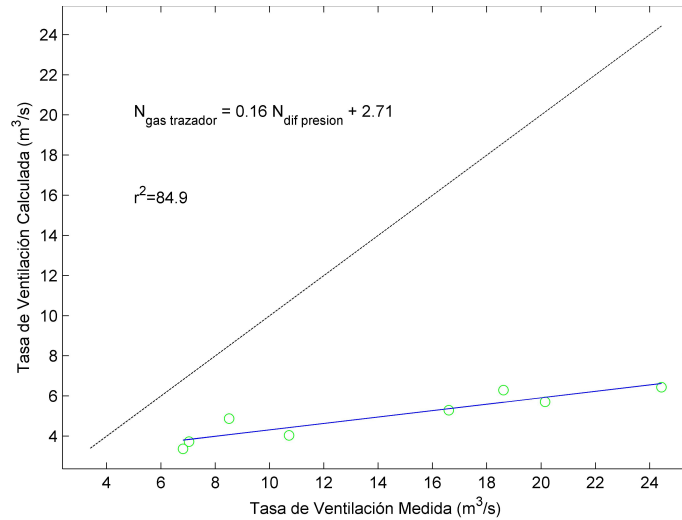


Figura 4.7: Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para las ventanas cenitales para el invernadero tipo sierra considerando el efecto del cultivo de tomate.

El cuadrado medio del error (CME) tiene un valor de 111.36 como resultado de que el modelo subestima en promedio $10.6 m^3 s^{-1}$. Los valores de los parámetros se ajustaron a los valores superiores de los rango propuestos siendo para C_d de 0.8 y para C_w de 0.2. Esto nos indica que existe un efecto diferente a lo que el

modelo describe y por lo tanto subestima las tasas de ventilación.

4.3.3. Ventilación Lateral

En el caso de la ventilación lateral para observar el efecto que tiene la velocidad del viento sobre las tasas de ventilación se dejaron libres los parámetros en la calibración. Se calcularon las tasas de ventilación con el modelo de la Ecuación 3.4 y se generó una regresión lineal con los datos obtenidos experimentalmente (Figura 4.8) dando como resultado un coeficiente de correlación de 84.6 % y la pendiente de la recta de ajuste de 0.63 lo cual significa que para tasas altas de ventilación está subestimando.

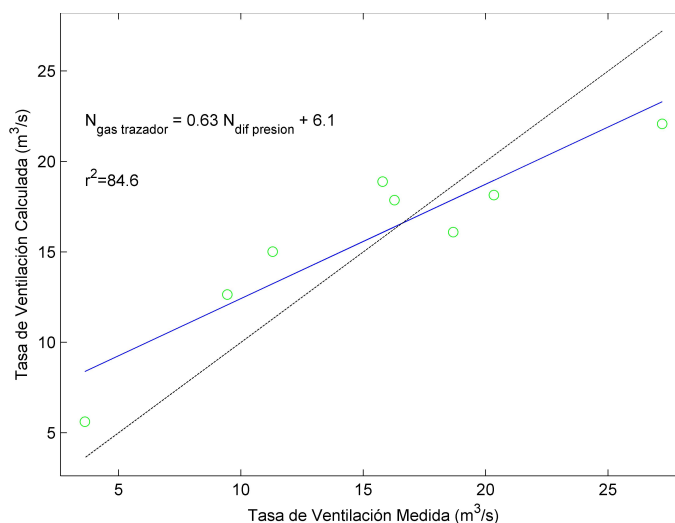


Figura 4.8: Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para las ventanas laterales para el invernadero tipo sierra considerando el efecto del cultivo de tomate.

Observando el cuadrado medio del error (CME) obtenido con la Ecuación 3.11 que para esta configuración es de 9.75 se puede decir que la precisión del modelo es de $3.12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El valor de C_d fue de 1.31 y para C_w de 0.8, esto muestra que el mayor problema que se tiene es la descarga de la ventana y el efecto de la velocidad del viento pues se observó una mayor descarga que la físicamente

posible, llegando a la misma conclusión que en las ventanas cenitales, existe un efecto diferente a lo que contempla este modelo.

Cuando se fijó el rango de los parámetros C_d y C_w se obtuvo un coeficiente de correlación igual a cuando estaban libres (84.6 %). En la Figura 4.9 se observa que el ajuste con respecto a la línea 1:1 es muy baja, pues la pendiente de la recta de ajuste es de 0.19 estimando por debajo del valor medido las tasas de ventilación. Como se puede observar a tasas de ventilación grandes existe un mayor error.

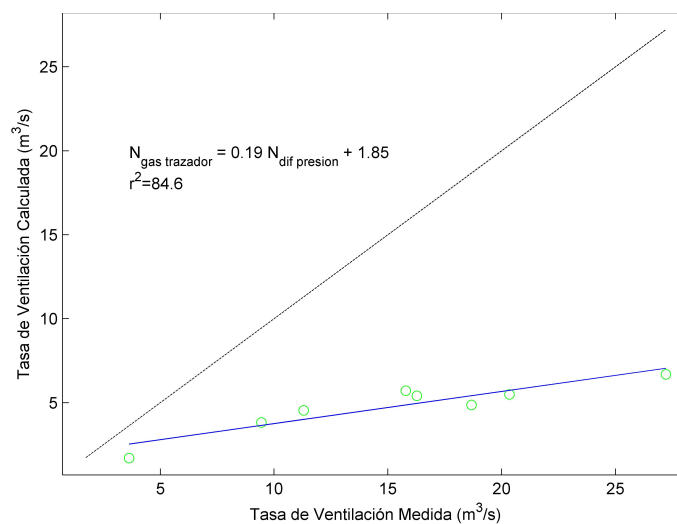


Figura 4.9: Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para las ventanas laterales para el invernadero tipo sierra considerando el efecto del cultivo de tomate.

Apoyando el resultado de la pendiente de la recta de ajuste se tiene el cuadrado medio del error (CME) siendo para esta condición de ventilación de 141.5. De igual manera que para la ventilación cenital, los valores de los parámetros se ajustaron a los límites superiores de los rangos, para C_d de 0.8 y de C_w de 0.2.

4.3.4. Ventilación Cenital y Lateral

Para el modelo propuesto por Kittas *et. al.* (1997), de igual manera que los modelos anteriores, primero se dejanro libres los paramentos para ver los efectos del viento y de la temperatura, en la Figura 4.10 se muestra los resultados. Se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.97% y la pendiente de la curva de regresión de 0.99 lo que indica un ajuste casi perfecto.

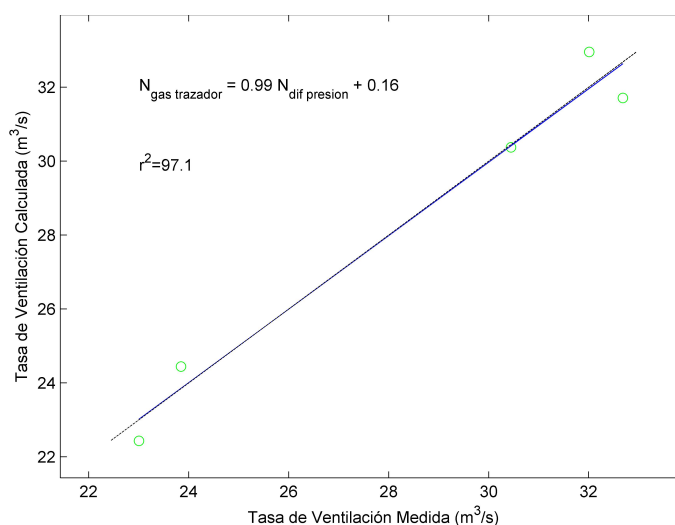


Figura 4.10: Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para todas las ventanas para el invernadero tipo sierra considerando el efecto del cultivo de tomate.

Además la precisión del modelo según el cuadrado medio del error (CME=0.51) es de $0.71m^3s^{-1}$ que tomando en cuenta los rangos de las tasas de ventilación medidas es muy bueno. Inclusive los valores de los parámetros no son tan alejados de los valores encontrados en la literatura. Se obtuvo para C_d un valor de 0.86 que comparado con 0.7 que es el valor calculado con la Ecuación 3.10 se tiene un efecto de obstrucción posiblemente por el cultivo. Para C_w se obtuvo 0.61 que indica que a pesar del buen ajuste, el efecto del viento tendría que ser alto, por las características de la construcción no es posible.

Restringiendo los parámetros a los rangos propuestos (Figura 4.11) , se tiene un coeficiente de correlación de 93.7%. Para determinar la precisión del modelo tenemos la recta de regresión que nos da una pendiente de 0.52 que indica que el modelo está subestimando a pesar de su buen ajuste con el coeficiente de correlación.

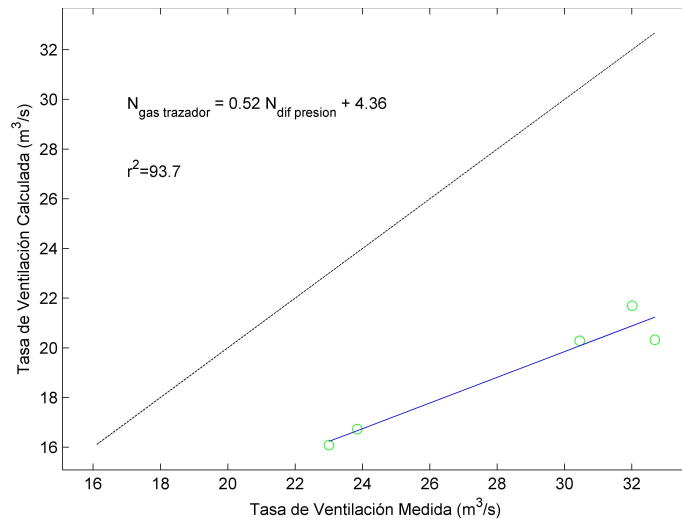


Figura 4.11: Ajuste de regresión de tasas medidas y calculadas para todas las ventanas para el invernadero tipo sierra considerando el efecto del cultivo de tomate.

Observando el cuadrado medio del error (CME) obtenido con la Ecuación 3.11 que es de 92.14 se puede observar que el error promedio es de $9.6m^3s^{-1}$ siendo aproximadamente un 33 % del valor de las tasas de ventilación. Los valores de los parámetros al igual que en los otros dos modelos, obtienen los valores superiores de los rangos propuestos de acuerdo con la literatura, siendo para C_d de 0.8 y para C_w de 0.2.

Capítulo 5

CONCLUSIONES

El método de la caída de la concentración del gas trazador se puede utilizar para medir las tasas de ventilación en invernaderos. Con el método de la caída de la concentración se puede medir tasas de ventilación en un amplio rango de velocidad del viento.

Para invernaderos grandes el principal problema que se observó fue la distribución y homogeneización del gas trazador y se recomienda poner más líneas de distribución y si es posible más sistemas cerrados aumentando así la homogeneización de la presión las salidas u orificios por donde sale el gas. También se recomienda utilizar un ventilador por cada 150 m^2 aproximadamente para poder realizar la homogeneización del gas más rápido y la temperatura del invernadero no se incremente a valores críticos para la planta.

En el invernadero tipo capilla se tuvieron mejores resultados en cuanto a los valores de los parámetros y con ello la estimación de las tasas de ventilación ya que el método de gases trazadores se realizó con una mayor precisión debido a que por las mismas dimensiones de éste se tuvo una mejor homogeneización del gas.

Las tasas de ventilación son una función de la velocidad del viento y de la configuración que se utilice. En este estudio se encontró que para la condición de ventanas laterales y cenitales abiertas al mismo tiempo se tiene una mejor

ventilación y circulación de del aire interno. La diferencia de temperatura del aire interior y exterior parece no influir en las tasas de ventilación pero es un factor fundamental para proceso de ventilación natural.

El principal problema encontrado para que los valores de los parámetros no ajustaran adecuadamente fue la misma construcción del invernadero, ya que se tenía obstáculos cercanos al invernadero modificando el flujo de aire y por tanto modificando el efecto del viento sobre las venanas. Se recomienda realizar estudios sobre el efecto de la reducción de la velocidad del viento debido a los obstaculos que se tienen fuera del invernadero y su efecto sobre las tasas de ventilación.

Un problema para la medición de las tasas de ventilación tal vez no tan notorio fue el tiempo que se invirtió en abrir las ventanas puesto que se requería de 4.5 minutos para que las ventanas estuvieran completamente abiertas, en ese tiempo el gas trazador ya se había salido además que el área de ventanas cambiaba mientras se abrían completamente.

Para el invernadero tipo sierra se recomienda realizar la estimación de las tasas de venitlación con el método del balance de energía para comparar los resultados obtenidos en este trabajo.

Bibliografia

- Bailey, B.J., 2000 *Constraints, limitations and achievements in greenhouses natural ventilation*. Acta Horticulturae 534: 21-30.
- Baille, M.; Laury, J.C.; Baille, A., 1983. *Influence des matériaux de couverture sur les échanges énergétiques d'une serre. (Influence of cover materials on the energy exchanges of a greenhouse)*. Agronomie. 3(3): 197-206.
- Baptista, F.J.; Bailey, B.J.; Randall, J.M.; Meneses, J.F., 1999. *Greenhouse Ventilation Rate: Theory and Measurement with Tracer Gas Techniques*. Journal of Agricultural Engineering Research. 72: 363-374.
- Bot, G.P.A., 1983. *Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model*. Ph.D. Thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Bontsema J., Hemming J., Stanghellini C., de Visser P., van Henten E.J., Budding J., Rieswijk T., and Nieboer S. 2007. *On-line monitoring van transpiratie en fotosyntheseactiviteit*. Wageningen University. Holanda.
- Boulard, T.; Baille, A., 1995. *Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents*. Journal of Agricultural Engineering Research. 61: 37-48.
- Boulard, T.; Draoui, B., 1995. *Natural ventilation of a greenhouse with contin-*

- uous roof vents: Measurements and data analysis.* Journal of Agricultural Engineering Research. 61: 27-36.
- Boulard, T.; Meneses, J.F.; Mermier, M.; Papadakis, G., 1996. *The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses.* Agricultural and Forest Meteorology 79: 61-77.
- Castañeda, R., 2005. *Sistema de control climático inteligente para invernaderos.* Tesis de Doctorado. Querétaro, México.
- Dermati, H.; Boulard, T.; Bekkaoui, A.; Bouirden, L., 2001. *Natural ventilation and microclimatic performance of a large-scale banana greenhouse* Journal of Agricultural Engineering Research. 80(3): 261-271.
- Fatnassi, H.; Boulard, T.; Dermati, H.; Bouirden, L.; Sappe, G., 2002 *Ventilation performance of a large Canarian type greenhouse equipped with insect-proof nets.* Biosystems Engineering. 82(1): 97-105.
- Fernández, J.E.; Bailey, B.J., 1992. *Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates* Agricultural and Forest Meteorology. 58: 229-245.
- Flores, J., 2010. *Análisis del clima en los principales modelos de invernaderos en México (Malla sombra, Multitúnel y Baticenital) mediante la técnica del CFD (Computational Fluid Dynamics).* Tesis Doctoral. Universidad de Almería.
- García, E., 1973. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen: para adaptarla a las condiciones de la Republica Mexicana.* Instituto de Geografía, UNAM. México. 246 p.

- Impron, I.; Hemming, S.; Bot, G.P.A., 2007 *Simple greenhouse climate model as a design tool for greenhouse in tropical lowland*. Biosystems Engineering 98: 79-89.
- Katsoulas, N.; Bartzanas, T.; Boulard, T.; Mermier, M.; Kittas, C., 2006. *Effect of vent openings and insect screens on greenhouse ventilation*. Biosystems Engineering. 93(4): 427-436.
- Kittas, C.; Draoui, B.; Boulard, T., 1995. *Quantification du taux d'aération d'une serre à ouvrant continu en toiture. (Quantification of the ventilation of a greenhouse with a roof opening)*. Agricultural and Forest Meteorology. 77: 95-111.
- Kittas, C.; Boulard, T.; Mermier, M.; Papadakis, G., 1996. *Wind induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings*. Journal of Agricultural Engineering Research. 65: 37-49.
- Kittas, C.; Boulard, T.; Papadakis, G., 1997. *Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: sensitivity to temperature and wind effects*. Transactions of the ASAE 40(2): 415-425.
- Kittas, C.; Boulard, T.; Bartzanas, T.; Katsoulas, N.; Mermier, M., 2002. *Influence of an insect screen on greenhouse ventilation*. Transactions of the ASAE 45(4): 1083-1090.
- Majdoubi, H.; Boulard, T.; Hanafi, A.; Bekkaoui, A.; Fatnassi, H.; Dermati, H.; Nya, M.; Bouirden, L., 2007. *Natural ventilation performance of a large green-*

house equipped with insect screens. Transactions of the ASABE 50(2): 641-650.

Montero, J.I.; Antón, A.; Muñoz, P., 2010. *Refrigeración de invernaderos I: ventilación natural.* (en línea) 23 de febrero de 2010 en www.recercat.net/bitstream/2072/4568/1/Refrigeraci%C3%B3n+d...ntilaci%C3%B3n+natural.pdf

Nederhoff, E.M.; Van de Vooren, J.; Udink ten cate, A. J., 1985. *A practical tracer gas method to determine ventilation in greenhouse.* Journal of Agricultural Engineering Research. 31: 309-319.

Nederhoff, E.M.; Vegter, J. 1994. *Canopy photosynthesis of tomato, cucumber and sweet pepper in greenhouse: Measurements compared to models.* Annals of Botany. 73: 421-427.

Papadakis, G.; Mermier, M.; Meneses, J.F.; Boulard, T., 1996. *Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings.* Journal of Agricultural Engineering Research. 63: 219-228.

Peart, Robert M.; R. Bruce Curry. 1998. *Agricultural systems modeling and simulation.* Marcel Dekker, Inc. The University of Florida, Gainesville, Florida.

Pérez, J.; Baeza, E.; Pérez, C.; López, J.C.; Montero, J.I., 2003. *Influencia de las ventanas laterales sobre la ventilación natural en invernadero tipo parral.* Acta Horticulturae. 39: 419-421.

- Pérez, J.; Baeza, E.; Montero, J.I.; Bailey, B.J., 2004. *Natural Ventilation of Parral Greenhouse*. Biosystem Engineering. 87(3): 355-366.
- Pérez, J.; Berenguel, M.; Rodríguez, F.; Ramírez, A.A., 2006. *Ventilation rate models of mediterranean greenhouses for control purposes*. Acta Horticulturae. 719: 197-204.
- Romero, P., 2005. *Modeling of natural ventilation rates for mexican greenhouses*. Tesis de maestria. The University of Arizona.
- Romero, P.; López, I.L.; Choi, C.Y., 2008. *Analysis of greenhouse natural ventilation under the enviromental conditions of central México*. Transaction of the ASABE. 51(5): 1753-1761.
- Romero, P.; Choi, C.Y.; López, I.L., 2010. *Enhancement of the greenhouse air ventilation rate under climate conditions of central México*. Agrociencia. 44: 1-15.
- Rosell, F.G.; Garduño, X.S.; Berenguer, J.S., 2010 *El control de la ventilación mediante gases trazadores*. Intituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. España. (en linea) 28 de octubre de 2010 en www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp345.pdf
- Roy, J.C.; Boulard, T.; Kittas, C.; Wang, S., 2002. *Convective and ventilation*

transfer in greenhouses, Part 1: the greenhouse considered as a perfectly stirred tank. Biosystem Engineering. 83(1): 1-20.

SAGARPA, 2008. *Plan nacional de agricultura protegida.* (en linea) 11 de noviembre de 2010 en

[www.amhpac.org/contenido/plan %20nacional %20de %20agricultura %20protegida %202009.pdf](http://www.amhpac.org/contenido/plan%20nacional%20de%20agricultura%20protegida%202009.pdf)

Sase, S.; Reiss, E., 2002. *Developing a natural ventilation model for open roof greenhouses.* Center for controlled environment agriculture, cook college, Rutgers University.

Sherman, M.H., 1990. *Tracer gas techniques for measuring ventilation for a single zone.* Building and Environment. 25(4): 365-374.

Steta, M., 1999 *Status of the greenhouse industry in México.* Acta Horticulturae 481: 735-738.

Wallach, D., Makowsky, D., Jones, J.W. 2006. *Working with dynamic crop models. Evaluation, analysis, parametrization and applications.* Elsevier, pp. 447.

Wang, S.; Deltour, J.M., 1996. *An experimental ventilation function for large greenhouse based on a dynamic energy balance model.* Center for controlled environment agriculture, cook college, Rutgers University.

Wang, S.; Boulard, T., 2000. *Predicting the microclimate in a naturally ventilated plastic house in a mediterranean climate.* Journal of Agricultural Engineering Research. 75: 27-38.

Zuñiga, E.L.; Martinez, H.J. de J.; Baca, C.G.; Martínez, G.A.; Tirado, T.J.;

Kohashi, S.J. 2004. *Producción de chile pimiento en dos sistemas de riego*

bajo condiciones hidropónicas. Agrociencia 38: 207-218.

Apéndice A

IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS

```

1  /*-----*
2  * Modelos de Tasas de Ventilación en Invernaderos *
3  * Tesis de Maestria de Daniel Espejel Trujano *
4  * Posgrado IAUIA, Universidad Autonoma Chapingo *
5  * Chapingo Mex., Diciembre de 2010 *
6  * Revision: Diciembre de 2010 *
7  *-----*/

8  clear all;
9  clc;

10 % Variables globales
11 global UTS1 UT1 Param NS1

12 % inicializacion de los datos
13 % Seda crea la varialbe TIV com 1, 2 o 3 dependiendo del modelo de ventilación
14 % cenital, lateral o lateral+cenital respectivamente, segun sea el caso
15 TIV=1;

16 % Lectura de los datos en archivos *.xls
17 if TIV==1
18     disp('Ventilacion Cenital')
19     TempIntS1=xlsread('D:\Cenital\Datos.xls','TemIntS1');
20     TempExtS1=xlsread('D:\Cenital\Datos.xls','TemExtS1');
21     VelVientoS1=xlsread('D:\Cenital\Datos.xls','VelVientoS1');
22     ppm1=xlsread('D:\Cenital\Datos.xls','ppm');
23     LNppm1=xlsread('D:\Cenital\Datos.xls','LNppm');

24 elseif TIV==2
25     disp('Ventilacion Lateral')
26     TempIntS1=xlsread('D:\Lateral\Datos.xls','TemIntS1');
27     TempExtS1=xlsread('D:\Lateral\Datos.xls','TemExtS1');
28     VelVientoS1=xlsread('D:\Lateral\Datos.xls','VelVientoS1');
29     ppm1=xlsread('D:\Lateral\Datos.xls','ppm');
30     LNppm1=xlsread('D:\Lateral\Datos.xls','LNppm');

31 elseif TIV==3
32     disp('Ventilacion Cenital y Lateral')
33     TempIntS1=xlsread('D:\CenitalLateral\Datos.xls','TemIntS1');
34     TempExtS1=xlsread('D:\CenitalLateral\Datos.xls','TemExtS1');
35     VelVientoS1=xlsread('D:\CenitalLateral\Datos.xls','VelVientoS1');
36     ppm1=xlsread('D:\CenitalLateral\Datos.xls','ppm');
37     LNppm1=xlsread('D:\CenitalLateral\Datos.xls','LNppm');
38 end

```

```

39 % Constantes
40 Ar=237.53; % Área de las ventanas cenitales
41 As=310.392; % Área de las ventanas laterales
42 H=1.1; % Altura de las ventanas cenitales
43 h=2.6; % Distancia de centro a centro de las ventanas laterales y cenitales
44 g=9.81; % Aceleración de la gravedad
45 VolInver=10881.9132; % Volumen del inveradnero

46 % Parámetros
47 Cd=0.7; % Valor del coeficiente de descarga
48 Cw=0.1; % Valor del coeficiente debido al viento

49 % Variables
50 cont=1;
51 l=size(ppm1,2);
52 UTS1=[VelVientoS1 TempIntS1 TempExtS1];
53 UT1=[ppm1 LNppm1];
54 Param=[TIV Cd Cw cont Ar As g h H l VolInver];

55 % Calculo de las tasas de ventilación con los modelos
56 y=Tasa(Cd,Cw);

57 viento=y(:,3); % Velocidad del viento promedio
58 TasaM=y(:,1); % Tasas de ventilacion medidas
59 N=y(:,2); % Tasas de ventilación calculadas por los modelos

60 % Graficas de las tasas de ventilacion vs velocidad del viento
61 figure(1);
62 set(gcf,'Name','Tasas de Ventilación')
63 set(gcf,'WindowStyle','docked')
64 plot(viento,N,'ob');
65 hold on
66 plot(viento,Tasa1,'or');
67 legend('Calculado','Medido')

68 % Regresion lineal entre mediciones y predicciones
69 X=[Tasa1 ones(size(N,1))];
70 [B,BINT,R,RINT,STATS]=regress(N,X);
71 figure(2);
72 set(gcf,'Name','Regresion')
73 set(gcf,'WindowStyle','docked')
74 plot(Tasa1,N(:,1),'go');
75 hold on;
76 p=X\N(:,1);
77 ysim=X*p;
78 plot(Tasa1,ysim,'b-');
79 xlabel('Tasa de Ventilación Medida (m³ / s)');
80 ylabel('Tasa de Ventilación Calculada (m³ / s)');
81 % Linea de regresion y r²
82 if B(2)>0
83     text(min(Tasa1),max(N(:,1))-0.5,sprintf('N_gas trazador = % g N_dif presion
84 + % g',round(B(1)*100)/100,round(B(2)*100)/100));
85 else
86     text(min(Tasa1),max(N(:,1))-0.5,sprintf('N_gas trazador = % g N_dif presion

```

```
87     - % g',round(B(1)*100)/100,round(abs(B(2))*100)/100));  
88 end  
89 text(min(Tasa1),max(N(:,1))-1,sprintf('r2= % g',round(STATS(1)*1000)/10));
```

Apéndice B

FUNCIÓN TASA

```

1 function y=Tasa(Cd,Cw)
2 global UTS1 UT1 Param NS1

3 TIV=Param(1);
4 cont=Param(4);
5 As=Param(6);
6 Ar=Param(5);
7 g=Param(7);
8 h=Param(8);
9 H=Param(9);
10 VolInver=Param(11);
11 l=Param(10);

12 VelVientoS1=UTS1(:,1:l+1);
13 TempIntS1=UTS1(:,l+1:(2*l)+1);
14 TempExtS1=UTS1(:,(2*l)+1:(3*l)+1);
15 ppm1=UT1(:,1:l+1);
16 LNppm1=UT1(:,l+1:(2*l)+1);

17 i=1;
18 j=2;
19 while i<=l
20 TempIntSS1=TempIntS1(1,i);
21 TempExtSS1=TempExtS1(1,i);
22 VelVientoSS1=VelVientoS1(1,i);

23 cual=isnan(TempIntS1(:,i));
24 TempIntSS1=TempIntS1(find(cual==0),i);
25 TempExtSS1=TempExtS1(find(cual==0),i);
26 VelVientoSS1=VelVientoS1(find(cual==0),i);

27 TempIntS11(:,i)=mean(TempIntSS1);
28 TempExtS11(:,i)=mean(TempExtSS1);
29 VelVientoS11(:,i)=mean(VelVientoSS1);

30 deltaTS1=(TempIntSS1+273.15)-(TempExtSS1+273.15);
31 TExtS1=TempExtSS1+273.15;
32 VVS1=VelVientoSS1;

33 if TIV==1
34 % Tasas de Cenital
35 NS1(:,i)=mean(Ar./2.*Cd.*((2.*g.*((deltaTS1)./(TExtS1)).*(H/4))+Cw.*VVS1.^2).^(0.5)/15);
36 Cdcl(i,:)=Cd;
37 Cwcl(i,:)=Cw;
38 elseif TIV==2

```

```

39 % Tasas de Lateral
40 NS1(:,i)=mean((As/2*Cd*(Cw).^0.5.*VVS1)/15);
41 Cdcl(i,:)=Cd;
42 Cwcl(i,:)=Cw;
43 elseif TIV==3
44 % Tasas de Cenitla+Lateral
45 NS1(:,i)=mean(Cd.*(((Ar.*As)./(sqrt(Ar.^2+As.^2))))).^2.*(2.*g.*((deltaTS1)./(TExtS1)).*h)+
46 ((Ar+As)./2).^2.*Cw.*(VVS1).^0.5./15);
47 Cdcl(i,:)=Cd;
48 Cwcl(i,:)=Cw;
49 end
50 i=i+1;
51 j=1;
52 end

53 % Lectura de las tasas de ventilación medidas
54 if TIV==1
55     TasaVent=xlsread('D:\Cenital\Tasa.xls',sprintf('A2:D %g',l+1));
56     TasaVentM=TasaVent(:,4)*VolInver/3600;
57     PromTasaS1=[TasaVentM,NS1',VelVientoS11',TempIntS11',TempExtS11',Cdcl,Cwcl];
58 elseif TIV==2
59     TasaVent=xlsread('D:\Lateral\Tasa.xls',sprintf('A2:D %g',l+1));
60     TasaVentM=TasaVent(:,4)*VolInver/3600;
61     PromTasaS1=[TasaVentM,NS1',VelVientoS11',TempIntS11',TempExtS11',Cdcl,Cwcl];
62 elseif TIV==3
63     TasaVent=xlsread('D:\CenitalLateral\Tasa.xls',sprintf('A2:D %g',l+1));
64     TasaVentM=TasaVent(:,4)*VolInver/3600;
65     PromTasaS1=[TasaVentM,NS1',VelVientoS11',TempIntS11',TempExtS11',Cdcl,Cwcl];
66 end

67 y=[PromTasaS1];
68 end

```