



## III CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2017

Puebla, Pue., del 28 al 30 de noviembre de 2017

### DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) PARA MODELAR Y OPTIMIZAR EL AMBIENTE DE UN INVERNADERO

Jorge Flores Velázquez<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532. Jiutepec, Morelos, México.

[Jorge\\_flores@tlaloc.imta.mx](mailto:Jorge_flores@tlaloc.imta.mx) - 777 329 3658 (\*Autor de correspondencia)

#### Resumen

En la actualidad los invernaderos mexicanos con cubierta de plástico usan la ventilación natural como el método principal para controlar la temperatura y la humedad relativa. Básicamente tienen ventiladores laterales y cenitales. Se cree que esto es suficiente para lograr condiciones climáticas óptimas dentro del invernadero. Sin embargo, hasta ahora no se han realizado estudios del movimiento dinámico del aire en un invernadero típico mexicano. En esta investigación se usan modelos basados en dinámica de fluidos computacional, en lo sucesivo CFD, para mostrar el movimiento de aire que se genera debido al sistema de ventilación natural que un invernadero utiliza para remover los excesos de calor que se acumulan en ciertos periodos del año. Se resolverán problemas tipo de dinámica de fluidos computacional para simular el comportamiento espacial de la temperatura y los flujos del aire, así como ventilación del invernadero. La dinámica de fluidos computación (CFD) representa una herramienta complementaria en el análisis del movimiento de los fluidos. Los resultados de las simulaciones en el polígono de 4 módulos, se muestran en una serie de imágenes que permiten observar el movimiento del aire y su consecuente aporte en la forma de refrigerar el invernadero, dado el sistema de ventilación natural.

**Palabras clave adicionales:** gradiente térmico, porosidad, zona de confort, eficiencia energética.



## **Introducción**

La producción en los invernaderos mexicanos se caracteriza mayormente por la aplicación de conocimientos empíricos en la mayoría de los procesos de producción. Es innegable que aplicando conocimientos científicos no solo se pueden mejorar muchos aspectos del cultivo sino también obtener un producto de más alta calidad a menor costo para el agricultor que le permita cumplir los estándares que el mercado nacional e internacional exige. La producción de hortalizas puede hacerse de tal forma que el control del clima en el invernadero permita optimizar la producción, es decir, obtener la más alta productividad, pero minimizando los costos de operación del invernadero y del cultivo. Como ha sido mostrado recientemente (Van Henten, 1994; Tap, 2000; López-Cruz, 2002, 2003; Ramírez-Arias, 2005), una opción para la producción en condiciones de invernadero es la aplicación de la teoría de control óptimo en la operación y manejo del ambiente. Sin embargo, la aplicación de cualquier estrategia de control, la optimización y la generación de estrategias de manejo del sistema invernadero requiere de modelos matemáticos. La generación de un modelo matemático requiere la síntesis del conocimiento existente y generación de conocimientos nuevos sobre un proceso o sistema.

En cultivos en invernadero, una herramienta numérica que se ha extendido para el análisis de los sistemas de ventilación es aquella que utiliza las ecuaciones básicas del movimiento del aire (fluidos) para explicar su comportamiento, y con ello mostrar las variaciones en las propiedades físicas de ese aire; esta técnica es lo que se conoce como dinámica de fluidos computacional o CFD por sus siglas en inglés "Computational Fluid Dynamics", el cual pretende, mediante el planteamiento de condiciones de frontera predecir la distribución del flujo del aire en el interior del invernadero.

### **Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)**

Los modelos matemáticos agregados (basados en balances de energía y masa) suponen un ambiente homogéneo del invernadero. Sin embargo, un monitoreo más detallado del ambiente refleja una variabilidad bidimensional y tridimensional de las variables climáticas. Por ejemplo, cuando se estudian las tasas de ventilación generalmente no se distingue entre el movimiento del aire en el espacio ocupado por las plantas y aquel arriba de las mismas. Recientemente, este problema se ha empezado a atacar considerando las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos. El conjunto de métodos numéricos empleados para obtener soluciones de esas ecuaciones se denominan Dinámica de Fluidos Computacional. Las técnicas de CFD tratan los valores de las variables dependientes como incógnitas primarias en un número finito de lugares, entonces unos conjuntos de ecuaciones algebraicas se derivan a partir de las ecuaciones fundamentales aplicadas al dominio y son resueltas mediante algoritmos preestablecidos. Tres principios físicos fundamentales soportan las conocidas ecuaciones de Navier-Stokes: conservación de masa, momento y energía. Estas



se obtienen a partir de un balance de energía de un volumen de control. La ecuación de conservación generalizada es:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{u}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S \quad (1)$$

Donde los cuatro términos son conocidos como transitorios, convección, difusión y fuente, respectivamente. La variable  $\phi$  representa cualquier variable dependiente como masa, velocidad, especie química o temperatura que describen las características de un flujo en todos los lugares en un tiempo determinado ( $\phi = \phi(x,y,z,t)$ ), en un sistema cartesiano bajo una descripción de flujo de Euler. Los estudios computacionales del flujo y transferencia de calor se basan principalmente en la solución de estas ecuaciones, junto con las condiciones iniciales particulares y de frontera que complementan, completan o cierran el problema. A pesar de que los programas comerciales de dinámica de fluidos computacional han sido diseñados con un ambiente amigable para el usuario, es una buena idea emplear problemas tipo (benchmarks) para minimizar la posibilidad de especificar erróneamente la configuración del modelo numérico (Alhelal, 1998; Romero-Gomez; 2005, Romero-Gómez; *et al.*, 2008; Rico-Garcia *et al.*, 2008).

Molina-Aiz *et al.* (2004) optimizaron el tamaño del invernadero, su área de ventilación, localización, tipo de ventanas, así como diferentes en efecto de diferentes mallas anti-insectos, sobre la ventilación natural en invernaderos tipo Almería, mediante Dinámica de Fluidos Computacional. Baeza *et al.* (2004) estudiaron el efecto del tamaño de las ventanas laterales y cenitales sobre las tasas de ventilación natural de invernaderos tipo Parral mediante simulaciones Dinámica de Fluidos Computacional. Romero-Gomez (2005), aplicó dinámica de fluidos computacional para estudiar la ventilación natural de un invernadero en el centro de México y encontró que los tamaños de ventanas laterales y cenitales tienen un papel crítico sobre la temperatura del invernadero. Evaluó por primera vez, para el caso de México, el efecto que las mallas anti-insectos tienen sobre la velocidad del viento, empleando un túnel de viento para caracterizar las propiedades aerodinámicas de las mallas. Ventilación mecánica y la combinación de ventilación mecánica y natural son incipientes (Flores-Velazquez, 2010) sin embargo donde se ha aplicado se observa buena concordancia y los resultados indican un incremento en la tasa de ventilación cuando se combina la ventilación cenital natural con la mecánica.

## Materiales y métodos

Metodológicamente el procedimiento básico comprende tres etapas que pueden ser ejecutadas en serie, el **preproceso**, la **solución** y el **post-proceso**. Durante el proceso previo la geometría (límites físicos) del problema, se define.

:



El volumen ocupado por el líquido se divide en las células discretas (el acoplamiento). El acoplamiento puede ser uniforme o no uniforme. Se define el modelar de la comprobación, por ejemplo, las ecuaciones de movimientos + de la entalpía + de la conservación de la especie, y se definen las condiciones de límite. Quizás se debe especificar  $\phi$  en 1 para momentum y energía. Esto implica el especificar del comportamiento de las características del fluido en los límites del problema. Para los problemas transitorios, las condiciones iniciales también se requieren. Se comienza la simulación y las ecuaciones se solucionan de manera iterativa como de estado estacionario o transitorio. Finalmente, un post-procesador se utiliza para el análisis y la visualización de la solución que resulta.

El CFD requiere primero la definición del dominio o zona en estudio (por ejemplo, una sección de un invernadero) y las condiciones de contorno (propiedades de la cubierta del invernadero, velocidad del aire de entrada al dominio, etc.). Posteriormente se divide el dominio en una serie de elementos de cálculo. A cada uno de esos elementos se le aplican las ecuaciones de transporte (masa, cantidad de movimiento y energía) y mediante un procedimiento iterativo se resuelven las ecuaciones y se obtienen los campos de velocidad, presión, temperatura o cualquier otra variable física que intervenga en el proceso en estudio.

El método de la discretización utilizado es del volumen finito. Éste es “el acercamiento clásico” o estándar usado lo más a menudo posible en códigos comerciales del software y de la investigación. Las ecuaciones que gobiernan se solucionan en volúmenes discretos del control. Este acercamiento integral rinde un método que sea intrínsecamente conservador (es decir, las cantidades tales como densidad siguen siendo físicamente significativas).

Bajo estas premisas, al final se pretende mediante los modelos numéricos de dinámica de fluidos computacional (CFD) del invernadero hacer un estudio de la dinámica del aire en un invernadero, que tome en cuenta las variables climáticas a estudiar dentro y fuera de invernaderos.

### **Análisis y discusión de resultados**

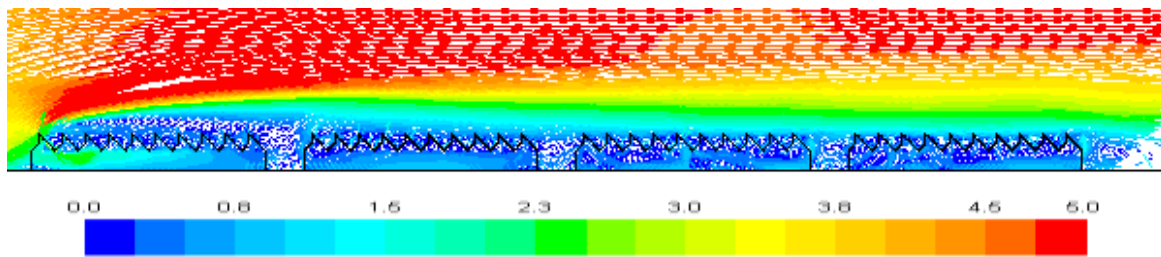
Una situación muy común en la horticultura mexicana es la construcción de un módulo con varias naves, pero más aún, la construcción de varios módulos apenas separados entre sí; a continuación, se muestra el comportamiento del sistema de ventilación natural en este tipo de arreglo.

Construcción de un polígono (Clúster) de 4 módulos de invernaderos de 10 naves cada uno (4.8 m cada nave), se analiza el sistema de ventilación natural, constituido por las ventanas laterales y cenitales.

El movimiento del aire y consecuente forma de refrigerar que aporta el sistema de ventilación natural, que consiste en la totalidad de ventanas cenitales (4 módulos) abiertas de frente al viento y ambas frontales, es decir de entrada y de salida de

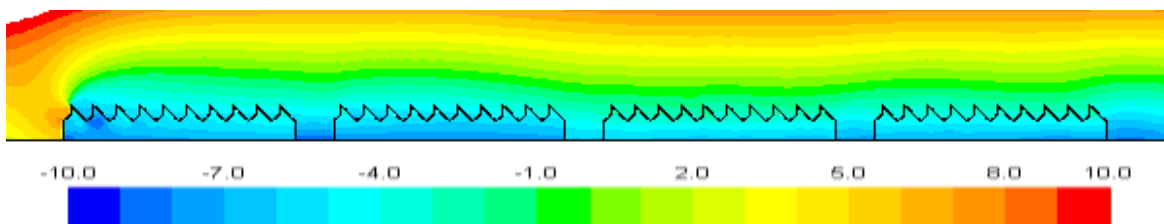


cada uno de los módulos, se muestra en una serie de imágenes. La Figura muestra las direcciones y velocidades del viento (coloreado por magnitud [ $\text{m s}^{-1}$ ]) que se genera en los 4 módulos.

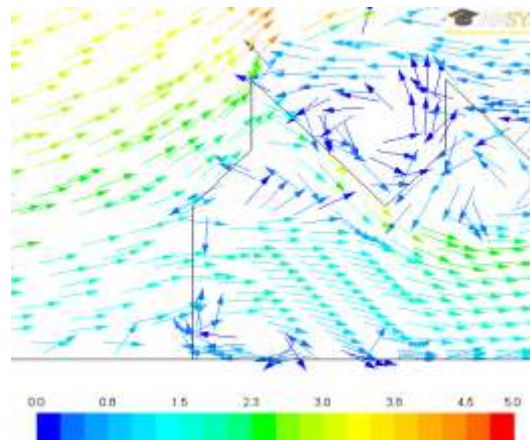


**Figura 1.** Distribución espacial del flujo de aire (Vectores de velocidad, coloreados por magnitud) en la interacción interior/exterior del polígono, cuando en el exterior se simulan  $4 \text{ m s}^{-1}$ .

El choque del aire contra el primer módulo, provoca una desaceleración que determina los patrones expuestos, en la Figura puede apreciarse el vacío (presiones negativas) que se origina en las primeras nave del módulo I y II; esta diferencia de presiones respecto del interior está influenciando la entrada del aire, tal como se muestra en la Figura .



**Figura 2.** Diferencia de presiones (Pa) que origina los patrones de ventilación del caso expuesto.



**Figura 3.** Detalle del movimiento del aire (vel. viento  $\text{m s}^{-1}$ ) en la entrada del polígono (nave 1 modulo I).

La reducción en el área de paso, así como la colocación de mallas porosas en las ventanas causan una drástica reducción en las velocidades del viento; pero



además son el origen del patrón de velocidades y direcciones que determinan el clima del invernadero.

Un aspecto importante es la separación "adecuada" entre los módulos, ya que generalmente es en esta zona donde se tiene mayor dificultad para remover el aire, debido al "choque" de fuerzas que ocurre en esta zona, como se muestra en la Figura en ambos casos se aprecia una zona de turbulencia que impide el libre flujo del aire. Pero no solo en las interacciones de los módulos pueden encontrarse problemas debido al choque de flujos, sino también al interior de los módulos, como es el caso del Módulo 3, donde el encuentro de fuerzas ocasiona una zona de baja velocidad

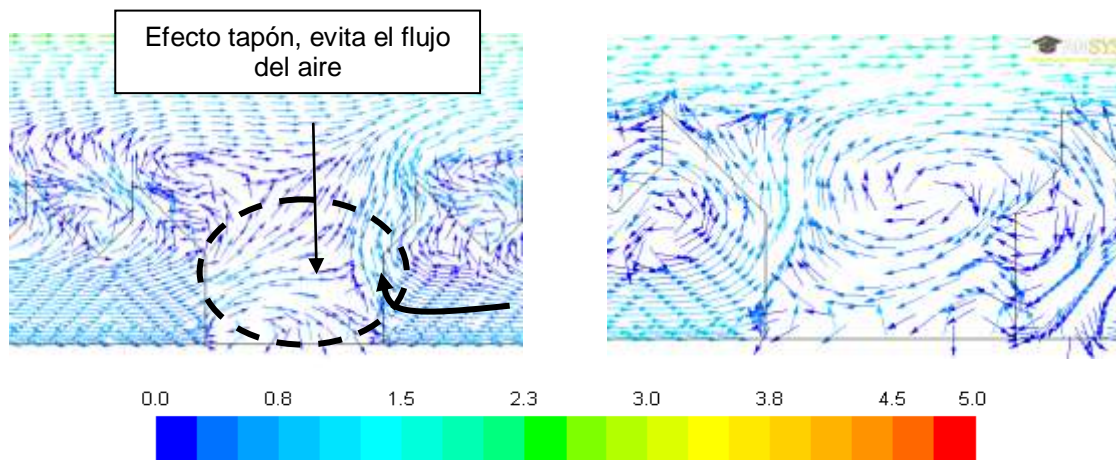


Figura 4. Zona de fluctuaciones al final de M1 inicio del M2 (A) y su similar entre el M3 Y M4.

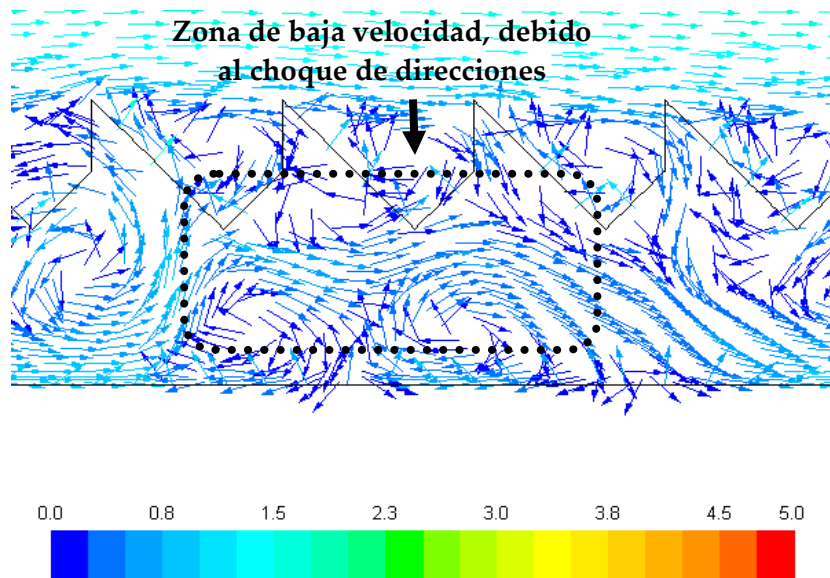
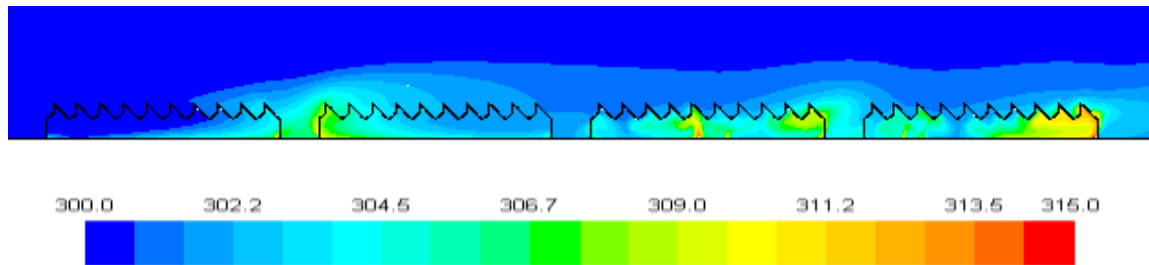


Figura 5. Zona de baja velocidad en el Módulo 3 naves 4-5 (vectores vel. viento  $m s^{-1}$ ).

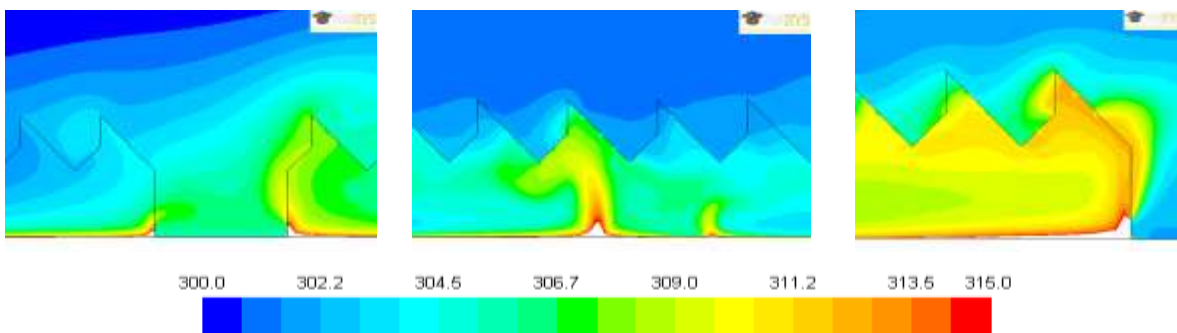


La Figura muestra una zona de baja velocidad que surge de la interacción del aire que entra por las ventanas laterales izquierda y derecha y las cenitales. Como resultado de una baja velocidad, existe la dificultad para remover la carga térmica y en consecuencia ese aire se calienta, determinando así el clima en el interior del invernadero, tal como se aprecia en la Figura . Se ha establecido 300 K como condición de frontera, que es la temperatura exterior, de la Figura resalta por un lado la marcada heterogeneidad que ocurre en el interior del invernadero y de los invernaderos en general, y por el otro la bondad del método que permite observar detalles y con ello plantear hipótesis para su corrección.



**Figura 6.** Distribución espacial de temperaturas (K) en los 4 módulos y su interacción con el exterior.

Bajo las condiciones de frontera y apertura de ventanas, es de apreciar algunos puntos críticos desde el punto de vista térmico, tal es el caso de la interacción salida/entrada de los módulos 1 y 2, la zona central del módulo 3 y la salida del módulo 4 mostrada en la Figura en el mismo orden que se menciona.



**Figura 7.** Detalles de las zonas "calientes" escenario cero (mapa de temperatura -K)

Los detalles de las zonas calientes, muestran gradientes que superan los 15 K respecto a la temperatura ambiental, lo que sugiere un sistema de ventilación que tal como está funcionando no es el más adecuado, y desde luego debe mejorarse, lo cual no necesariamente debe implicar un costo adicional, sino identificar las ventanas que pueden o deben ser cerradas y abiertas para las condiciones descritas.

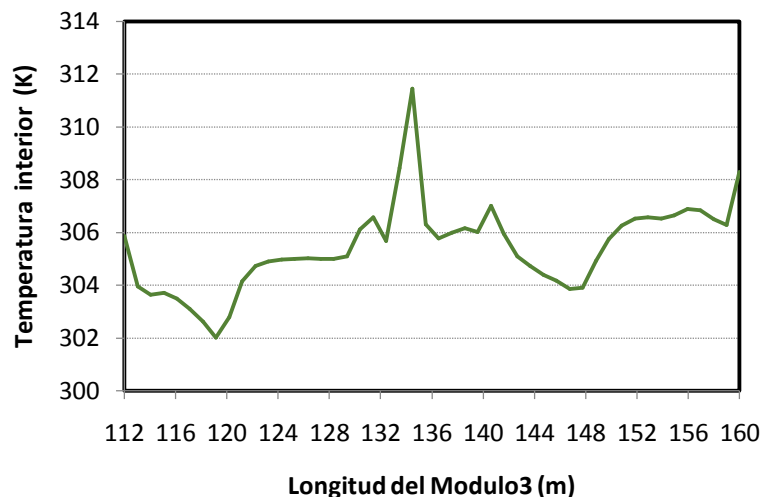
Se ha insistido la importancia del sistema de ventilación, pero también es importante mencionar que al igual que las semillas mejoradas y la solución nutritiva en el sistema de riego, el sistema de ventilación es un insumo y como tal



susceptible (y necesario) de gestionar o manejar para que en función de las condiciones medioambientales obtener los mejores resultados.

Uno de los grandes problemas actuales, no solo en la agricultura protegida es el ahorro en los insumos y principalmente en el uso de energías fósiles; bajo los escenarios de la Figura se podría plantear colocar ventiladores, o algún otro sistema de enfriamiento que repercuta en detrimento del ambiente, o en su defecto del costo de inversión, sin embargo, otra posibilidad es la modificación en el modo de ventilar, a continuación se hacen algunas modificaciones en la apertura de ventanas y muestra las diferencias del ambiente del invernadero.

Una técnica propuesta para favorecer el flujo del aire es el uso de deflectores que ayudan a conducir el aire hacia donde se requiere, el primer caso que se expone sería la colocación de "barreras" (deflectores) en el Módulo 3 con el fin de evitar esa zona de "choque" y así el incremento de la temperatura que se muestra en la Figura .



**Figura 8.** Perfil de temperaturas (K) en el Modulo3.

## Conclusiones

La dinámica de fluidos, herramienta numérica que mediante el planteamiento de ecuaciones que describen el movimiento de un fluido, puede ser considerada como una robusta herramienta en el análisis de la ventilación como forma de regular el clima del invernadero.

Uno de los principales problemas de los invernaderos multimodulares, es una gran longitud que el viento debe recorrer para ser evacuado; el uso de mallas anti-insectos y las bajas velocidades contribuyen en la disminución de la tasa de ventilación, consecuentemente el incremento de las temperaturas y heterogéneos gradientes térmicos.





En invernaderos modulares, la ventilación lateral cobra mayor importancia sobre la cenital; la ventana cenital contribuye en la expulsión del aire caliente; no obstante, es importante una modificación estructural que permita que aire fresco también entre.

### Referencias Bibliográficas

- Al-helal I. 1998. A computational fluid dynamics study of natural ventilation in arid region greenhouses. PhD Thesis. Ohio State University.
- Baeza, E.J., Perez-Parra, J., Montero J.L. 2004. Effect of ventilator size on natural ventilation in parral greenhouse by means of CDF simulations.
- Bartzanas T., Boulard T., Kittas C. 2004. Effect of Vent Arrangement on Winward Ventilation of a Tunnel Greenhouse. *Biosystem Engineering*, 88(4), 479-490.
- Brugger, M., Montero, J., Baezz, B., Perez-Parra, J. 2005. Computational fluid dynamics modelling to improve the design of the spanish parral style greenhouse. *Acta horticulturae*, 691, 425-432.
- Boulard T., Haxaire R., Lamrani M.A., Roy J.C., Jaffrin A., 1999. Characterization and modelling of the air fluxes induced by natural ventilation in a greenhouse, *J. Agric. Engng. Res.* 74: 135-144.
- Boulard T., Wang S., Haxaire R., 2000, Mean and turbulent air flows and microclimate patterns in an empty greenhouse tunnel. *Agricultural and Forest Meteorology* 100: 169-181.
- Boulard T. Kittas C., Roy J.C., Wang S. 2002. Convective and ventilation transfers in greenhouses, part 2: Determination of the distributed greenhouse climate, *Biosystems Engineering* 83 (2): 129-147.
- Brugger, M. Montero, J., Baezz E., Perez-Parra J. 2004. Computational fluid dynamic modeling to improve the design of the spanish parral style greenhouse.
- Campen J.B., Bot G. P. A. 2003. Determination of greenhouse-specific aspects of ventilation using three-dimensional computational fluid dynamics, *Biosystems Engineering* 84 (1): 69-77.
- Flores-Velazquez, J., Montero, J.I., Baeza, J.E., Bonachela, S., Lopez, J.C., AND Perez-Parra, J. 2009. Analysis of mechanical ventilation in a three-span greenhouse using computational fluid dynamics CFD. *Greensys*, 2009. Quebec, Ca
- Haxaire, R., Boulard, T. and Mermier, M., 2000. Greenhouse natural ventilation by wind forces. *Acta Hort.* 534, pp. 31-40.
- Kacira, M., Sase, S., Okushima, L. 2004. Effects of side vents and span numbers on wind-induced natural ventilation of a gothic multi-span greenhouse. *JARQ* 38(4): 227-233.
- Lopez-Cruz. I.L.; Ramírez-Arias, A.; Rojano-Aguilar A. 2004. Análisis de sensibilidad de un modelo dinámico de crecimiento para lechugas cultivadas en invernadero. *Agrociencia* 38 (6): 613-623.
- Lopez-Cruz I.L., vanThoor B., Rojano-Aguilar A. 2004. Modelos dinámicos mecanicista y empírico para predicción de la temperatura de un invernadero



- Mexicano. VI Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola. San Jose Costa Rica. 22-24 de noviembre de 2004.
- López-Cruz, I.L. vanThoor B., Rojano-Aguilar A., 2004. Modelo dinámico de la temperatura de un invernadero mexicano. III Congreso Internacional de Ingeniería Física, UAM-A, México D.F, 15-19 de noviembre.
- Molina-Aiz, F.D., Valera D.L., Gil J.A., Peña A.A. 2004. Optimisation of Almería-type greenhouse ventilation performance with computational fluid dynamics.
- Ramírez-Arias. A. 2005. Control jerárquico multiobjetivo de crecimiento de cultivos bajo invernadero. Tesis doctoral. Universidad de Almería. España.
- Romero-Gomez. P. M. 2005. Modeling natural ventilation for Mexican greenhouses. Thesis MsC. In Agricultural and Biosystems Engineering. The University of Arizona.
- Romero-Gómez, P.; I. L. López-Cruz, C. Y. Choi, 2008. Analysis of greenhouse natural ventilation under the environmental conditions of central Mexico. Transactions of the ASABE. Vol 51(5):1753-1761.
- Rico-García, I.L. López-Cruz, G. Herrera-Ruiz, G.M. Soto-Zarazúa, R. Castañeda-Miranda. 2008. Effect of temperature on greenhouse natural ventilation under hot conditions: CFD simulations. Journal of Applied Sciences. 8 (24): 4543-4551.
- Tap F. 2000. Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production, PhD Thesis, Wageningen Agricultural University
- Van Henten, E.J. 2994. Greenhouse climate management: an optimal control approach, PhD Thesis, Wageningen Agricultural University. The Netherlands.
- Wang S. Boulard T. 2000. Predicting the microclimate in naturally ventilated plastic house in a Mediterranean climate, J. Agric. Engng. Res. 75:27-38.