

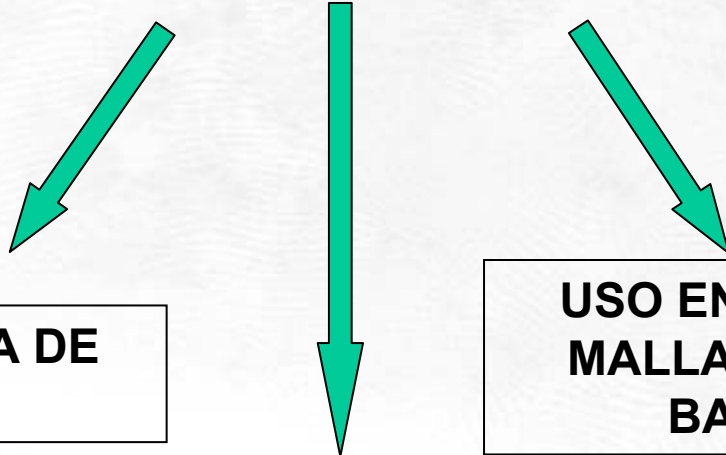
La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) como herramienta para mejorar el diseño de los sistemas de ventilación natural en invernadero

Esteban José Baeza Romero



Almería, Noviembre 2007

VENTILACIÓN NATURAL INSUFICIENTE



INSUFICIENTE ÁREA DE VENTILACIÓN

USO EN LAS VENTANAS DE MALLAS ANTI-INSECTO DE BAJA POROSIDAD

DISEÑOS DE VENTILACIÓN POCO EFICIENTES



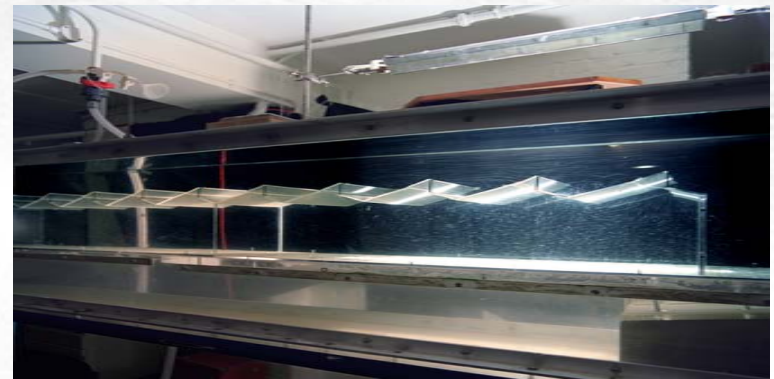
Métodos de estudio de la ventilación natural

MÉTODOS EXPERIMENTALES:

- TÉCNICAS DE BALANCE DE MASA QUE EMPLEAN UN GAS TRAZADOR



- MEDIDA DIRECTA DE LA VELOCIDAD DEL AIRE Y/O DE LA PRESIÓN EN LAS VENTANAS
- EMPLEO DE MODELOS A ESCALA (TÚNEL DE VIENTO O VISUALIZACIÓN DE FLUJOS EN CANAL DE AGUA)

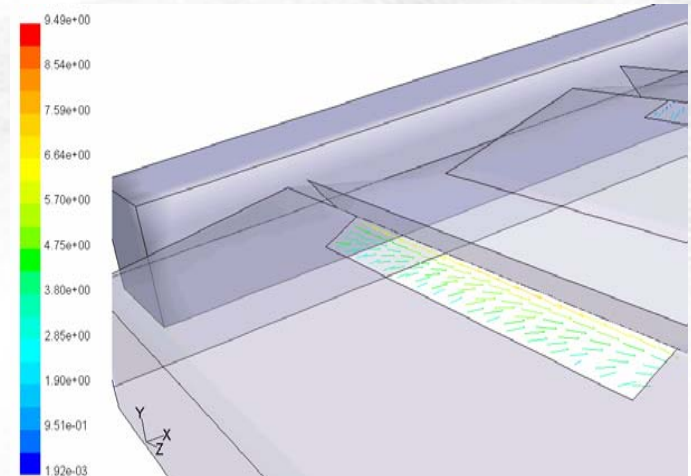
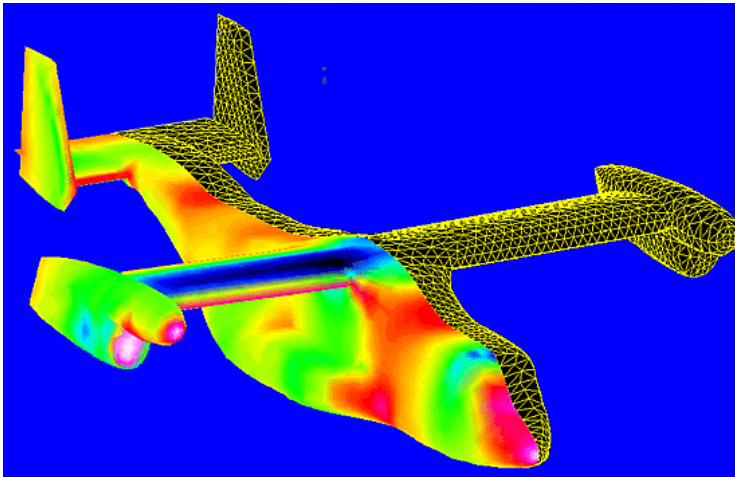


Métodos de estudio de la ventilación natural

- REALIZACIÓN DE UN BALANCE DE ENERGÍA O MASA (VAPOR DE AGUA) AL INVERNADERO

MÉTODOS NUMÉRICOS:

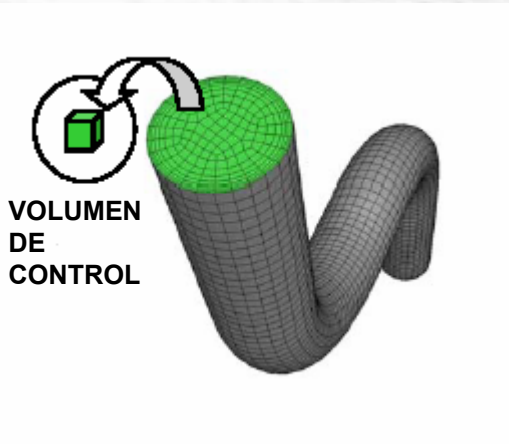
- LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)



- **La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta para estudiar el flujo de un fluido, la transferencia de calor y masa, reacciones químicas, y fenómenos relacionados mediante la resolución numérica del conjunto de ecuaciones matemáticas que gobiernan el flujo**
 - **Conservación de la masa, de la energía, del momento, especies, etc.**
- **Los resultados de los análisis CFD son muy útiles para:**
 - **Estudios conceptuales para nuevos diseños y rediseños**
 - **Desarrollo detallado de productos**
- **El análisis CFD complementa (no sustituye!!) Los ensayos y la experimentación**
 - **Reduce el esfuerzo total requerido en el diseño de los experimentos y en adquisición de datos**

• EL CÓDIGO CFD EMPLEA UN MÉTODO NUMÉRICO (volúmenes finitos)

- El dominio es discretizado en un conjunto finito de volúmenes o celdas de control.
- Se resuelven para cada volumen o celda de control las ecuaciones generales de conservación (transporte) de masa, momento, energía, etc.:



LA REGIÓN FLUIDA DEL FLUJO ES DIVIDIDA EN UN CONJUNTO FINITO DE VOLÚMENES DE CONTROL (MALLA)

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{No estacionario}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Convección}} = \underbrace{\oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Difusión}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Generación}}$$

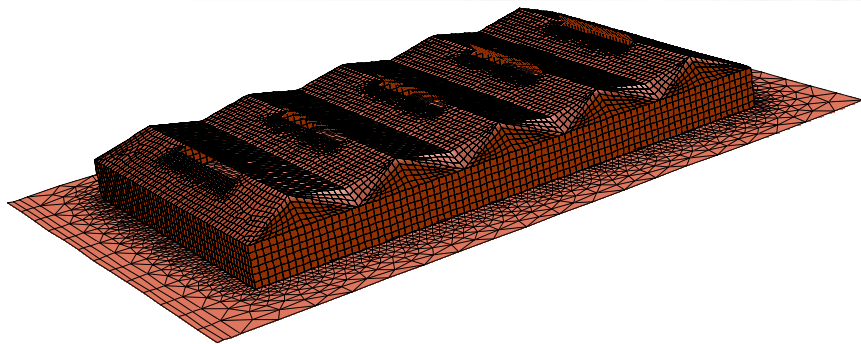
<u>Eqn.</u>	ϕ
continuidad	1
x-mom.	u
y-mom.	v
energía	h

Las ecuaciones diferenciales parciales son discretizadas en un sistema de ecuaciones algebraicas

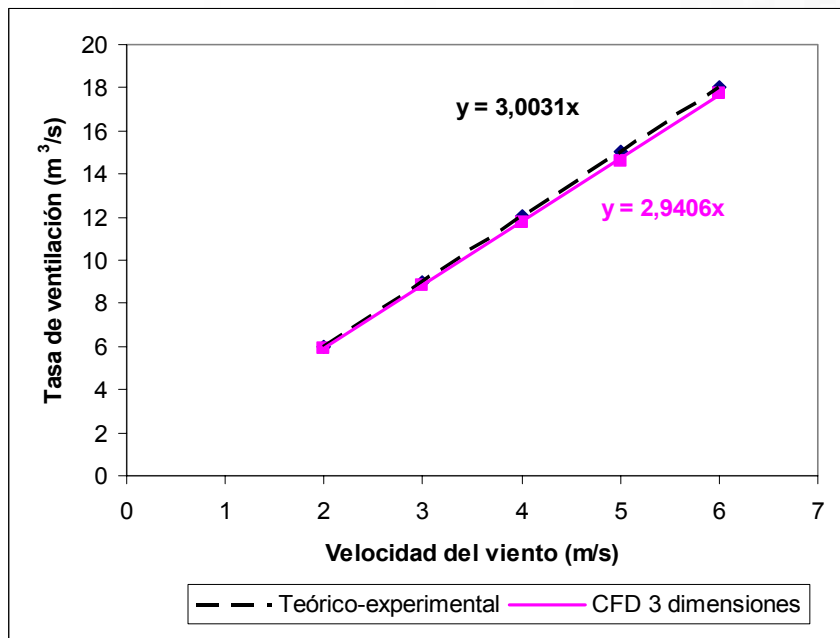
- TODAS LAS ECUACIONES ALGEBRAICAS SON RESUELTAS NUMÉRICAMENTE PARA LLEGAR AL CAMPO-SOLUCIÓN FINAL.



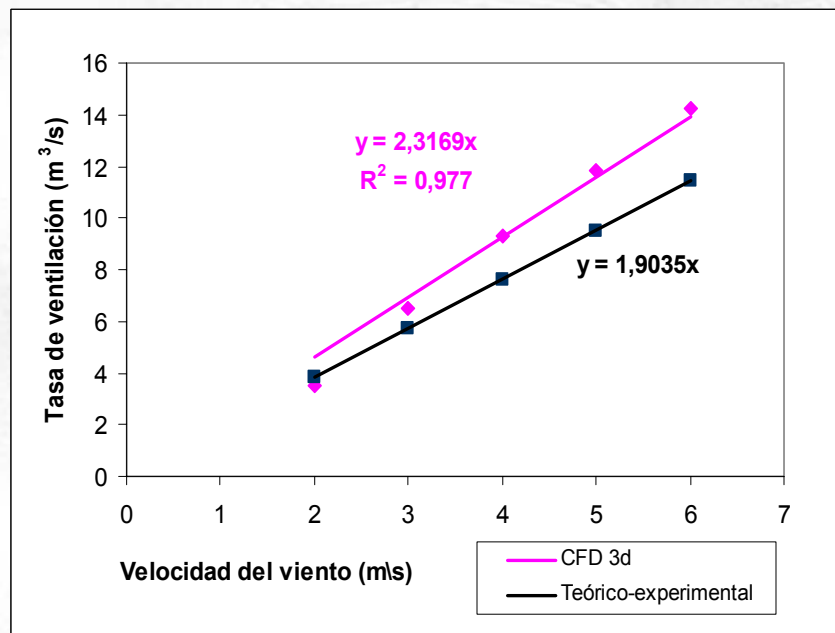
Invernadero parral 5 capillas (3d)



Comparación de rectas de ajuste (tasa de ventilación vs. velocidad de viento) : gas trazador y simulaciones CFD. Viento perpendicular a barlovento de las ventanas (270°) y a sotavento (180°).

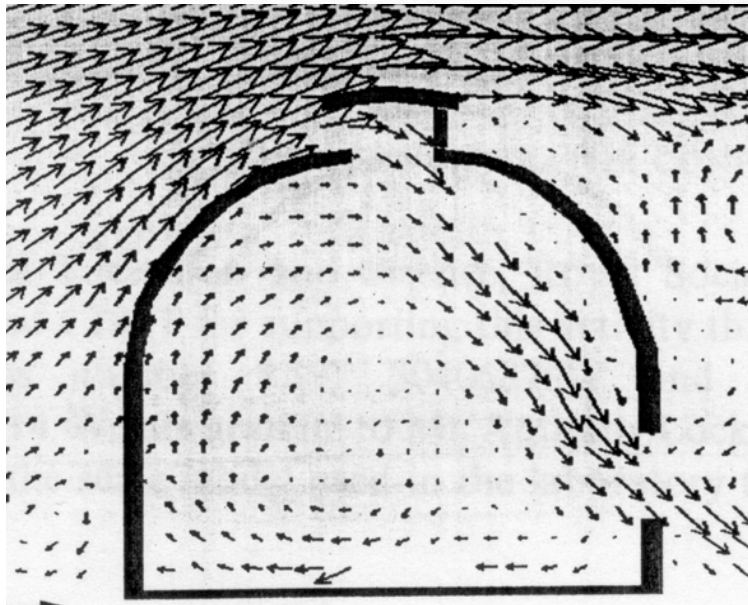


BARLOVENTO

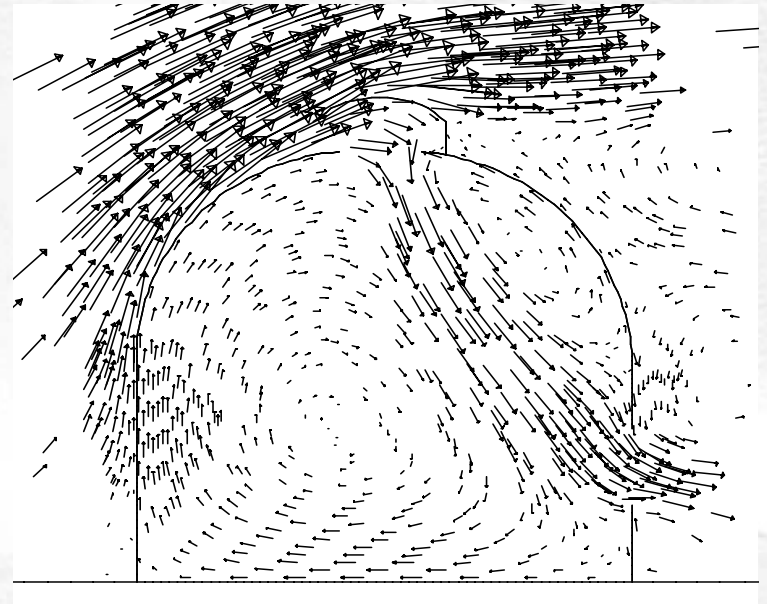


SOTAVENTO

CONFIGURACIÓN 3: CENITAL DE BARLOVENTO Y LATERAL DE SOTAVENTO



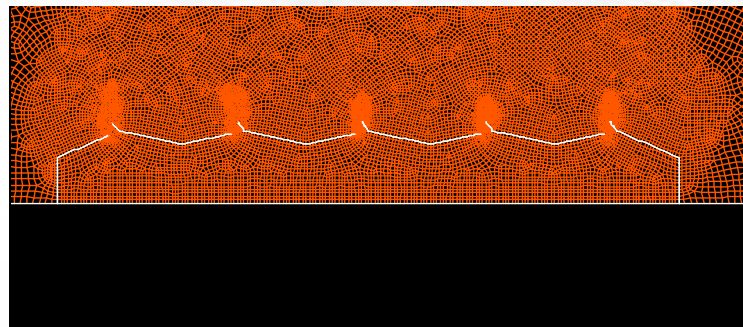
**Canal de agua
(Montero y col., 2001)**



CFD

Modelos CFD

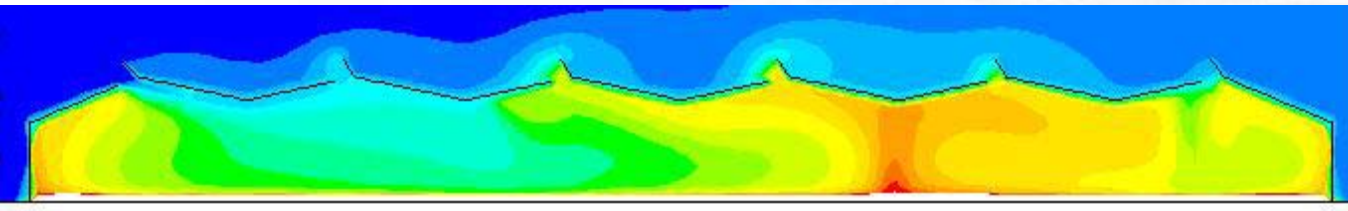
- Tres modelos generados empleando el pre-procesador del código Fluent v 6.1 (Ansys-Fluent Inc.) variando la posición y tipo de ventanas. Posteriormente se generan otros tres modelos con las mismas configuraciones pero incrementando la pendiente de 12 a 27° y aumentando la anchura de las ventanas cenitales de 0,73 a 1,5 m.
- Todos los modelos representaron secciones longitudinales en dos dimensiones del invernadero experimental con las ventanas completamente abiertas(67°)
- Velocidad de viento: 2 m s⁻¹; barlovento; Temperatura exterior 30 °C



ACTUACIONES ACONSEJABLES

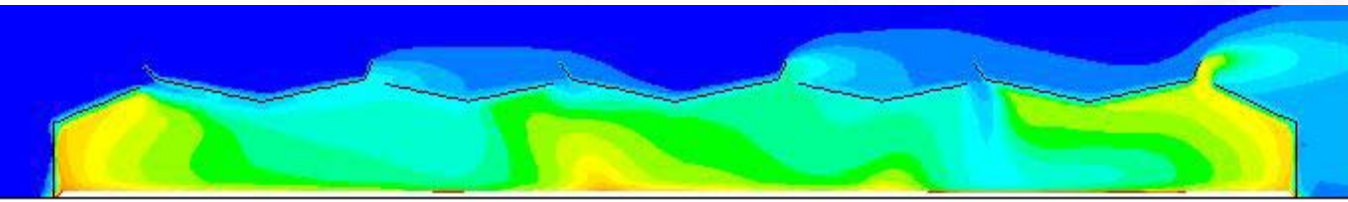
MEJORA DE LA VENTILACIÓN NATURAL DEL INVERNADERO:

DISPOSICIÓN DE LAS VENTANAS



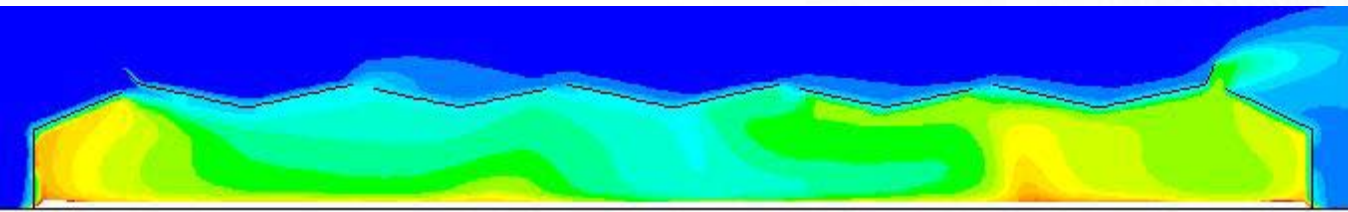
Ventanas abatibles 73 cm a barlovento. Pendiente 12°

$\Delta T = 4,6^{\circ}\text{C}$



Ventanas abatibles 73 cm alternas. Pendiente 12°

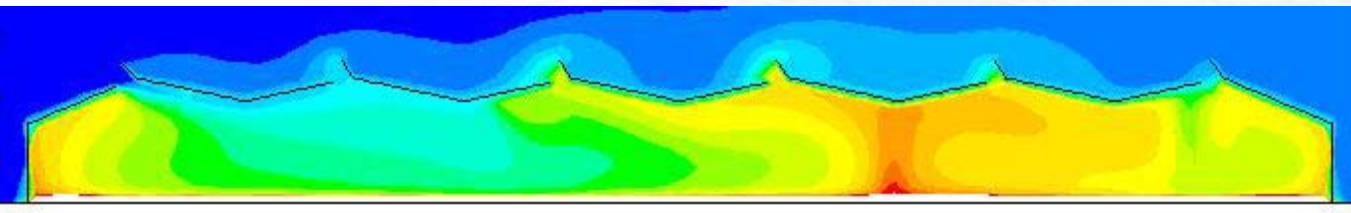
$\Delta T = 3,7^{\circ}\text{C}$



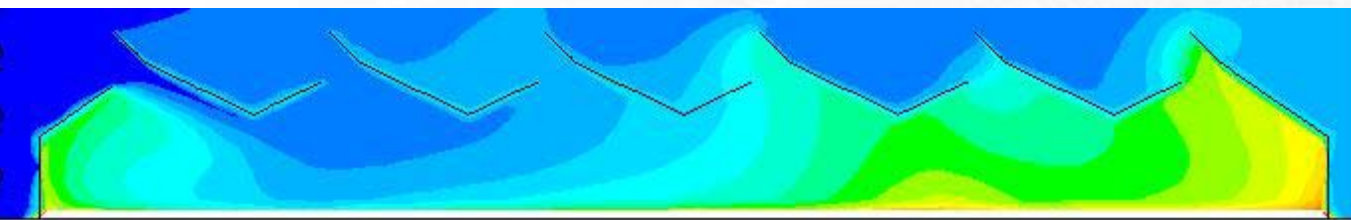
Ventanas extremas abatibles 73 cm Centrales enrollables alternas 73 cm. Pendiente 12°

$\Delta T = 3,8^{\circ}\text{C}$

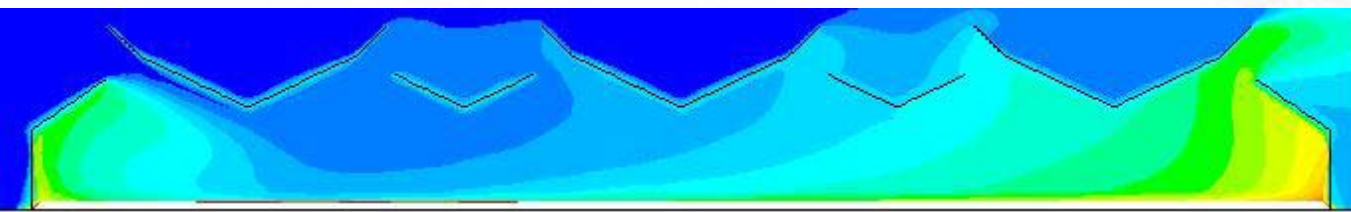
COMBINACIÓN DE FACTORES (Mejora de la pendiente a 27° y aumento al doble del ancho de ventana)



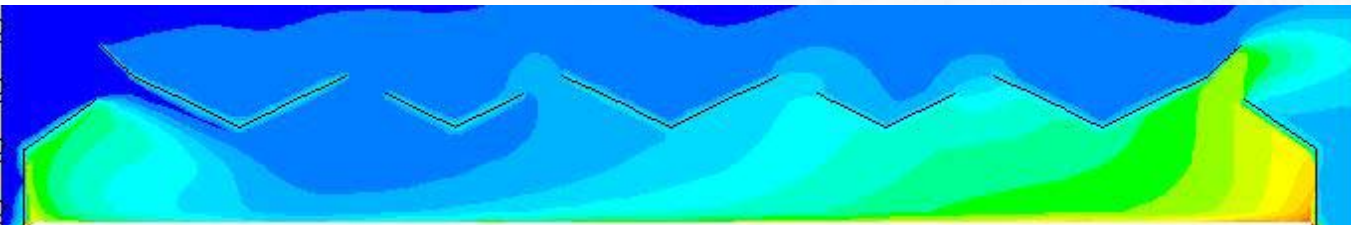
Ventanas abatibles 73 cm a barlovento. Pendiente 12°
 $\Delta T = 4,6^{\circ}\text{C}$



Ventanas abatibles 150 cm a barlovento. Pendiente 27°
 $\Delta T = 2,6^{\circ}\text{C}$



Ventanas abatibles 150 cm alternas. Pendiente 27°
 $\Delta T = 2,3^{\circ}\text{C}$



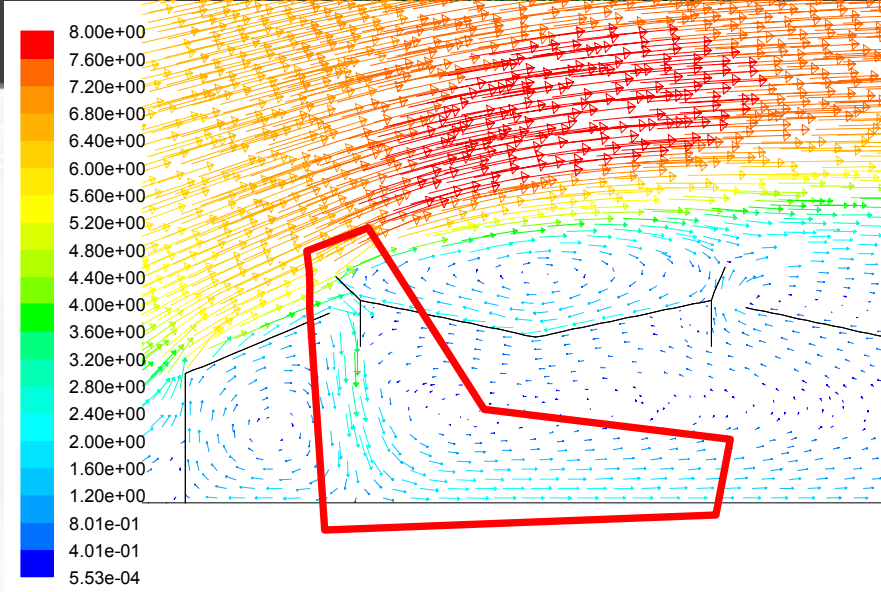
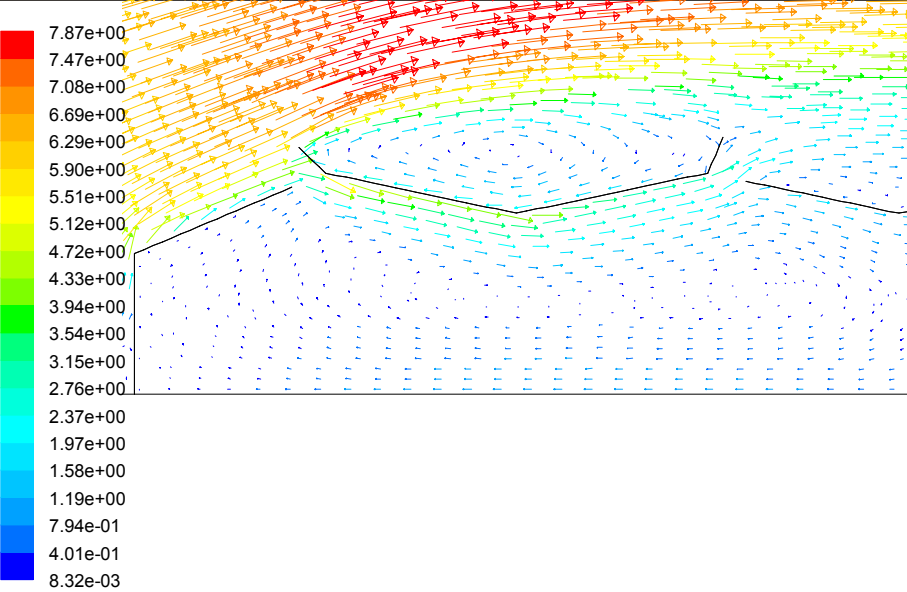
Ventanas extremas abatibles 150 cm Centrales enrollables alternas 150 cm. Pendiente 27°
 $\Delta T = 2,5^{\circ}\text{C}$

Efecto de un dispositivo deflector del flujo en las ventanas

Nielsen (2002) propone el uso de una pantalla interior colocada en cumbre de un invernadero monocapilla, desviando el flujo de aire entrante por las ventanas cenitales y obteniendo una mejora sustancial en el movimiento de aire y la temperatura con ventilación por efecto eólico.

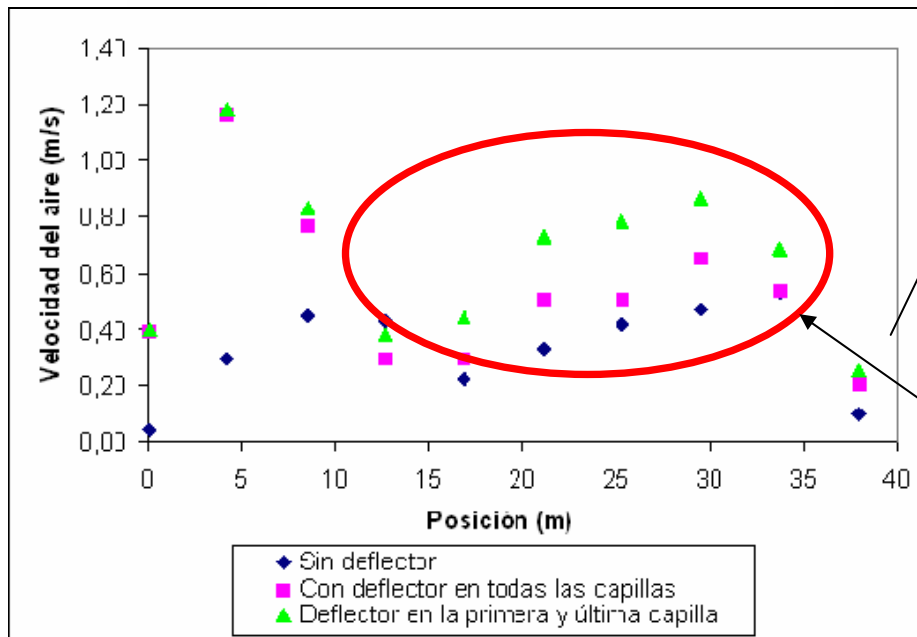
En este apartado se presentan los resultados mediante simulación CFD del uso de este tipo de deflector en un invernadero con mayor número de capillas y para tres configuraciones diferentes: todas las ventanas a barlovento, ventanas alternas y ventanas dobles.

Vel. del viento (m s ⁻¹)	Modelo 1 (abatibles a barlovento) Tasa de ventilación (m ³ s ⁻¹)		Modelo 2 (alternas) Tasa de ventilación (m ³ s ⁻¹)		Modelo 3 (dobles) Tasa de ventilación (m ³ s ⁻¹)	
	Sin deflector	Con deflector	Sin deflector	Con deflector	Sin deflector	Con deflector
2	7,8	6,7	7,9	5,9	11	11,8
3	10,2	8,8	12,6	8,3	15,8	16
4	12,6	10,9	16,5	11	21,5	20,8
5	15,1	13,2	20,7	13,6	26,9	25,6
6	17,6	16	24,7	22,3	32,4	29,9



Ventanas alternas sin deflector

Ventanas alternas con deflector



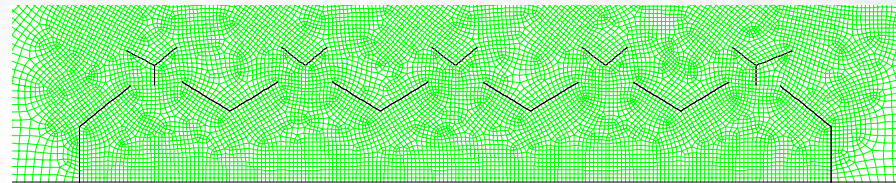
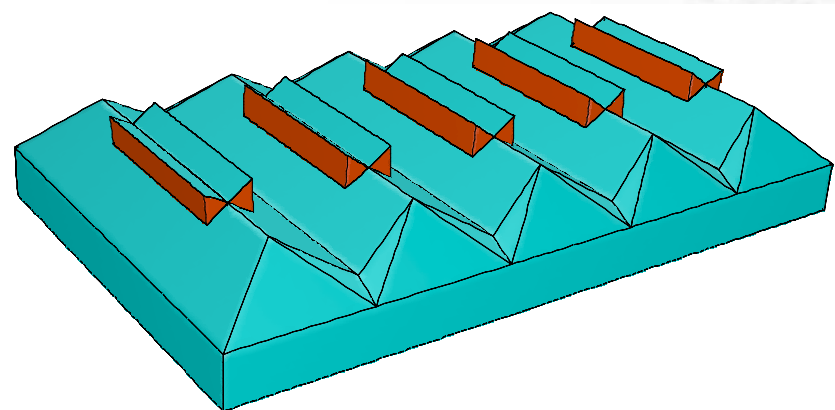
Ventanas dobles; Velocidad del aire a 1 m de altura para tres configuraciones diferentes. Sin deflector, con deflector en todas las capillas y con deflector solamente en la primera y última capilla.

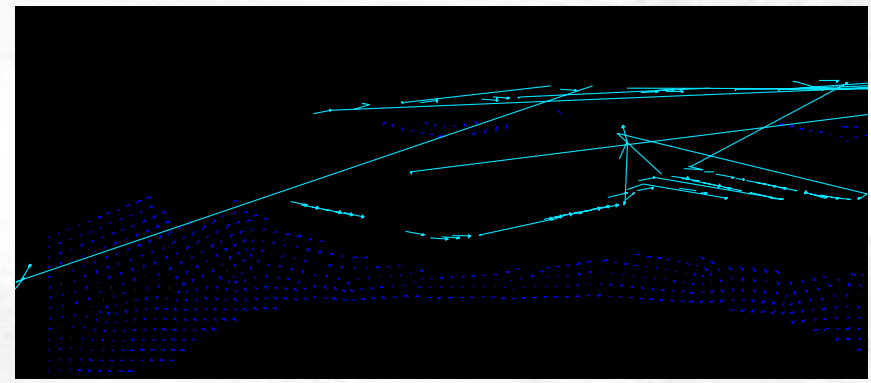
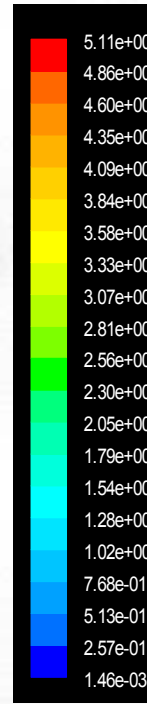
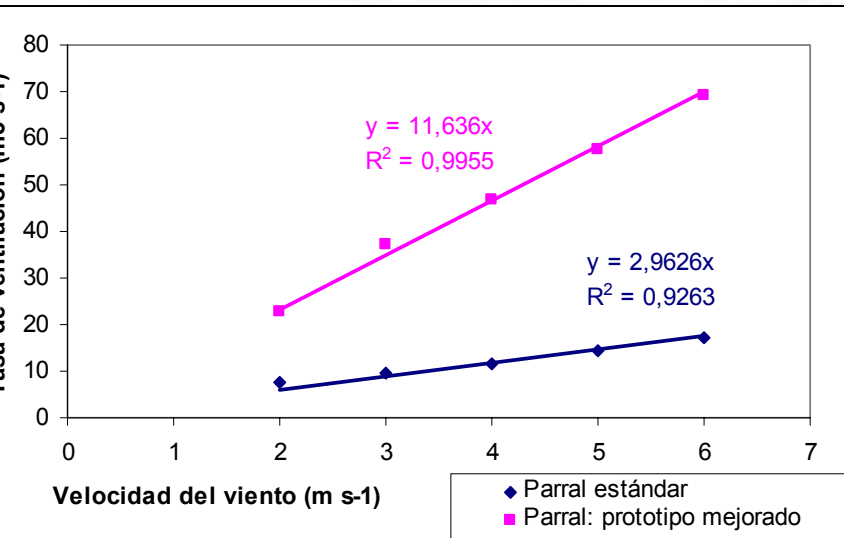
No es necesario colocar el deflector en todas las ventanas

Propuesta de nuevo diseño de invernadero parral con mejoras de ventilación

Se desarrolla un nuevo modelo en 2D de invernadero para simulación CFD que incorpora de forma conjunta las modificaciones de diseño de la ventilación previamente evaluadas y que han proporcionado mejores resultados:

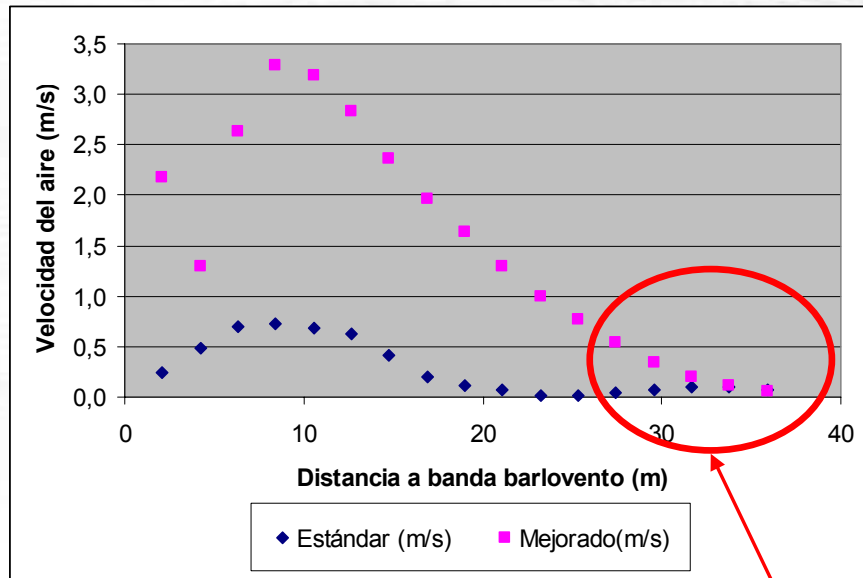
- Ventanas abatibles más grandes (más anchas: 1,6 m y largas: 10 m).
- Uso de ventanas abatibles dobles en cada capilla.
- Incremento de la pendiente (de $11,9^\circ$ a 27°).
- Uso de deflectores (anchura 1 m) en la primera y última capilla.



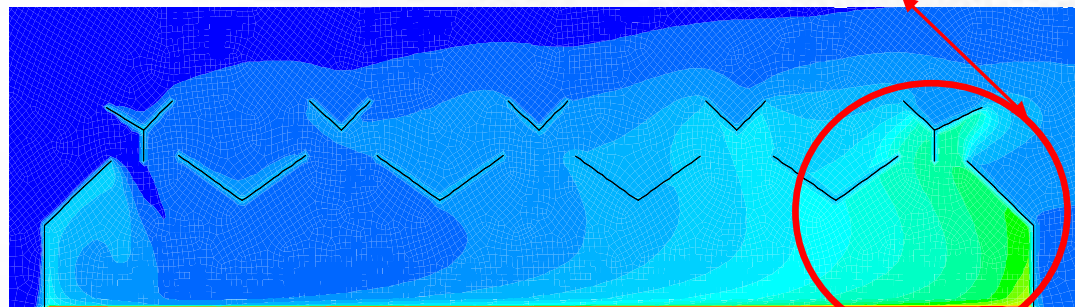
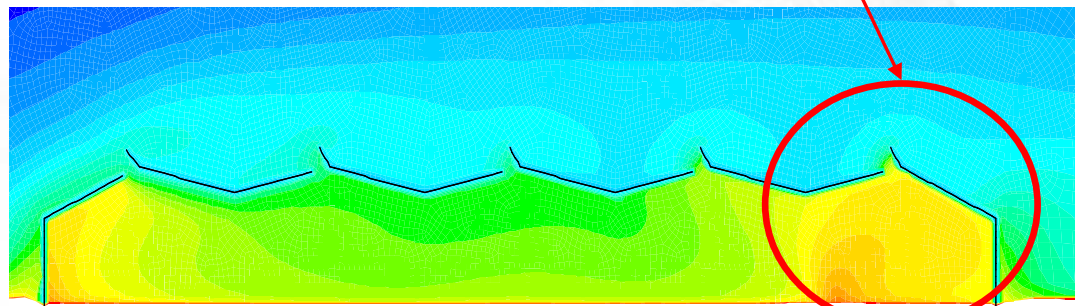
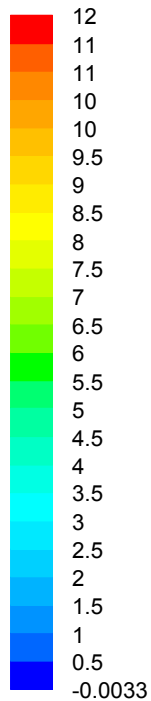


011001010011101010010100
 01100101011001010100100101
 10101001110101001110101001

Propuesta de diseño de un nuevo prototipo de invernadero tipo parral con ventilación mejorada

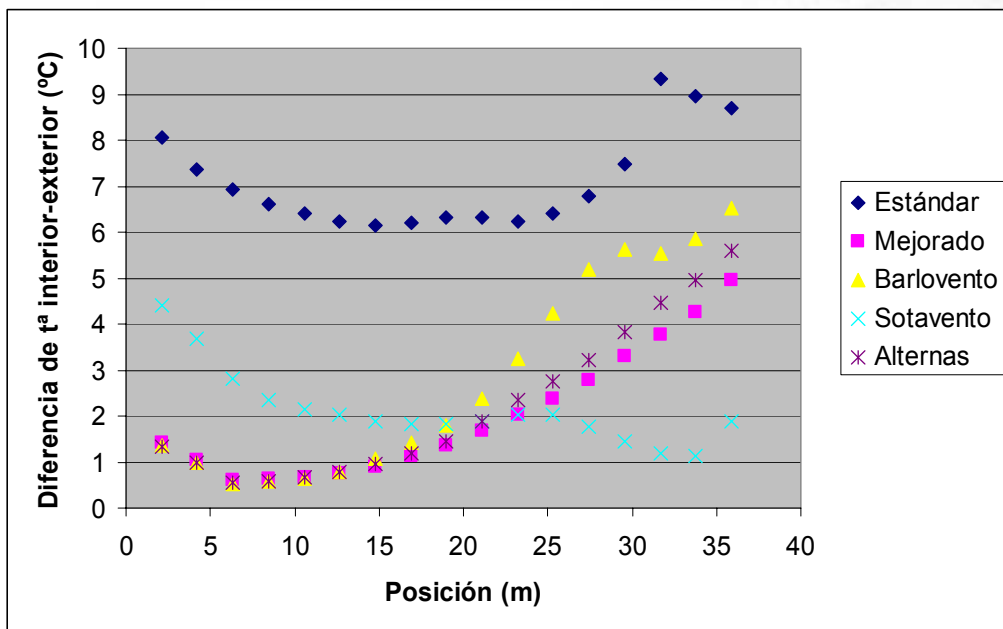


Altura: 0,5 m sobre el suelo



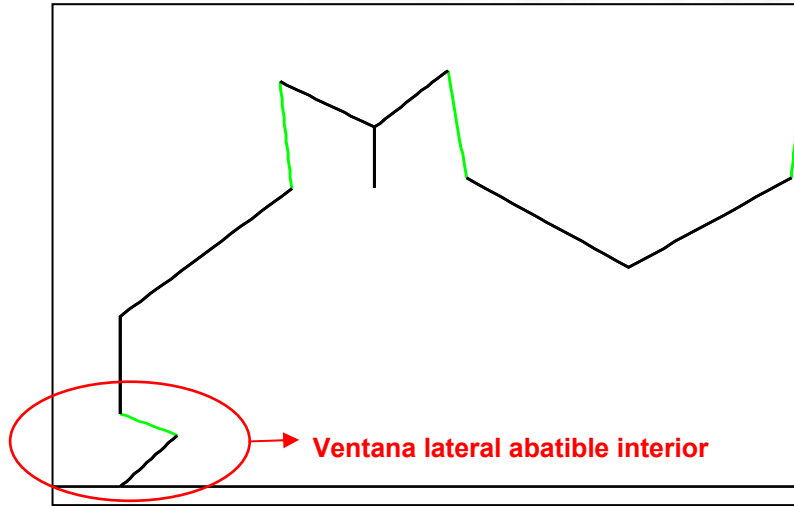
MODIFICACIÓN DE LA APERTURA DE LAS VENTANAS DOBLES: SOLO A BARLOVENTO, SOLO A SOTAVENTO, ALTERNAS Y DOBLES.

	Invernadero estándar	Invernadero mejorado (ventanas dobles abiertas)	Invernadero mejorado (ventanas abiertas solo a barlovento)	Invernadero mejorado (ventanas abiertas solo a sotavento)	Invernadero mejorado (ventanas abiertas de forma alterna)
Caudal de ventilación ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	12,6	45,9	35,5	30,3	30,3

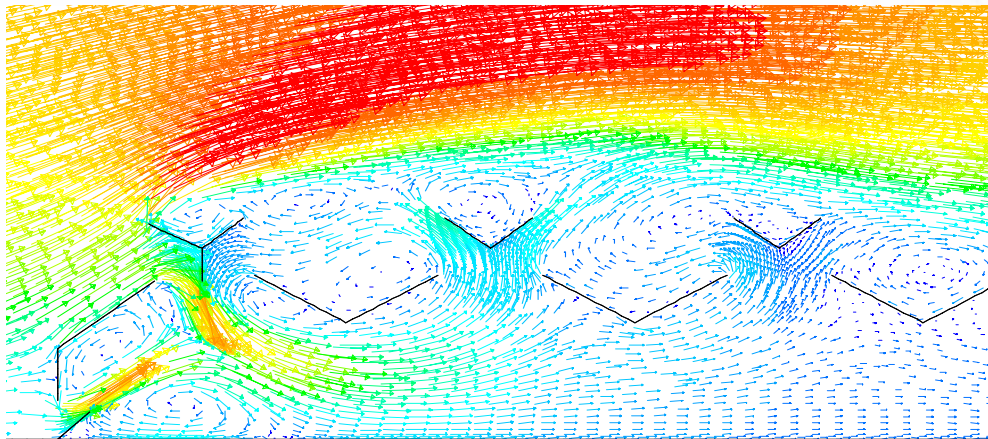
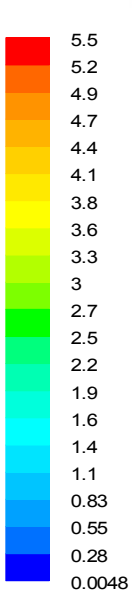


ALTURA: 1,5 m sobre el suelo

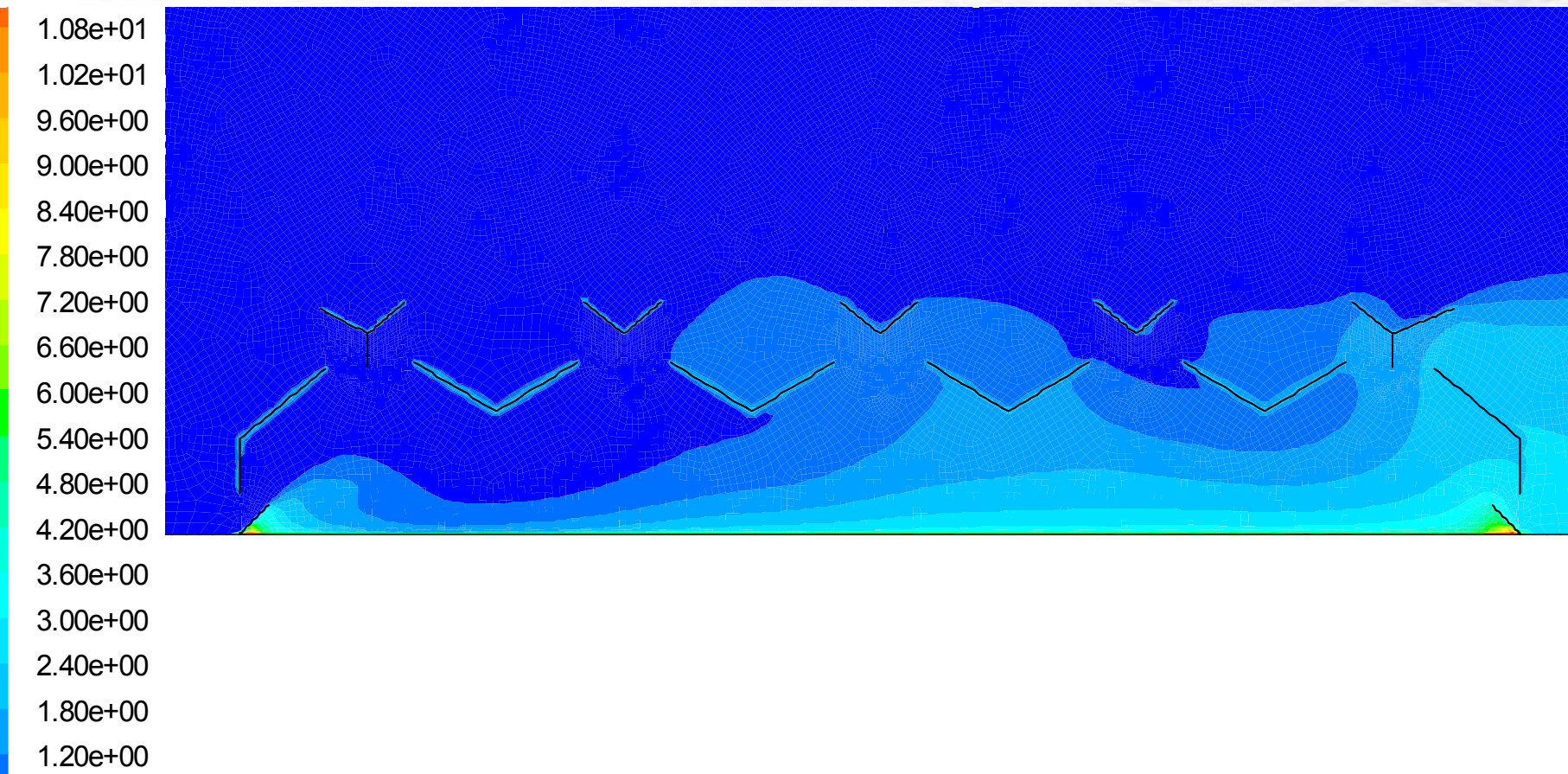
EN TODAS LAS CONFIGURACIONES, APARECE AL MENOS UNA CAPILLA EN LA QUE EL GRADIENTE TÉRMICO ES MAYOR DE LO DESEABLE, CREANDO ADEMÁS MENOR UNIFORMIDAD TÉRMICA EN EL INTERIOR. ¿PUEDEN LAS VENTANAS LATERALES AYUDAR?



Diseñamos una ventana lateral abatible en la parte inferior del invernadero, que evita el impacto del flujo de aire entrante directamente sobre el cultivo.



Con esta configuración, para un viento de 4 m s^{-1} , la tasa de ventilación multiplica en un factor próximo a 3 el valor que se obtenía en el diseño mejorado, que ventilaba solo a través las ventanas cenitales.



Valores de gradiente térmico interior-externo (°C) para el modelo mejorado con ventilación cenital doble y ventanas laterales abatibles.

